

ANA CLÁUDIA MARASSÁ ROZA BOSO

**MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE
BOTUCATU/SP**

Botucatu

2022

ANA CLÁUDIA MARASSÁ ROZA BOZO

**MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE
BOTUCATU/SP**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientador(a): Alexandre Dal Pai

Botucatu

2022

B744m

Boso, Ana Cláudia Marassá Roza

Modelagem matemática e computacional para estimativa da
evapotranspiração de referência para o município de Botucatu/SP /
Ana Cláudia Marassá Roza Boso. -- Botucatu, 2023

104 p. : tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu

Orientador: Alexandre Dal Pai

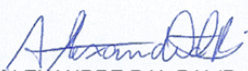
1. Irrigação. 2. Sensoriamento remoto. 3. Evapotranspiração. 4.
Meteorologia. 5. Computação Matemática. I. Título.

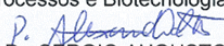
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

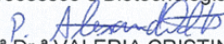
TÍTULO DA TESE: MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE
BOTUCATU/SP

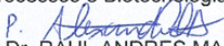
AUTORA: ANA CLAUDIA MARASSÁ ROZA BOZO
ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

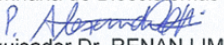
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Agrícola, pela
Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI (Participação Virtual)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu


Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participação Virtual)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP


Prof.^a Dr.^a VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN (Participação Virtual)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP


Prof. Dr. RAUL ANDRES MARTINEZ URIBE (Participação Virtual)
Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - UNESP - Tupã/SP


Pesquisador Dr. RENAN LIMA DE SOUSA (Participação Virtual)
Secretaria de Desenvolvimento Rural e Abastecimento / Prefeitura Municipal de Florianópolis

Botucatu, 30 de novembro de 2022.

Aos meus pais, Juraci Boso (in memoriam) e Ana Maria
Marassá Roza Boso, que sempre me incentivaram na
realização dos meus sonhos.

Ao meu marido Renato Tenório, que sempre esteve ao meu
lado nas minhas conquistas.

Ao meu filho, Miguel Boso Tenório, que é a minha força
para eu seguir em frente.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à DEUS, por possibilitar a concretização desse percurso acadêmico tão memorável.

Aos meus pais, Juraci Boso e Ana Maria Marassá Roza Boso, pelo suporte e incentivo na finalização dessa etapa acadêmica. Sempre confiando na minha capacidade e determinação.

Ao meu querido marido, Renato Tenório, que durante a nossa união possibilitou meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Ao meu Irmão Rodolfo Marassá Roza Boso, que nunca deixou de me incentivar a seguir grandes voos.

A minha cunhada Joyce Marassá, que auxiliou em momentos decisivos em minha vida, que possibilitaram a concretização desse período grandioso.

A minha sogra, Maria de Fátima Pinheiro da Rocha Tenório e ao meu sogro Manoel Tenório Filho, por todo suporte em minhas realizações acadêmicas.

Ao meu orientador Alexandre Dal Pai, pela paciência, humildade e principalmente por todo os ensinamentos durante a minha vida acadêmica no programa de pós-graduação. Ao senhor serei sempre grata.

Aos meus amigos e professores Dr. Camila Pires Cremasco Gabriel e Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho, primeiros orientadores, aos quais devo grande parte dessa conquista e os ensinamentos que me foram transmitidos.

Aos amigos que conquistei na trajetória acadêmica, em especial aos queridos amigos Evanize Rodrigues Castro, Jhonatan Cabrera Piazzentin e Daniel Gonçalves Gomes Júnior.

RESUMO

A quantificação da evapotranspiração de referência (ET_o) é de grande importância na definição do balanço hídrico, principalmente na agricultura irrigada. Sua medida pode ser obtida por meio de metodologia direta (lisímetro) ou indireta (equações empíricas). No entanto, para pequenos produtores, a aquisição e manutenção do lisímetro em campo, se torna inviável. Nestes casos, metodologias alternativas, como o modelo recomendado pela FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (Penman-Monteith), modelos empíricos e dados de sensoriamento remoto, podem ser aplicadas na estimativa da ET_o . Dependendo das condições climáticas e da metodologia utilizada, como os modelos empíricos, é necessário realizar a calibração local dos coeficientes. Neste sentido o vigente trabalho, dividido em três capítulos, apresenta a eficiência dos modelos empíricos (originais e calibrados) e do sensoriamento remoto, em estimar a ET_o para o município de Botucatu – SP. O primeiro capítulo descreve o desempenho dos modelos empíricos em relação os valores reais, mensurados pelo lisímetro de pesagem. Os resultados demonstram que os modelos originais, desenvolvidos para climas árido e semiárido, apresentaram uma superestimativa média da ET_o , em relação à medida real, em 121,07% para período mensal e 49,14% para diário. Os modelos originais de Thornthwaite e Priestley e Taylor apresentaram médias próximas ao do lisímetro, uma diferença de 15,52% e 5,15% respectivamente. Entre os modelos calibrados, Hargreaves-Samani e Jensen-Haise exibiram o índice de Willmott (d) em 0,85 e 0,88 nessa ordem, indicando bom desempenho na estimativa. Para os modelos calibrados que ainda apresentaram diferença significativa entre as médias da ET_o , foi realizado um ajuste para períodos acumulados de três, cinco e sete dias, onde verificou-se que os modelos de Turc, Camargo e Priestley e Taylor apresentaram desempenho satisfatório para os três períodos avaliados. Os três modelos estimaram valores da ET_o equivalentes ao apresentado no lisímetro. O segundo capítulo, análogo ao primeiro, indica a eficiência dos modelos empíricos em relação ao modelo de Penman-Monteith (FAO 56). O modelo original de Tomar e O'toole apresentou valor médio inferior da ET_o em 57,36%, sobre o valor estimado por Penman-Monteith (FAO 56). Novamente o modelo de Thornthwaite, original e ajustado, apresentou estimativas próximas ao modelo de referência. Uma diferença apenas de 4,25% e 2,82% respectivamente. A calibração local dos modelos proporcionou maior eficiências na estimativa da ET_o , com redução de 82,75% do erro absoluto médio (MAE) e de 80,75% para raiz quadrada do erro médio (RMSE). Entre os modelos ajustados, Blaney-Criddle apresentou o maior valor do coeficiente de Pearson ($r = 0,97$), indicando a possibilidade de sua aplicação para o local de estudo. O terceiro capítulo descreve a eficiência do SR (sensoriamento remoto MODIS16) em estimar a ET_o em relação ao valor real (lisímetro) e o estimado por PM (Penman-Monteith/FAO). O modelo SR superestimou a ET_o em 5,42% e 12,19% em relação ao modelo PM e o lisímetro. Os dados também apresentaram boa correlação entre a relação SR/lisímetro ($r = 0,5$ e $d = 0,66$). Os dados estatísticos

indicam que o modelo SR pode ser aplicado para estimativa da evapotranspiração, nas condições climáticas do município em estudo.

Palavras-chave: irrigação; sensoriamento remoto; evapotranspiração; meteorologia; computação matemática.

ABSTRACT

The quantification of reference evapotranspiration (ET_o) is of great importance in defining the water balance, mainly in irrigated agriculture. Its measurement can be controlled by means of direct methodology (lysimeter) or indirect methodology (empirical equations). However, for small producers, the acquisition and maintenance of the lysimeter in the field becomes unfeasible. In these cases, alternative methodologies, such as the model recommended by the FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (Penman-Monteith), empirical models and remote sensing data, can be applied to estimate the ET_o . Depending on the weather conditions and the methodology used, such as empirical models, it is necessary to perform local calibration of the coefficients. In this sense, the current work, divided into three chapters, presents the efficiency of empirical models (original and calibrated) and remote sensing, in estimating the ET_o for the municipality of Botucatu - SP. The first chapter describes the performance of the empirical models in relation to the real values, measured by the weighing lysimeter. The results showed that the original models, carried out for arid and semi-arid climates, presented an overestimated average of ET_o , in relation to the actual measurement, by 121.07% for the monthly period and 49.14% for the daily period. The original models by Thornthwaite and Priestley and Taylor presented means close to the lysimeter, a difference of 15.52% and 5.15% respectively. Among the calibrated models, Hargreaves-Samani and Jensen-Haise exhibit the Willmott index (d) at 0.85 and 0.88 in that order, indicating good performance in the estimation. For the calibrated models that still showed a significant difference between the ET_o means, an adjustment was made for accumulated periods of three, five and seven days, where it was assumed that the model by Turc, Camargo and Priestley and Taylor performed for the three evaluation periods. The three models estimated ET_o values equivalent to those presented in the lysimeter. The second chapter, described in the first, indicates the efficiency of the empirical models in relation to the Penman-Monteith model (FAO 56). The original model by Tomar and O'toole showed a lower mean ET_o value of 57.36% compared to the value estimated by Penman-Monteith (FAO 56). Once again, the original and adjusted Thornthwaite model presented preterm infants close to the reference model. A difference of only 4.25% and 2.82% respectively. The local capacity of the administered models showed greater efficiencies in estimating the ET_o , with a reduction of 82.75% in the mean absolute error (MAE) and 80.75% in the square root mean error (RMSE). Among the adjusted models, Blaney-Criddle had the highest Pearson coefficient value ($r = 0.97$), indicating the possibility of its application to the study location. The third chapter describes the efficiency of SR (MODIS16 remote sensing) in estimating the ET_o in relation to the real value (lysimeter) and the value estimated by PM (Penman-Monteith/FAO). The SR model overestimated the ET_o by 5.42% and 12.19% compared to the PM model and the lysimeter. The data also showed good dynamics between the SR/lysimeter ratio ($r = 0.5$ and $d = 0.66$). Statistical data indicate that

the SR model can be applied to estimate evapotranspiration, under the climatic conditions of the municipality under study.

Keywords: irrigation; remote sensing; evapotranspiration; meteorology; mathematical computing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo 1 – Modelos calibrados para estimativa da evapotranspiração de referência, para o município de Botucatu/SP, em relação ao lisímetro de pesagem

- Figura 1 – Localização da região de estudo, município de Botucatu, no mapa do estado de São Paulo..... 29
- Figura 2 – Estação Evapotranspirométrica da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP..... 30
- Figura 3 – Estações meteorológica e radiométrica da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP..... 30
- Figura 4 – Equipamentos de monitoramentos das estações meteorológica e radiométrica da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP: (a) Sensor de temperatura e umidade do ar; (b) Pluviômetro; (c) Anemômetro; (d) Saldo radiômetro..... 31
- Figura 5 – Comportamento gráfico dos valores da *ET_o* quantificado pelo lisímetro e estimado de acordo com os modelos empíricos originais e ajustados..... 48

Capítulo 2 – Ajuste de modelos empíricos na estimativa da evapotranspiração de referência, para o município de Botucatu - São Paulo, em relação ao modelo de Penman-Monteith.

- Figura 1 – Localização do município de Botucatu/SP..... 61
- Figura 2 – Desempenho gráfico dos models ajustados e originais em relação ao modelo de referência de Penman-Monteith (FAO 1998)..... 74

Capítulo 3 – Eficiência do sensoriamento remoto MODIS16 na estimativa da evapotranspiração para o município de Botucatu - São Paulo

Figura 1 – Localização do município de Botucatu/SP.....	86
Figura 2 – Lisímetro de pesagem instalado no Departamento de climatologia UNESP - Botucatu.....	87
Figura 3 – Estação Meteorológica automatizada (a) e convencional (b) da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo.....	88
Figura 4 – Componentes da estação meteorológica e da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo: (a) Sensor de temperatura e umidade do ar; (b) Anemômetro; (c) Pluviômetro; (d) Saldo radiômetro.....	88
Figura 5 – Algoritmo do sensoriamento remoto MOD16A2v006 Evapotranspiration/ Latent Heat Flux.....	89
Figura 6 – Análise comportamental das medidas lisimétrica e dos modelos SR e PM, na estimativa da ET_o	95

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1 – Modelos calibrados para estimativa da evapotranspiração de referência, para o município de Botucatu/SP, em relação ao lisímetro de pesagem

Tabela 1 – Modelos empíricos e suas características para estimativa da evapotranspiração.....	32
Tabela 2 – Coeficientes originais das metodologias empíricas.....	35
Tabela 3 – Desempenho dos modelos empíricos, originais e ajustados, na estimativa da ET_o em relação ao valor médio quantificado pelo lisímetro.....	42
Tabela 4 – Desempenho dos modelos ajustados de Bruin e Stricker, Camargo, Turc Priestley e Taylor, para períodos acumulados em relação a medida real da evapotranspiração.....	46
Tabela 5 – Índices estatísticos dos modelos empíricos (ajustados e originais) em relação a medida real da evapotranspiração (Lisímetro).....	47
Tabela 6 – Valores dos parâmetros ajustados dos modelos empíricos, para o município de Botucatu – SP, de acordo com o valor de referência (lisímetro).....	50

Capítulo 2 – Ajuste de modelos empíricos na estimativa da evapotranspiração de referência, para o município de Botucatu - São Paulo, em relação ao modelo de Penman-Monteith.

Tabela 1 – Período avaliado das variáveis meteorológicas após a calibração.....	62
Tabela 2 – Características dos modelos empíricos utilizados para estimar a evapotranspiração de referência.....	63

Tabela 3 – Análise estatística dos modelos empíricos (originais, ajustado e validação) em relação ao valor de referência Penman-Monteith (FAO 56).....	68
Tabela 4 – Análise estatística dos modelos ajustados para períodos de três, cinco e sete dias.....	69
Tabela 5 – Acurácia dos modelos empíricos (ajustados, originais e validação) em relação ao valor de referência Penman-Monteith (FAO - 56).....	72
Tabela 6 – Coeficientes ajustado dos modelos empíricos, para o município de Botucatu-SP, de acordo com o modelo de referência Penman-Monteith (FAO 56).....	77

Capítulo 3 – Eficiência do sensoriamento remoto MODIS16 na estimativa da evapotranspiração para o município de Botucatu - São Paulo

Tabela 1 – Período de coleta das variáveis meteorológicas para o estudo.....	89
Tabela 2 – Estatística descritiva da ET_o decorrentes do SR – MODIS 16, Lisímetro e PM - Penman-Monteith.....	93
Tabela 3 – Desempenho e correlação da metodologia SR em relação aos valores apresentados por PM e lisímetro.....	94
Tabela 4 – Estatística da constante K na relação SR/Lisímetro (R1) e SR/PM (R2).....	95

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	19
CAPÍTULO 1 - MODELOS CALIBRADOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA, PARA O MUNICÍPIO DE BOTUCATU/SP, EM RELAÇÃO AO LISÍMETRO DE PESAGEM.....	25
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	28
1.2.1 Local de estudo e coleta de dado.....	28
1.2.2 Modelagem matemática na estimativa da evapotranspiração.....	31
1.2.3 Desempenho estatístico dos modelos.....	39
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
1.4 CONCLUSÃO.....	52
REFERÊNCIAS.....	54
CAPÍTULO 2 - AJUSTE DE MODELOS EMPÍRICOS NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA, PARA O MUNICÍPIO DE BOTUCATU - SÃO PAULO, EM RELAÇÃO AO MODELO DE PENMAN-MONTEITH.....	58
2.1 INTRODUÇÃO.....	60
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	61
2.2.1 Área de Estudo.....	61
2.2.2 Aquisição de dados meteorológicos.....	62
2.2.3 Estimativa da evapotranspiração e ajuste dos modelos.....	63
2.2.4 Eficiência estatística dos modelos originais e ajustados.....	65
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
2.4 CONCLUSÃO.....	78
REFERÊNCIAS.....	79
CAPÍTULO 3 - EFICIÊNCIA DO SENSORIAMENTO REMOTO MODIS16 NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA O MUNICÍPIO DE BOTUCATU - SÃO PAULO.....	83
3.1 INTRODUÇÃO.....	84
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	85
3.2.1 Localidade do estudo.....	86

3.2.2	Aquisição da evapotranspiração de referência.....	86
3.2.3	Eficiência do MOD16A2 na estimativa da ET_o	92
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	93
3.4	CONCLUSÃO.....	96
	REFERÊNCIAS.....	96
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
	REFERÊNCIAS.....	101

INTRODUÇÃO GERAL

No ciclo hidrológico e no balanço hídrico do meio agrícola, a evapotranspiração é uma das variáveis mais importantes de ser analisada (RAZIELI; PEREIRA, 2013; FISHER et al., 2017). A quantificação dessa variável, permite um gerenciamento adequado dos recursos hídricos no setor agrícola, como no dimensionamento de sistema de irrigação e rendimento de uma cultura.

A evapotranspiração é um fenômeno que corresponde a perda da água, precipitada da superfície terrestre para atmosfera. Sua fundamentação está relacionada com os processos de evaporação e transpiração (FREITAS et al., 2018). A evaporação consiste em um processo físico que transforma em vapor a água contida em lagos, mares, interceptadas pelas plantas, reservatórios e superfície do solo (VIEIRA et al., 2016). Já a transpiração é processo fisiológico dos vegetais, que por meio das raízes, retiram do solo a água necessária para sua manutenção, e a transpira por meio dos estômatos (SANTOS et al., 2016).

Diversos são os fatores que influenciam na quantificação da evapotranspiração, como os fatores meteorológicos (radiação solar, a velocidade do vento, a umidade e a temperatura); as características e manejo do solo (plantio direto, capacidade de água disponível – CAD densidade do solo, densidade do plantio e espaçamento da cultura); e fatores da cultura (área foliar, albedo, altura da cultura, tipo de cultura e profundidade das raízes) (LEMOS FILHO et al., 2010)

A evapotranspiração pode ser determinada por diversas metodologias, sendo eles métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos são equipamentos instalados no solo, que requer manutenção constantemente. Esses equipamentos denominam-se em lisímetro de pesagem, lisímetro de drenagem e lisímetro de lençol freático (SANTANA et al, 2020).

O lisímetro de drenagem consiste em uma caixa com drenos em sua parte inferior, acoplado ao solo e constituído pelo mesmo solo onde está inserido. Seus drenos são ligados a um poço de coleta, onde é quantificado o volume drenado e percolada após a irrigação até a capacidade de campo (SULINO et al., 2019).

Por meio de um sistema de fornecimento de água, mantendo constante o nível do lençol freático, o lisímetro de lençol freático permite o abastecimento de água para zona radicular da cultura (DE MEDEIROS; FURUTA, 2021). Já o lisímetro de

pesagem é o mais indicado para mensurar a evapotranspiração. Sua estrutura é constituída por um tanque instalado em campo e com seu interior composto com a mesma vegetação e solo do local. A evapotranspiração é mensurada pelo balanço hídrico composto em seu dispositivo (NASCIMENTO et. al., 2016). Seu sistema utiliza células de carga acopladas em microprocessadores, o que possibilita a notificação das variações de massa durante o processo irrigação. A partir dessas variações a evapotranspiração é mensurada (PERREIRA et. al., 2013).

Apesar da ET_o determinada pelo lisímetro ser a referência, a instalação e manutenção desse equipamento se torna cara e de difícil acesso em campo. Como alternativa e substituição desse equipamento, os métodos indiretos se tornam essências na estimativa da ET_o .

Inúmeros são os modelos apresentados na literatura para essa finalidade. A maioria deles baseiam-se na temperatura, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa. Entretanto alguns modelos não são aplicados para todas as localidades, pois dependem da condição climática para qual foi desenvolvido e das variáveis disponíveis.

Os primeiros conceitos relacionados com a estimativa da evapotranspiração, utilizando a modelagem matemática, foram descritos em 1944. Utilizando dados de chuva e de escoamento hidrográfico, de diversas localidades dos Estados Unidos, Wilm et al. (1944) apresentaram uma equação que determinava a evapotranspiração potencial (ET_p). Sua fórmula baseia-se em temperatura média diária, umidade relativa do ar e fotoperíodo.

Em 1948 Thornthwaite propôs uma equação para determinar a ET_p baseado na temperatura local. Em seu trabalho o autor menciona que a ET_p indica o transporte de água para atmosfera, por meio da evaporação da superfície do solo e da transpiração da planta (THORNTHWAITE, 1948). A partir dessa metodologia, inúmeros modelos fundamentados na temperatura foram desenvolvidos, como a Blaney e Criddle (1950) e Camargo (1971).

Em Camargo et. al. (1999), foi apresentado uma modificação no modelo Thornthwaite. A variável temperatura foi substituída por uma temperatura efetiva (T_{ef}), que está relacionada com a amplitude térmica e temperatura média. Já o modelo de Camargo (1971) é uma simplificação do modelo de Thornthwaite (1948). Em sua metodologia está empregada a radiação solar extraterrestre e a temperatura

média do período. Sua aplicação é para período mensal e condições de clima úmido.

Modelos que relacionam radiação atmosférica também foram desenvolvidos. Um exemplo é a equação de Priestley e Taylor (1972), que foi gerada a partir de dados de superfícies saturadas e de locais onde ausência de advecção era predominante. O autor considerou, em sua metodologia, apenas o saldo de radiação, corrigido por um coeficiente.

A maioria dos modelos que utilizam radiação é uma simplificação da equação de Penman (1948), onde este apresenta uma equação que é fundamentada nos métodos aerodinâmico e razão de Bowen. Em sua fórmula, Penman também substituiu diferenças de medidas obtidas em duas alturas, por déficits em uma única altura.

Anos mais tarde, Monteith (1965) propôs um novo modelo utilizando a equação de Penman (1948) para estimar a evapotranspiração de cultura. O autor inclui a resistência da superfície da vegetação, relacionado com a transferência de água para atmosfera em forma de vapor, e a resistência do ar sobre o vapor d'água e o calor sensível. Com essas alterações o método ficou conhecido como Penman-Monteith (CARVALHO, et al. 2011; SEDIYAMA, 1996).

Em 1977, o conceito de evapotranspiração de referência (ET_o) foi inserido por meio da publicação do documento da FAO nº 24 (Food and Agriculture Organization of the United Nations). O termo ET_p foi substituído por ET_o e definiu uma relação entre os termos ET_o e ET_c por meio do coeficiente de cultura (K_c) (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

Esse mesmo documento apresentou uma modificação do modelo de Blaney e Criddle (1950) para estimativa da evapotranspiração. Foi inserido um fator de correção, facilitando sua aplicação em diversas condições climáticas. Anos mais tarde houve uma nova modificação no modelo de Blaney e Criddle, onde os autores Frevert, Hill e Braaten (1983), inseriram equações que substituíram a utilização de nomogramas e interpolações na estimativa da ET_o .

Apesar dos modelos empíricos serem desenvolvidos especificamente para uma determinada características climáticas, estes podem ser ajustados localmente, de forma a melhorar sua eficiência (Barros, et al., 2019). Neste caso, a implementação computacional e a modelagem matemática se fazem necessários. O ajuste dos coeficientes das equações pode ser realizado por diversos conceitos matemáticos,

como o método Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) que faz parte do pacote solver do software Excel (COSTA et al., 2019).

O método GRG é utilizado para encontrar soluções de problemas de otimização não lineares, de forma a utilizar em seu processo os gradientes das restrições da função objetivo, matriz Jacobiana, multiplicadores de Lagrange e o método de Newton (CARNEIRO et al., 2005). De acordo com os autores Luenberger e Ye (2008), o GRG é um dos métodos mais eficientes na otimização de questões não lineares, pois não é dependente da convexidade da função e garante um ponto ótimo mesmo que o processo termine antes de encontrar uma solução adequada.

Embora haja diversas metodologias na literatura, recomenda-se aplicabilidade do modelo de Penman-Monteith parametrizado e descrito no manual da FAO-56, como referência na estimativa da *ET_o* (OLIVEIRA; SILVA; DE OLIVEIRA RAMOS, 2020). Sua metodologia foi configurada para expressar a evapotranspiração de referência em mm.dia⁻¹, onde os valores do fluxo do calor no solo e do saldo de radiação foram integrados ao longo de 24 horas, a escala de tempo da radiação foi transformada de segundo para dia, e variáveis velocidade do vento é obtida em apenas uma altura (ALLEN et. al. 1998; PERREIRA et al. 2013).

Mesmo que o modelo de Penman-Monteith (FAO-56) seja a referência na estimativa da *ET_o*, entre os modelos matemáticos, bem como a utilização de equipamentos adequados, novas metodologias vêm obtendo espaço no setor agrícola. Exemplo dessas metodologias é a implementação do sensoriamento remoto para estudos agrometeorológicos. Por disponibilizar imagens e banco de dados gratuitamente em ambientes virtuais, a estimativa da *ET_o* por meio de satélite torna-se acessível para pequenos e grandes produtores (SILVA; MANZIONE.; TEIXEIRA, 2021; JÚNIOR et al., 2021).

Aplicabilidade do sensoriamento remoto com base de dados agrometeorológicos e em diferentes escalas espaciais, pode auxiliar o manejo dos recursos hídricos na agricultura irrigada, nos impactos ambientais gerados pela agricultura, o monitoramento de água em grande escala e os impactos providos das mudanças climáticas (SILVA; MANZIONE.; TEIXEIRA, 2018).

Ampla são as plataformas que disponibilizam banco de dados espaciais por sensoriamento remoto. No entanto poucas são as plataformas que concedem de forma gratuitas tais informações, como o caso da plataforma Google Earth Engine (GEE). A plataforma GEE pode oferecer imagens de satélite com mais de 50 anos

de dados, com processamento em escala global. Possibilita a manipulação do algoritmo de programação e das imagens disponibilizadas, bem como o download dos resultados de pesquisa. Em seu sistema o usuário pode obter dados de áreas irrigada, índice de vegetação, reflectância da superfície terrestre e aquática, entre outros benefícios (CARVALHO; MAGALHÃES FILHO; DOS SANTOS, 2021).

A estimativa da evapotranspiração por meio da plataforma GEE, pode ser obtida através do produto MOD16A2 na versão 6. Seu sistema é integrado com outros satélites para aquisição de dados meteorológicos, que são necessários para a execução de seu algoritmo (TITO et al. 2020).

Dependendo do algoritmo que compõe a programação do satélite, a estimativa pode ser realizada por meio de equações empíricas ou por resíduos do balanço de energia na superfície. (MOREIRA et. al., 2019; ALLEN; TASUMI; TRESSA, 2007).

No caso do modelo MOD16A2, a ET_o é estimada com base na equação de Penman-Monteith, com resolução espacial de 500 metros e medidas para período anuais ou de 8 dias (OLIVEIRA et al., 2020).

Diante do evidenciado, o presente trabalho está dividido em três capítulos, visando a calibração local dos modelos empíricos, para estimativa da evapotranspiração de referência, de acordo com as condições climáticas do município de Botucatu/SP, bem como compará-los com os modelos de referência (lisímetro e equação de Penman-Monteith (FAO)). Será avaliado conjuntamente a eficiência do sensoriamento remoto MODIS 16 na estimativa da ET_o , em relação aos modelos de referência.

O primeiro capítulo apresenta os resultados em três etapas. A primeira compara o desempenho dos modelos empíricos originais em estimar a evapotranspiração, em relação ao valor do lisímetro de pesagem (modelo de referência/medida real). A segunda etapa apresenta um ajuste local para cada modelo empírico, comparando-os com a medida real. Já a terceira etapa verifica, para os modelos empírico que não apresentaram eficiência na estimativa da ET_o diária, a precisão para períodos acumulativos de três, cinco e sete dias.

O segundo capítulo, similar ao primeiro, descreve a eficiência e o ajuste local dos modelos empíricos, com relação ao modelo indicado no manual da FAO-56, Penman-Monteith (Allen et. al. 1998). A falta de um lisímetro em campo, para realização de estudos da evapotranspiração, implica na necessidade utilizar equações que possam estimar com eficiência a ET_o . Neste caso recomenda-se

utilizar como referência a equação descrita pela FAO 56, pois em seu desenvolvimento envolve componentes aerodinâmicos e energéticos, sendo assim o mais completo para estimativa da ET_o . Também será apresentado a eficiência dos modelos ajustados, para estimar da ET_o em escalas de tempo maiores que a diária.

O terceiro capítulo demonstra o desempenho do sensoriamento remoto em estimar a ET_o , para o município em estudo, em relação aos valores apresentado pelo lisímetro e a equação Penman-Monteith (FAO/56).

CAPÍTULO 1

MODELOS CALIBRADOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA, PARA O MUNICÍPIO DE BOTUCATU/SP, EM RELAÇÃO AO LISÍMETRO DE PESAGEM

ANA CLÁUDIA MARASSÁ ROZA BOSO, ALEXANDRE DAL PAI

Resumo: O objetivo deste capítulo é ajustar as equações de Thornthwaite, Blaney e Criddle, Makkin, Camargo, Turc, Jensen e Haise, Priestley-Taylor, Linacre, Tomar e O'toole, Hargreaves e Samani, Abtew, Thornthwaite modificado por Camargo, e Bruin e Stricker, para estimar a evapotranspiração de referência para o município Botucatu-SP. Para isso foi realizado a calibração dos coeficientes dos modelos empíricos, com dados meteorológicos dos anos de 2017 a 2020. A calibração ocorreu por meio de técnica de otimização GRG (Gradiente Reduzido Generalizado), que buscou minimizar o valor do erro absoluto médio. A eficiência dos modelos originais e ajustados foi definida com a comparação de seus valores estimados, com o valor medido com o lisímetro. Também foi realizada a validação dos modelos, por meio da técnica de amostragem simples. O modelo de Penman-Monteith também foi avaliado em relação ao valor de referência (lisímetro). Os resultados demonstram que modelos originais, Thornthwaite e Penman-Monteith, na escala mensal, apresentaram valores superiores de 15,52% e 10,81% respectivamente, sobre a ET_o em relação ao valor de referência. Na escala diária o modelo original de Tomar e O'toole subestimou a ET_o em 52,79%. Já o modelo de Penman-Monteith obteve a maior correlação com o valor de referência, $r = 0,81$. Após o ajuste dos modelos, verificou-se que apenas os valores obtidos nos modelos de Turc, Camargo, Bruin e Stricker e Priestley-Taylor apresentaram diferença significativa entre as médias, quando comparado ao valor do lisímetro. Neste caso foi verificada a eficiência dos modelos para agrupamento da ET_o em 3, 5 e 7 dias. Em todos os períodos, todos modelos apresentaram valores da ET_o próximo ao valor de referência, com alta correlação e eficiência. Na validação dos modelos ajustados, as equações Bruin e Stricker e Priestley-Taylor subestimaram a ET_o para o período diário. Para o período mensal, o modelo de Thornthwaite superestimou em 18% a ET_o .

Palavras-chave: modelagem; calibração; evapotranspiração; lisímetro; eficiência.

**MODELS CALIBRATED TO ESTIMATE THE REFERENCE
EVAPOTRANSPIRATION, FOR THE MUNICIPALITY OF BOTUCATU/SP, IN
RELATION TO THE WEIGHING LYSIMETER**

ANA CLÁUDIA MARASSÁ ROZA BOSO, ALEXANDRE DAL PAI

Abstract: The purpose of this chapter is to fit the equations of Thornthwaite, Blaney and Criddle, Makkin, Camargo, Turc, Jensen and Haise, Priestley-Taylor, Linacre, Tomar and O'toole, Hargreaves and Samani, Abtew, Thornthwaite modified by Camargo, and Bruin and Stricker, to estimate the reference evapotranspiration for the city of Botucatu-SP. For this, the calibration of the coefficients of the empirical models was carried out, with meteorological data from the years 2017 to 2020. The calibration was performed using the GRG (Generalized Reduced Gradient) optimization technique, which sought to minimize the value of the mean absolute error. The efficiency of the original and adjusted models was defined by comparing their estimated values with the value measured with the lysimeter. Models were also validated using the simple sampling technique. The Penman-Monteith model was also evaluated in relation to the reference value (lysimeter). The results show that the original models, Thornthwaite and Penman-Monteith, in the monthly scale, presented higher values of 15.52% and 10.81% respectively, on the ET_o in relation to the reference value. On the daily scale, the original model by Tomar and O'toole underestimated the ET_o by 52.79%. The Penman-Monteith model obtained the highest correlation with the reference value, $r = 0.81$. After adjusting the models, it was verified that only the values obtained in the Turc, Camargo, Bruin and Stricker and Priestley-Taylor models showed significant difference between the means, when compared to the lysimeter value. In this case, the efficiency of the models for grouping the ET_o in 3, 5 and 7 days was verified. In all periods, all models presented ET_o values close to the reference value, with high correlation and efficiency. In validating the adjusted models, the Bruin and Stricker and Priestley-Taylor equations underestimated the ET_o for the daily period. For the monthly period, the Thornthwaite model overestimated the ET_o by 18%.

Key-words: modeling; calibration; evapotranspiration; lysimeter; efficiency.

1.1 INTRODUÇÃO

A matemática é a ciência que ao longo dos anos, vem influenciando os avanços de diversos fenômenos mundiais. Esta área é subdividida em várias esferas, que permitem abertura de novos caminhos e ampliação dos saberes. (SILVA, SILVEIRA (2020); BASSANEZI (2002). A interdisciplinaridade dos conceitos matemáticos, nas demais áreas do conhecimento, possibilita aplicar a modelagem matemática na descrição de modelos em diversas situações do cotidiano.

Observando a introdução dos conceitos matemáticos na área da agricultura irrigada, inúmeros são os modelos que são aplicados na estimativa de medidas, que influenciam na produtividade e qualidade das culturas. Exemplo de variável é a evapotranspiração de referência (ET_o). Seu princípio está relacionado com os processos de evaporação e transpiração, que envolve todo crescimento da planta (OLIVEIRA; SILVA; RAMOS, 2020; PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013). A sua quantificação pode ser obtida através de método direto (lisímetro) ou estimada por modelos matemáticos (COUTINHO et al. 2020).

O lisímetro de pesagem é o equipamento mais apropriado para aquisição da evapotranspiração. Seu sistema é desenvolvido para simular o crescimento das culturas em condições reais de campo. No entanto, devido ao custo de aquisição e manutenção serem elevados, este equipamento é mais utilizado para área de pesquisas e testes (MARTINS et al., 2019; FERNANDES; PAIVA; ROTUNNO FILHO, 2012).

Muitos autores associam a utilização do lisímetro com a modelagem matemática, como forma de verificar a eficiência ou calibrar modelos empíricos para estimativa da ET_o (FENNER et al. 2019). Dentre os modelos existentes na literatura, o modelo de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) é a referência na agricultura irrigada.

Indicado pelo manual da FAO 56 (Food and Agriculture Organization of the United Nations) como modelo padrão e por combinar os conceitos aerodinâmicos e balanço de energia em sua metodologia, este pode ser aplicado para todas as localidades e condições climáticas. Apesar de ser um modelo robusto, Penman-Monteith requer variáveis que nem sempre estão disponíveis em campo para o produtor (CAMARGO e CAMARGO 2000, SANTOS et al., 2016). Para esses casos, a utilização de modelos simplificados, com poucas variáveis em sua metodologia, se torna uma alternativa (CARVALHO et al., 2011).

A utilização de modelos simplificados na estimativa da ET_o , requer algumas premissas. Nem todos os modelos podem ser empregados para todas as localidades, pois as condições climáticas do local são fatores predominantes em sua aplicabilidade. Alguns modelos foram desenvolvidos para condições de clima úmido, que é o caso dos modelos de Thornthwaite (1948), Makkink (1957), Turc (1961), Tomar e O'toole (1980), Camargo (1971), Bruin e Stricker (2000) e Abtew (1996). Já os modelos Blaney-Criddle (1950), Jensen e Haise (1963), Priestley-Taylor (1972), Hargreaves-Samani (1985), Linacre (1977) e Camargo et al. (1999), foram desenvolvidos para estimar a ET_o para condições de aridez.

No entanto aplicação desses modelos pode ser atrelada a calibração local, por meio de medidas estatísticas. Através dessas medidas é possível verificar a precisão dos modelos, bem como identificar qual modelo se adequa para as variáveis meteorológicas disponíveis no local (SOUZA et al., 2011; CARVALHO et al., 2015). Segundo Sales et al. (2018), a calibração dos modelos possibilita a redução dos índices que mensuram o erro da estimativa da ET_o , e aumenta os valores do índice de concordância (d), em comparação com o valor de referência.

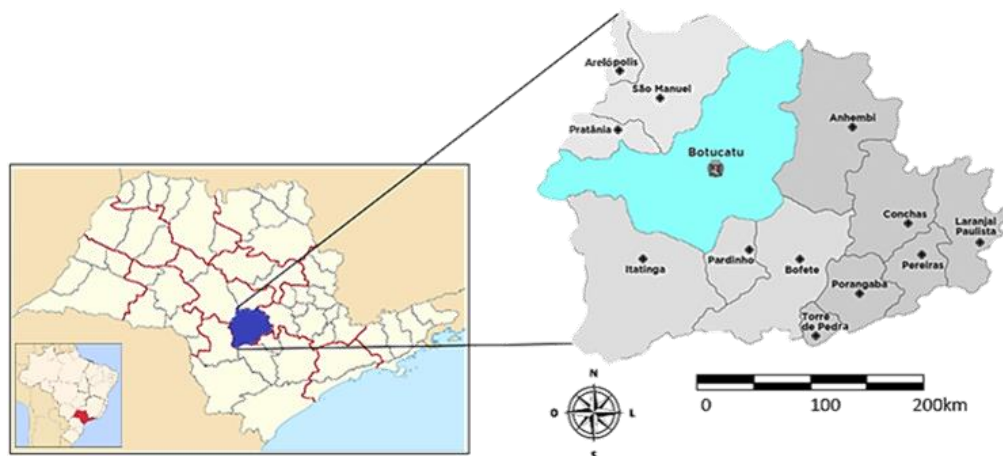
Pautado na importância da ET_o na agricultura em geral, o presente trabalho objetiva ajustar localmente os coeficientes dos modelos empíricos e avaliar a eficiência destes, em estimar a evapotranspiração para o município de Botucatu-SP, bem como compará-los com a referência quantificada pelo lisímetro de pesagem.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Local de estudo e coleta de dado

A estimativa da evapotranspiração foi realizada para as condições climáticas do município de Botucatu/SP, que está localizado a 22°50' Sul, 48°25' Oeste e 786 m de altitude (Figura 1). De acordo com o critério de Köppen e Geiger (1928), o clima da cidade de Botucatu é classificado em Cwa, mesotérmico (temperado quente), com verão quente e úmido (dezembro-fevereiro) e inverno seco (junho-agosto) (ESCOBEDO et al., 2011).

Figura 1 – Localização da região de estudo, município de Botucatu, no mapa do estado de São Paulo



Fonte: Compilação do autor

De acordo com Escobedo et al. (2009), a temperatura média e a umidade relativa do ar no verão é de 22,7 °C e 78,2%. Já no inverno esses valores são 17,6 °C e 67,3%, respectivamente. O ciclo de chuva anual da cidade é definido em dois períodos: seco (abril-setembro) e chuvoso (outubro-março). Aproximadamente 80% da precipitação anual ocorre durante as estações verão e primavera, com máxima de 246,2 mm para o mês de janeiro. Já a precipitação mínima ocorre na estação seca, com 36,1 mm para o mês de agosto.

A aquisição dos dados foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa foram obtidas as medidas reais da evapotranspiração, por meio do lisímetro de pesagem (Figura 2), que está instalado na Estação Evapotranspirométrica do Departamento de Bioprocessos da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Câmpus de Botucatu/SP.

O terreno da Estação Meteorológica e tanque do lisímetro são estruturados de acordo com as recomendações da World Meteorological Organization e da FAO (Food and Agriculture Organization). Ambos são cobertos por grama, com plena capacidade hídrica, sem escassez nutricional e sem ocorrência de doenças.

As variáveis meteorológicas utilizadas foram: radiação solar global, radiação extraterrestre, radiação líquida, velocidade do vento a 2 metros do nível do solo, umidade relativa a 2 metros do nível do solo (mínima e média), temperatura (mínima, média e máxima) e fotoperíodo (período de brilho solar em um dia). Todas as medidas foram obtidas na escala diária e mensal.

Figura 2 – Estação Evapotranspirométrica da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP



Fonte: Autor.

O período de coleta dos dados foi entre 01 de março de 2017 e 2020 de junho de 2020, totalizando 1321 dias. Devido a sensibilidade do equipamento para o excesso de pluviosidade e manutenção dos equipamentos, foi realizada a calibração dos dados, com retirada de períodos que os equipamentos não registram mediadas meteorológicas ou mensuraram valores abaixo do esperado. Após essa análise, obteve-se 812 dias de dados para o estudo, um valor de 61% do total dos dados observados.

A segunda etapa foi estimar a evapotranspiração por meio de modelos empíricos e combinado, com dados obtidos pelas estações meteorológica e radiométrica, situadas no interior da Faculdade de Ciências Agronômicas (Figura 3).

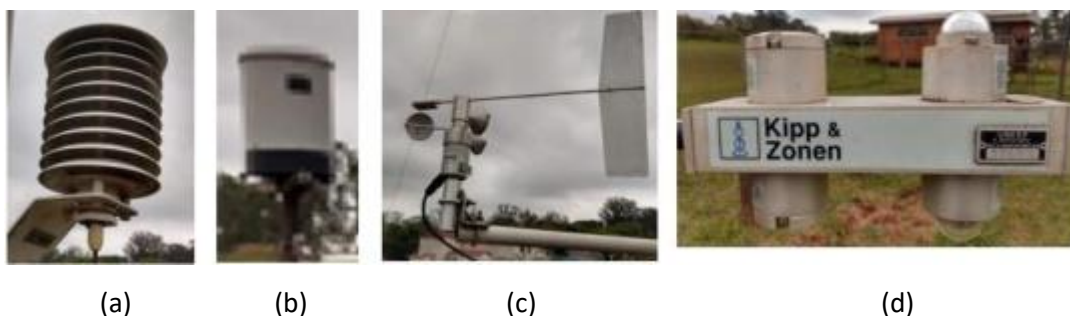
Os valores da temperatura e umidade relativa do ar foram mensurados por meio de um sensor da marca Vaisala, tipo HMP45C. A precipitação foi medida pelo pluviômetro da Hydrological Services America, do tipo TB3 Siphon Tipping Bucket Rain Gauge. A velocidade do vento foi mensurada através de um anemômetro da Campbell Scientific Inc, do tipo 034^a-LMet One Wind Set. As variáveis envolvendo radiação foram obtidas com o saldo-radiômetro da marca Kipp & Zonen, modelo CNR1 Net Radiometer. A Figura 4 apresenta os equipamentos das estações meteorológica e radiométrica.

Figura 3 - Estações meteorológica e radiométrica da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP



Fonte: Autor

Figura 4 – Equipamentos de monitoramentos das estações meteorológica e radiométrica da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP: (a) Sensor de temperatura e umidade do ar; (b) Pluviômetro; (c) Anemômetro; (d) Saldo radiômetro.



Fonte: Autor

Todos os dados coletados com os equipamentos, são armazenados com médias a cada 5 minutos, por um datalogger da marca Campbell CR1000 e frequência de 0,2 Hz.

1.2.2 Modelagem matemática na estimativa da evapotranspiração

A modelagem matemática aplicada na evapotranspiração ocorreu em três etapas: A primeira etapa foi estimar a ET_o por 14 modelos selecionado, sendo eles descritos na Tabela 1, com suas respectivas características. Destaca que aplicabilidade do modelo de Blaney-Criddle (1950), no presente trabalho, foi adaptado com os estudos de Frevert et al. (1983).

Tabela 1 – Modelos empíricos e suas características para estimativa da evapotranspiração

Metodologia	Equação	Variáveis	Local	Zona Climática	Calendário
Thornthwaite (1948)	$ET_0 = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T_n}{I} \right)^a$	(T_n) Temperatura média do mês; (I) Índice de calor em função do tempo; (a) Índice em função de I .	EUA (Dfb, Bsh, Dfa, Csc, Cwb e Bsk)* República Dominicana (Aw e Am)*	Úmido	Mensal
Makkink (1957)	$ET_0 = 0,61 \cdot R_s \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) - 0,12$	(R_s) Radiação solar global; (γ) Coeficiente psicométrico; (Δ) Tangente à curva da pressão de saturação do vapor d'água.	Wageningen, Holanda (Cfb)*	Úmido	Diário
Turc (1961)	$ET_0 = a_t \cdot 0,013 \cdot \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right) \left(\frac{\frac{R_s}{0,0238846} + 50}{\lambda} \right)$	(R_s) Radiação solar global; (T_{Med}) Temperatura média do ar.	Oeste Europeu	Úmido	Diário
Jensen e Haise (1963)	$ET_0 = R_s (0,025 \cdot T_a + 0,078)$	(T_a) Temperatura média do ar; (R_s) Radiação solar global.	Davis, CA, EUA (Csa)*	Árido e semiárido	7 a 10 dias
Camargo (1971)	$ET_0 = 0,01 \cdot Q_o \cdot T_{Med} \cdot ND$	(Q_o) Irradiância solar extraterrestre; (T_{Med}) Temperatura média do ar; (ND) Número de dias.	Várias localidades	Úmido	10 dias / Mensal

Priestley-Taylor (1972)	$ET_o = 1,26 \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G)$	(R_n) Radiação líquida; (G) Fluxo de calor no solo; (γ) Coeficiente psicométrico; (Δ) Tangente à curva da pressão de saturação do vapor d'água.	Austrália e Estados Unidos	Semiárido	Diário
Linacre (1977)	$ET_o = \frac{500 \cdot \frac{(T+0,006Z)}{(100-A)} + 15(T - T_d)}{80 - T}$	(T_d) Temperatura no ponto de orvalho; (T) Temperatura média diária.	Austrália e sul da África	Temperado, seco e quente	Diário
Tomar e O'toole (1980)	$ET_o = 0,9 + 0,0115 \cdot R_s$	(R_s) Radiação solar global	Sul e sudeste da Ásia (Cfa)*	Úmido	Diário
Blaney-Criddle 950)	$ET_o = a + b \cdot p(0,46 \cdot T_{med} + 8,13)$	(T_{med}) Temperatura média do mês; (p) Porcentagem do total de fotoperíodo médio mensal sobre o total do fotoperíodo anual (a) Índice relacionado com a umidade relativa do ar; (b) Índice relacionado com a umidade relativa do ar e vento.	Novo México (Bsk)* Texas - EUA (Cfa)*	Semiárido Árido	Mensal
Hargreaves-Samani (1985)	$ET_o = 0,0023 \cdot Q_o \cdot (T_{máx.} - T_{mín.})^{0,5} (T_{med} + 17,8)$	(Q_o) Irradiância solar no topo da atm; (T) Temperatura do ar.	Davis, CA, EUA (Csa)*	Árido e semiárido	Diário

Abtew (1996)	$ET_o = 0,53 \cdot \frac{R_s}{\lambda}$	(R_s) Radiação solar global	Sul da Flórida, EUA (Am)*	Úmido	Diário
Camargo et al. (1999)	$ET_o = 16 \cdot \left\{ \frac{10 \cdot [0,36 \cdot (3 \cdot T_{max} - T_{min})]}{I} \right\}^a$	(T_{max}) Temperatura máxima do mês; (T_{min}) Temperatura mínima do mês; (I) Índice de calor em função do tempo; (a) Índice em função de I .	Várias localidades	Árido e superúmido	Mensal
Bruin e Stricker (2000)	$ET_o = 0,86 \cdot \left(\frac{R_n}{\lambda} \right)$	(R_n) Radiação líquida; (λ) Calor latente.	Holanda Oriental	Úmido	Diário
nman-Monteith (FAO 1998)	$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \left[\frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{T_{med} + 273} \right]}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)}$	(R_n) Radiação líquida; (G) Fluxo de calor no solo; (γ) Coeficiente psicométrico; (Δ) Tangente à curva da pressão de saturação do vapor d'água; (U_2) Velocidade do vento a 2 m de altura; (e_s) Pressão de vapor na saturação; (e_a) Pressão de vapor atual; (T_{med}) - Temperatura média do ar.	Todas	Todas	Diário

Legenda: ET_o (mm dia⁻¹/mm.mês⁻¹), U_2 (m.s⁻¹), γ (kPa °C⁻¹); Δ (kPa °C⁻¹), e_s (kPa), e_a (kPa), T_{med} (°C), R_n (MJ.m⁻².dia⁻¹), G (MJ.m⁻².dia⁻¹), R_s (MJ.m⁻².dia⁻¹), I (adimensional), a (adimensional), Q_o (MJ.m⁻².dia⁻¹).

A Tabela 2 apresenta os coeficientes que serão ajustados, de cada metodologia na estimativa da ET_o , para o município de Botucatu/SP.

Tabela 2 – Coeficientes originais das metodologias empíricas de período mensal e diário

Metodologia / Mensal	Equação	Coeficientes
Thornthwaite (1948)	$ET_0 = x \cdot \left(\frac{y \cdot T_n}{I} \right)^a$	$x = 16$ $y = 10$
Blaney-Criddle (1950)	$ET_0 = a + b \cdot p(x \cdot T_{med} + y)$	$x = 0,46$ $y = 8,13$
Camargo et al. (1999)	$ET_0 = x \cdot \left\{ \frac{y \cdot [z \cdot (t \cdot T_{max} - T_{min})]}{I} \right\}^a$	$x = 16$ $y = 10$ $z = 0,36$ $t = 3$
Metodologia / Diário	Equação	Coeficientes
Makkink (1957)	$ET_0 = x \cdot R_s \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) - y$	$x = 0,61$ $y = 0,12$
Turc (1961)	$ET_0 = a_t \cdot x \cdot \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + y} \right) \left(\frac{\left(\frac{R_s}{z} + w \right)}{\lambda} \right)$	$x = 0,013$ $y = 15$ $z = 0,0238846$ $w = 50$
Jensen e Haise (1963)	$ET_0 = R_s (x \cdot T_a + y)$	$x = 0,025$ $y = 0,078$
Camargo (1971)	$ET_0 = x \cdot Q_o \cdot T_{Med} \cdot ND$	$x = 0,01$
Priestley e Taylor (1972)	$ET_0 = x \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G)$	$x = 1,26$

Linacre (1977)	$ET_o = \frac{\frac{x \cdot (T+w \cdot Z)}{y-A} + t \cdot (T + T_d)}{v - T}$	$x = 500$ $y = 100$ $v = 80$ $t = 15$ $w = 0.006$
Tomar e O'toole (1980)	$ET_o = x + y \cdot R_s$	$x = 0,9$ $y = 0,0112$
Hargreaves e Samani (1985)	$ET_o = x \cdot Qo \cdot (T_{\text{máx.}} - T_{\text{mín.}})^z (T_{\text{med}} + y)$	$x = 0,0023$ $y = 17,8$ $z = 0,5$
Abtew (1996)	$ET_o = 0,53 \cdot \frac{R_s}{\lambda}$	$x = 0,53$
Bruin e Stricker (2000)	$ET_o = x \cdot \left(\frac{R_n}{\lambda} \right)$	$x = 0,86$

A segunda etapa foi ajustar os coeficientes dos modelos empíricos para as condições climáticas do município de estudo. Para isso utilizou-se o pacote solver que está incorporado ao software Excel 2016®, da Microsoft Office. No processo buscou-se, como função objetivo, minimizar o erro médio absoluto (MAE) entre a ET_o estimada e o valor medido do lisímetro de pesagem. Após a definição da função objetivo, aplicou-se o ajuste com o comando GRG (Gradiente Reduzido Generalizado) não linear do pacote solver.

O método GRG combina os conceitos do método gradiente reduzido com os métodos de linearização das restrições não lineares. A descrição para um problema não linear é apresentada da seguinte maneira (MOUATASIM; ELLAIA; CURSI, 2014):

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{minimizar} & f(\vec{x}) \\ \text{sujeito a} & g_k(\vec{x}) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, m) \\ & h_j(\vec{x}) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \\ & a_i \leq x_i \leq b_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{array} \right. \quad (1)$$

onde $f(\vec{x})$ é a função objetivo; $g_k(\vec{x})$ e $h_j(\vec{x})$ são as restrições e $\vec{x}$ é um vetor que representa as variáveis no processo. Os valores de a_i e b_i representam os limites inferiores e superiores respectivamente no algoritmo.

O processo de otimização ocorre, primeiramente transformando as restrições no formato de inequações para restrições de igualdade, com a introdução de variáveis de folga não negativas. Com o vetor $\vec{x}$ composto por variáveis de folga e originais do problema, pode-se escrever o vetor na seguinte forma (FACÓ; OLIVEIRA, 2003):

$$\vec{x} = \begin{Bmatrix} z \\ y \end{Bmatrix} \quad (2)$$

com o vetor z representando as variáveis independentes e y o vetor das variáveis dependentes.

Em seguida é determinada a derivada parcial da função objetivo, sobre às variáveis independentes no ponto inicial. Nessa etapa é gerada a matriz Jacobiana que calcula a direção do melhor ponto (SACOMAN, 2012).

$$df(\vec{x}) = \nabla_z f(\vec{x}).dz + \nabla_y f(\vec{x}).dy \quad (4)$$

$$dh_j(\vec{x}) = \nabla_z h_j(\vec{x}).dz + \nabla_y h_j(\vec{x}).dy \quad (j = 1, \dots, m + m_i) \quad (5)$$

com $h_j(\vec{x}) = 0$ representando as restrições na forma de igualdade e fazendo $A = \nabla_z h_j(\vec{x})$ e $B = \nabla_y h_j(\vec{x})$, considera-se

$$dh(\vec{x}) = A.dz + B.dy \quad (6)$$

como $dh(\vec{x}) = 0$ independente da variação de dz , dy pertence às variáveis dependentes. Assim tem-se que:

$$dy(\vec{x}) = -(B^{-1}).A.dz \quad (7)$$

realizando a substituição da equação 7 em 4, obtém-se:

$$df(\vec{x}) = \nabla_z f(\vec{x}).dz - \nabla_y f(\vec{x}).[B^{-1}A]dz \quad (8)$$

A Equação 8 pode também ser escrita na forma da Equação 9, sendo está a representação do gradiente reduzido generalizado (GRG). A direção de procura do ponto ótimo corresponde o valor negativo do resultado do GRG.

$$GRG = df(\vec{x}) = \{\nabla_z^T f(\vec{x}) - \nabla_y f(\vec{x})^T \cdot [B^{-1}A]\}dz \quad (9)$$

Portanto o algoritmo do método GRG resume em:

- I. Escolher uma solução inicial;
- II. Transformar todas as restrições em igualdades e determinar as variáveis independentes e dependentes;
- III. Calcular a matriz Jacobiana de $dh_j(\vec{x})$, satisfazendo a hipótese de não-degenerescência.
- IV. Calcular o valor GRG;
- V. Determinar a direção do ponto d nas variáveis independentes e dependentes;
- VI. Escolher o tamanho do passo a ser dado (α_i), de tal forma que $x_{i+1} = x_i + \alpha_i d$ e que minimize $f(x_i + \alpha_i d)$.
- VII. Determinar os valores de $x_i + \alpha_i d$ para as variáveis independentes e dependentes, e encontrar um novo ponto;
- VIII. Aplicar o método de Newton para resolver um sistema com as restrições, de modo a transformar as variáveis dependentes em um ponto ótimo. Para essa etapa utilizar o ponto $x_i + \alpha_i d$, para as variáveis dependentes, como ponto inicial.
 - Caso x_{i+1} for viável e $f(x_{i+1}) < f(x_i)$, obter um novo ponto com a redução do valor de α_i ;
 - Caso x_{i+1} for viável e $f(x_{i+1}) > f(x_i)$, obter um novo ponto com aumento do valor de α_i ;
 - Caso o valor de x_{i+1} não for viável, realizar uma troca de base e retornar a etapa III.

Para aplicação do método GRG, no presente trabalho, não se utilizou de restrições durante a interação. Os valores iniciais de cada interação foram os valores originais dos coeficientes dos modelos empíricos. Salienta que não houve ajuste do

modelo de Penman-Monteith (FAO - 56), apenas utilizou-se de seu valor como análise complementar na estimativa da ET_o .

A última etapa foi realizada com o auxílio dos conceitos estatísticos, que verificou a eficiência dos modelos empíricos originais e ajustados, na estimativa da ET_o , em relação ao valor de referência (lisímetro).

1.2.3 Desempenho estatístico dos modelos

Para verificar o desempenho e qualidade dos modelos originais e ajustados, foram utilizados os seguintes indicadores estatísticos: raiz do erro quadrático médio (RMSE – Equação 1), erro médio absoluto (MAE – Equação 2), índice de Willmott (d – Equação 3), erro absoluto médio (MBE – Equação 4) e o coeficiente de correlação de Pearson (r – Equação 5):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2} \quad (3)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

em que: $\hat{y}_i$ é o valor estimado da ET_o pelos modelos empíricos; y_i é o valor obtido pelo lisímetro; $\bar{y}$ é a média dos valores da ET_o obtida pelo lisímetro; n é a quantidade de dados em dias da ET_o ; e y é a média dos valores de ET_o estimada pelos modelos empíricos.

O valor do coeficiente de Person é definido entre -1 e +1, indicando o nível de associação entre duas variáveis. O sinal de negativo, indica que as variáveis são inversamente relacionadas. Já o sinal positivo indica uma relação direta das variáveis analisadas. Quanto mais próximo ao valor 1, maior é correlação (FIALLOS, 2021).

O índice de Willmott indica o desempenho dos modelos analisados, por meio da similaridade dos valores obtidos aos de referência. Sua interpretação compreende entre os valores de 0 e 1. Quanto mais próximo de 1, maior é a exatidão do modelo (WILLMOTT, 1981).

Os valores de MAE, MBE e RMSE indicam a incerteza dos modelos. Quanto mais próximo seus valores forem de zero, melhor é o desempenho dos modelos analisados. O valor de MBE descreve o desvio das médias, com valores positivos indicando superestimativa e valores negativos à subestimativa dos dados. No entanto um valor negativo cancela um valor positivo (TERAMOTO et al., 2020). Sem obter valores negativos, o MAE é a diferença absoluta média entre os dados observados e estimados. Sua vantagem está em não sofrer alterações em seu resultado, devido a outlier nos valores analisados (MARINHO et al., 2022)

Já o índice RMSE poder obter valores significativos em sua magnitude, devido a sua sensibilidade com outlier. Entretanto é considerado um excelente indicador de desempenho (ULIANA et al. 2020).

Devido os dados não apresentarem normalidade e homocedasticidade, a comparação entre as medianas foi realizada por meio do teste não paramétrico Mann-Whitney (Equação 6). Esse teste determina o valor de U para cada amostra.

O teste é interpretado de acordo com a quantidade de cada amostra. Para $n < 20$, utiliza o menor valor dos Us determinado e verifica com um ponto crítico tabelado. Caso o valor de U for menor que o ponto tabelado, rejeita-se a hipótese nula (VIEIRA, 2010). Para $n > 20$, utiliza-se o teste z (Equação 7)

$$\begin{cases} U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1 \\ U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - R_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$z = \frac{U - \mu_U}{\sigma_U} \quad (7)$$

onde n_1 é o número de casos do grupo 1, n_2 representa o número de casos do grupo 2, R indica a soma de postos de cada grupo, μ_U indica a média de U e σ_U representa o desvio padrão de U.

Para validar os modelos ajustados, primeiramente utilizou-se a técnica de amostragem aleatória simples para selecionar os meses e dias a serem utilizados.

Nos modelos mensais foi extraída uma amostra de 12 meses, para uma população de 30 meses, 40% do total. A escolha por 12 meses se dá ao fato do modelo de Thornthwaite necessitar em seu cálculo 12 períodos. Para os modelos diários, obteve-se uma amostra de 365 dias para uma população de 812, uma representatividade de 45% do total.

A validação também foi realizada para os modelos agrupados, com períodos de 3, 5 e 7 dias. Nestes casos também foi extraída uma amostra de 365 dias e agrupada de acordo com o período analisado.

Após a seleção das amostras foram aplicados novamente o teste não-paramétrico de Mann-Whitney, o coeficiente de correlação de Pearson (r) e índice de Willmott (d).

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analizando os resultados estatísticos, dos modelos originais na estimativa da ET_o , verifica-se a necessidade de realizar a calibração local desses modelos. Neste sentido a Tabela 3 apresenta as médias diárias e mensais da ET_o dos modelos originais e ajustados, bem como a validação dos modelos ajustados.

Verificando primeiramente os modelos originais, de período mensal, nota-se que todos os modelos apresentaram valores superiores da ET_o , em relação ao lisímetro. Os modelos de Blaney-Criddle e Camargo-1999 superestimaram em 100,66% e 144,49% respectivamente. Isso deve-se ao fato dos modelos serem desenvolvidos para regiões de clima árido.

Já o modelo Thornthwaite apresentou uma diferença superior de apenas 15,52% sobre o valor de referência, pois suas características são aplicadas para regiões de clima úmido. Também foi observado que o modelo Penman Monteith/FAO 56 obteve pouca diferença da ET_o sobre o valor medido, com valor superior em 10,81%.

Em relação aos modelos originais de período diário, apenas o modelo Tomar e O'toole indicou valor abaixo da ET_o em 52,79%, em comparação ao valor de referência. Os demais modelos apresentaram valores superiores. Os modelos Jensen e Haise, Linacre, Makkink e Hargreaves-Samani, apresentaram uma diferença de 90,55%, 37,76%, 36,91% e 63,09% respectivamente.

Tabela 3 – Desempenho dos modelos empíricos originais, ajustados e validação, na estimativa da *ET_o* em relação a medida real (Lisímetro)

Metodologia (mm.mês ⁻¹)	Original				Ajuste				Validação			
	$\bar{X}$	M_e	σ	p	$\bar{X}$	M_e	σ	p	$\bar{X}$	M_e	σ	p
Thornthwaite (1948)	72,78	67,38	26,11	0,160	95,71	59,67	23,67	0,675	74,72	71,61	32,09	0,710
Blaney-Criddle (1950)	126,41	123,15	33,04	0,000*	90,81	54,45	23,06	0,731	52,82	57,26	22,92	0,290
Camargo et al. (1999)	152,14	159,87	59,91	0,000*	59,67	60,14	23,25	0,603	61,49	64,08	19,37	1,022
Penman Monteith/FAO 56	69,81	64,83	26,43	0,000*	-	-	-	-	-	-	-	-
Lisímetro**	63,00	60,28	26,04	-	-	-	-	-	63,32	-	-	-
Metodologia (mm.dia ⁻¹)	Original				Ajuste				Validação			
	$\bar{X}$	M_e	σ	p	$\bar{X}$	M_e	σ	p	$\bar{X}$	M_e	σ	p
Makkink (1957)	3,19	3,10	1,13	0,000*	2,21	2,14	0,80	0,954	2,33	2,28	0,73	0,058
Turc (1961)	2,45	2,37	0,82	0,000*	2,39	2,30	0,85	0,002*	2,46	2,38	0,81	0,098
Jensen e Haise (1963)	4,44	4,16	1,75	0,000*	2,29	2,13	1,02	0,635	2,44	2,28	1,01	0,354
Camargo (1971)	2,90	2,84	1,04	0,000*	2,37	2,39	0,76	0,003*	2,27	2,30	0,71	0,237
Priestley-Taylor (1972)	2,45	2,34	1,37	0,240	2,15	2,06	1,22	0,003*	2,15	2,28	1,21	0,003*
Linacre (1977)	3,21	3,09	0,91	0,000*	2,29	2,15	0,83	0,291	2,49	2,33	0,92	0,146
Tomar e O'toole (1980)	1,10	1,10	0,07	0,000*	2,20	2,20	0,75	0,860	2,29	2,29	0,70	0,835
Hargreaves-Samani (1985)	3,80	3,69	1,22	0,000*	2,32	2,24	0,87	0,156	2,36	2,30	0,74	0,979
Abtew (1996)	2,83	3,82	2,14	0,000*	2,20	2,21	0,71	0,571	2,29	2,29	0,67	0,859
Bruin e Stricker (2000)	2,28	2,23	1,24	0,557	2,15	2,10	1,17	0,009*	2,16	2,30	1,10	0,008*
Penman Monteith/FAO 56	2,58	2,46	1,06	0,000*	-	-	-	-	-	-	-	-
Lisímetro**	2,33	2,14	1,15	-	-	-	-	-	2,43	-	-	-

Legenda: “*” significativo para nível de 5% do teste de Mann-Whitney, “***” valor de referência da evapotranspiração, “ $\bar{X}$ ” média, “ M_e ” mediana, “ σ ” desvio padrão e “ p ” p-valor.

Já os modelos Priestley-Taylor e Penman Monteith/FAO 56 alcançaram valores próximo ao de referência, mas com superestimativa em 5,15% e 10,73% respectivamente.

Resultado similar para os modelos Jensen e Haise e Hargreaves-Samani também pode ser observado no trabalho de Mendonça et al. (2003). Em seu trabalho o autor descreve que os modelos superestimaram ET_o para o município de Campos dos Goytacazes, RJ, com características de clima tropical.

Analisando a existência de uma diferença significativa, entre os valores observados dos modelos originais e o lisímetro, apenas os modelos Thornthwaite, Priestley-Taylor e Bruin e Stricker não apresentaram diferença significativa. Tais resultados indica que esses modelos podem ser aplicados para o município de estudo.

Referente as médias apresentadas pelos modelos ajustados de período diário, observa-se que todos os modelos apresentaram valores próximo ao de referência de $2,33 \text{ mm.dia}^{-1}$. Destaca os modelos Jensen e Haise e Hargreaves-Samani, que após a calibração dos modelos, reduziram seus valores para $2,29 \text{ mm.dia}^{-1}$ e $2,32 \text{ mm. dia}^{-1}$ respectivamente. Uma diferença de 48,42% e 38,94%, entre o modelo original e ajustado.

Para os modelos de período mensal, o ajuste dos coeficientes, proporcionou estimar valores próximo ao de referência. Entretanto, os modelos Thornthwaite e Blaney-Criddle ainda apresentaram valores superiores da ET_o em 51,92% e 44,14 % respectivamente. Destaca que mesmo realizado o ajuste, o modelo Thornthwaite apresentou valor superior em relação ao descrito pelo modelo original. Já o modelo Camargo-1999 subestimou em apenas 5,28% a ET_o .

Também é apresentado a validação dos modelos. Para os modelos mensais, Thornthwaite e Camargo-1999 superestimaram o valor da ET_o em 18% e 2,89% respectivamente, sobre o valor real (lisímetro). Já o modelo Blaney-Criddle indicou subestimativa de 16,58%.

Em relação aos modelos de período diário, os modelos Priestley-Taylor e Bruin e Stricker apresentaram os menores valores da ET_o , $2,15 \text{ mm.d}^{-1}$ e $2,16 \text{ mm.d}^{-1}$ respectivamente. Subestimaram em 11,58% e 11,11% nesta ordem. Os demais modelos apresentaram valores próximos da ET_o , em relação ao lisímetro.

A eficiência dos modelos também pode ser comprovada na comparação entre os valores das medianas. Apenas os modelos Priestley-Taylor e Bruin e Stricker, não

indicaram diferença significativa à nível de 5%. Após o ajuste e validação dos dados, os modelos Priestley-Taylor e Bruin e Stricker ainda apresentaram p-valor abaixo do nível de 5%.

Os modelos Turc e Camargo também apresentarão diferença significativa entre as medianas, após o ajuste dos coeficientes. Neste caso é proposto um ajuste dos modelos para estimar a evapotranspiração para períodos de três, cinco e sete dias. De acordo com Santiago et al. (2002), quanto menor a escala de tempo para estimativa da ET_o , maior é a vulnerabilidade dos dados, quando se tem alterações significativas da amplitude dos elementos meteorológicos. Para Santos et al., 2013, a realização da rega em períodos acumulados possibilita melhor gestão dos recursos hídricos, eficiência e otimização da produtividade, bem como benefícios na as atividades agrícolas. Neste sentido a Tabela 4 descreve o desempenho dos modelos Priestley-Taylor, Turc, Camargo e Bruin e Stricker, ajustados localmente para os períodos de 3, 5 e 7 dias.

O agrupamento das medidas da ET_o para períodos de 3, 5 e 7 dias, promoveu melhorias nos ajustes dos valores estimados. Os modelos ajustados apresentaram valores superiores dos índices r e d , para os três períodos avaliados, quando comparado aos valores por período diário. Resultado análogo é confirmado por Mendonça et al. (2003), quando os autores realizaram ajustes dos modelos, para períodos de 3, 7 e 10 dia.

Considerando as médias obtidas com os modelos ajustado, nota-se que todos os modelos alcançaram médias próximas ao do lisímetro, nos três período analisados. Salienta que o modelo de Camargo obteve, nos três períodos avaliados, a menor diferença entre a média estimada e a média lisimétrica. Uma diferença de 1,57%, 1,63% e 1,65% para os períodos de 3, 5 e 7 dias respectivamente. O benefício de utilizar escalas maiores que a diária, para o modelo de Camargo, também é confirmada por Barros et al. (2009).

Para todos os períodos o modelo Bruin e Stricker apresentou as menores estimativas, com diferença em $0,53 \text{ mm.d}^{-1}$, $0,91 \text{ mm.d}^{-1}$ e $1,27 \text{ mm.d}^{-1}$ para os períodos acumulados em 3, 5 e 7 dias respectivos.

Outra forma de averiguar a incerteza dos modelos está nos indicadores dos erros. Por meio da diferença entre os valores da ET_o estimados e medido, determina-se o erro do ajuste. A Tabela 5 apresenta os valores dos indicadores estatísticos, referentes a performance dos modelos originais e ajustados.

Tabela 4 – Desempenho dos modelos ajustados de Bruin e Stricker, Camargo, Turc Priestley e Taylor, para períodos acumulados em relação a medida real da evapotranspiração

Metodologia	Período – 3 dias						Validação					
	$\bar{X}$	M_e	σ	r	d	p-valor	$\bar{X}$	M_e	σ	r	d	p-valor
Turc (1961)	7,18	6,82	2,12	0,80	0,86	0,05 ^{ns}	7,38	7,37	1,96	0,75	0,82	0,345 ^{ns}
Camargo (1971)	7,12	7,24	2,22	0,79	0,85	0,120 ^{ns}	6,84	6,93	2,05	0,83	0,83	0,512 ^{ns}
Priestley-Taylor (1972).	6,48	6,96	3,55	0,82	0,90	0,065 ^{ns}	6,34	6,84	3,51	0,85	0,89	0,079 ^{ns}
Bruin e Stricker (2000)	6,48	6,99	3,38	0,81	0,89	0,083 ^{ns}	6,47	7,08	3,39	0,84	0,89	0,114 ^{ns}
Lisímetro**	7,01	6,60	3,10	-	-	-	7,27	-	-	-	-	-
	Período – 5 dias						Validação					
	$\bar{X}$	M_e	σ	r	d	p-valor	$\bar{X}$	M_e	σ	r	d	p-valor
Turc (1961)	11,96	11,25	3,22	0,81	0,85	0,164 ^{ns}	12,33	12,25	3,02	0,77	0,82	0,568 ^{ns}
Camargo (1971)	11,87	12,10	3,65	0,82	0,88	0,267 ^{ns}	11,42	11,60	3,39	0,86	0,89	0,549 ^{ns}
Priestley-Taylor (1972).	12,52	12,91	6,65	0,84	0,89	0,493 ^{ns}	10,75	12,25	5,81	0,87	0,90	0,201 ^{ns}
Bruin e Stricker (2000)	10,77	11,69	5,57	0,81	0,89	0,195 ^{ns}	10,82	12,33	5,61	0,86	0,89	0,237 ^{ns}
Lisímetro**	11,68	11,27	4,88	-	-	-	12,12	-	-	-	-	-
	Período – 7 dias						Validação					
	$\bar{X}$	M_e	σ	r	d	p-valor	$\bar{X}$	M_e	σ	r	d	p-valor
Turc (1961)	16,73	16,40	4,09	0,82	0,84	0,257 ^{ns}	17,29	17,29	4,52	0,76	0,81	0,737 ^{ns}
Camargo (1971)	16,61	16,94	5,04	0,84	0,89	0,375 ^{ns}	16,02	15,99	5,04	0,86	0,89	0,539 ^{ns}
Priestley-Taylor (1972).	17,13	17,89	9,22	0,86	0,89	0,605 ^{ns}	15,07	15,05	8,15	0,87	0,90	0,901 ^{ns}
Bruin e Stricker (2000)	15,07	16,19	7,73	0,84	0,90	0,259 ^{ns}	15,17	15,80	7,89	0,86	0,90	0,334 ^{ns}
Lisímetro**	16,34	15,72	7,74	-	-	-	17,03	-	-	-	-	-

Legenda: “ns” não significativo para nível de 5% do teste de Mann-Whitney, “ d ” índice de Willmott, “ r ” Coeficiente de correlação de Pearson, “***” valor de referência da evapotranspiração, “ $\bar{X}$ ” média, “ M_e ” mediana, “ σ ” desvio padrão e “ p ” p-valor.

Analisando a eficiência dos modelos originais, o índice d indicou baixa concordância entre o valor medido e o valor estimado da ET_o dos modelos: Blaney-Criddle (0,33), Camargo-1999 (0,27) e Linacre (0,37). O mesmo pode ser observado nos valores de r , onde estes apresentaram valores de 0,69, 0,62 e 0,32 respectivamente.

O teste de comparação entre as médias, indicado por p-valor, estabeleceu que não houve diferença significativa entre as médias estimada, em todos os modelos ajustados e na média de referência. Isso pode ser observando nos três períodos de ajuste e na validação dos modelos.

A validação dos modelos apresentou valores dos índices d e r próximos a 1, indicando forte correlação dos valores estimados e medidos. Nota-se também que os valores médios estimados da ET_o , estão próximos do valor de referência.

Em relação ao ajuste dos modelos, todos apresentaram valores acima de 0,67 e 0,76 para os índices r e d respectivamente. Um aumento médio de 8,97% para r e 30,64% para d . A ajuste local de modelos empíricos, também proporcionou aumento dos valores do índice d , em Sales et al. (2018) para o município de São Mateus-ES, de classificação climática AW (Tropical úmido).

Os modelos ajustados Linacre e Camargo apresentaram melhor correlação entre a média estima e medida, em comparação aos modelos não ajustados. Uma superioridade de 109,38% e 19,35 % respectivamente. Em relação ao índice d , os modelos calibrados Priestley-Taylor, Blaney-Criddle, Jensen e Haise, Turc, e Bruin e Stricker explicitaram maiores valores.

Em relação ao indicador MAE, para período mensal, o modelo Camargo apresentou 85,47% de redução do valor, quando realizado o ajuste do modelo. Em relação ao período diário, o modelo Bruin e Stricker reduziu o valor em 73,11%. A redução média do erro MAE, para os modelos diários e mensais foram de 54% e 80,38% respectivamente.

A mesma cronologia pode ser vista nos indicadores RMSE e MBE. Para o indicador RMSE, os modelos Camargo e Bruin e Stricker apresentaram uma redução de 82,07% e 67,32% sobre os modelos originais. Os mesmos modelos apresentaram redução correspondente de 103,72% e 105,15% para o indicador MBE.

Tabela 5 – Índices estatísticos dos modelos empíricos (ajustados e originais) em relação a medida real da evapotranspiração (Lisímetro)

Metodologia (mm.mês ⁻¹)	Original					Ajustado				
	MAE	MBE	RMSE	<i>r</i>	<i>d</i>	MAE	MBE	RMSE	<i>r</i>	<i>d</i>
Thornthwaite (1948)	11,67	9,57	15,36	0,74	0,73	7,95	2,71	9,92	0,93	0,96
Blaney Criddle (1950)	63,40	63,40	67,67	0,76	0,83	11,50	2,19	15,30	0,82	0,89
Camargo (1999)	92,63	89,40	101,14	0,78	0,53	13,45	-3,33	18,13	0,74	0,84
Penman Monteith/FAO 56	11,16	6,81	14,35	0,74	0,79	-	-	-	-	-

Metodologia (mm.dia ⁻¹)	Original					Ajustado				
	MAE	MBE	RMSE	<i>r</i>	<i>d</i>	MAE	MBE	RMSE	<i>r</i>	<i>d</i>
Makkink (1957)	0,99	0,86	1,19	0,74	0,73	0,59	-0,13	0,78	0,74	0,82
Turc (1961)	0,60	0,12	0,76	0,76	0,83	0,58	0,06	0,75	0,76	0,84
Jensen e Haise (1963)	2,15	2,10	2,38	0,78	0,53	0,53	-0,04	0,70	0,79	0,88
Camargo (1971)	0,76	0,57	0,98	0,74	0,79	0,60	0,04	0,79	0,73	0,80
Priestley-Taylor (1972)	0,72	0,11	0,87	0,78	0,87	0,66	-0,18	0,81	0,78	0,87
Linacre (1977)	1,29	0,87	1,50	0,32	0,37	0,65	-0,04	0,85	0,67	0,78
Tomar e O'toole (1980)	1,28	-1,23	1,65	0,69	0,70	0,64	-0,13	0,84	0,69	0,77
Hargreaves-Samani (1985)	1,50	1,47	1,68	0,76	0,60	0,56	-0,01	0,73	0,77	0,85
Abtew (1996)	1,57	1,50	1,77	0,69	0,56	0,64	-0,11	0,84	0,69	0,76
Bruin e Stricker (2000)	2,38	2,33	2,57	0,76	0,87	0,64	-0,12	0,84	0,77	0,86
Penman Monteith/FAO 56	0,56	0,25	0,72	0,81	0,88	-	-	-	-	-

Legenda: “MAE” Erro médio absoluto, “MBE” Erro absoluto médio, “RMSE” Raiz do erro quadrático médio, “*d*” Índice de Willmott e “*r*” Coeficiente de correlação de Pearson.

De modo geral o valor médio da redução do erro MBE, para o período diário e mensal, foram de 107,55% e 101,73%. Já para o erro RMSE os valores obtidos são de 67,32% e 74,46% respectivamente.

De modo a verificar graficamente a eficiência do ajuste local das metodologias empíricas, a Figura 5 apresenta o comportamento ET_o , estimada por modelos originais e calibrados.

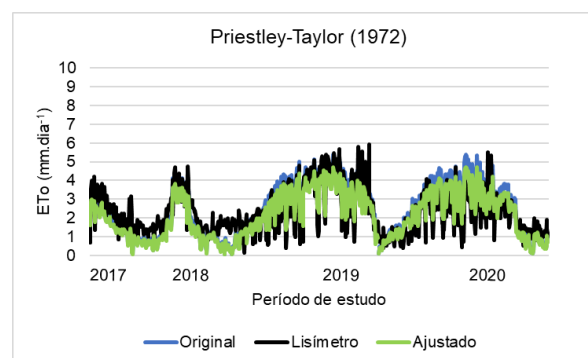
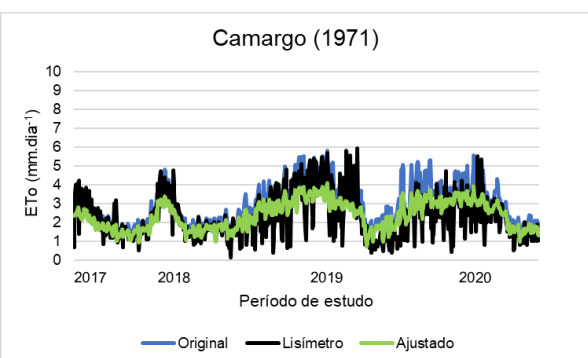
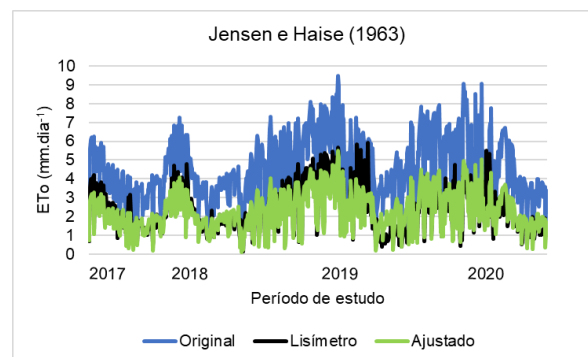
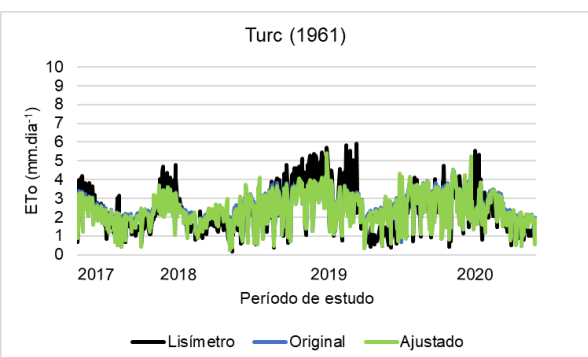
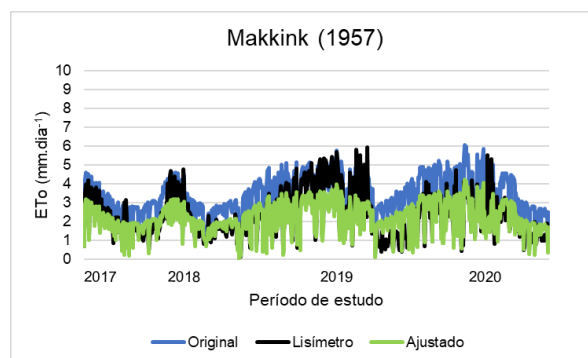
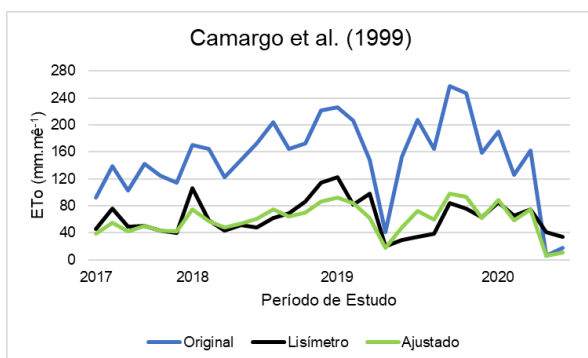
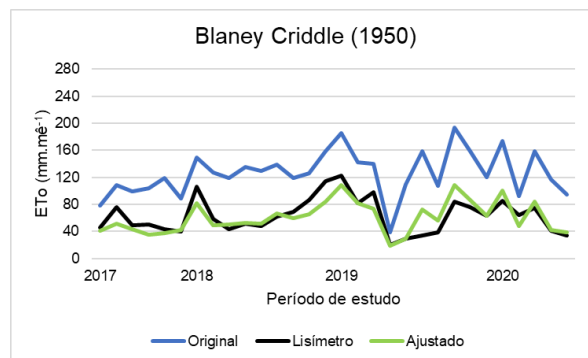
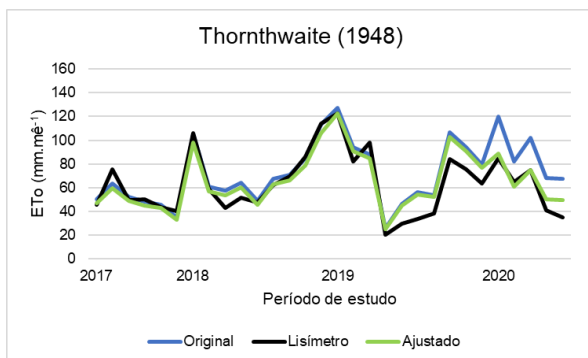
Observando a trajetória dos dados, exibidos nos modelos originais, Blaney Criddle, Camargo-1999, Jensen e Haise, Bruin e Stricker, Makkink, Linacre, Hargreaves-Samani, Abtew indicaram superestimativa da ET_o em relação ao comportamento da medida real. Já o modelo original Tomar e O'toole apresentou subestimativa da ET_o , mantendo-se próximo a 1 mm.dia^{-1} . Analisando a trajetória dos modelos originais e ajustados simultaneamente, somente os modelos de Thornthwaite, Turc, Priestley-Taylor e Camargo, apresentaram comportamento similares ao descrito no lisímetro.

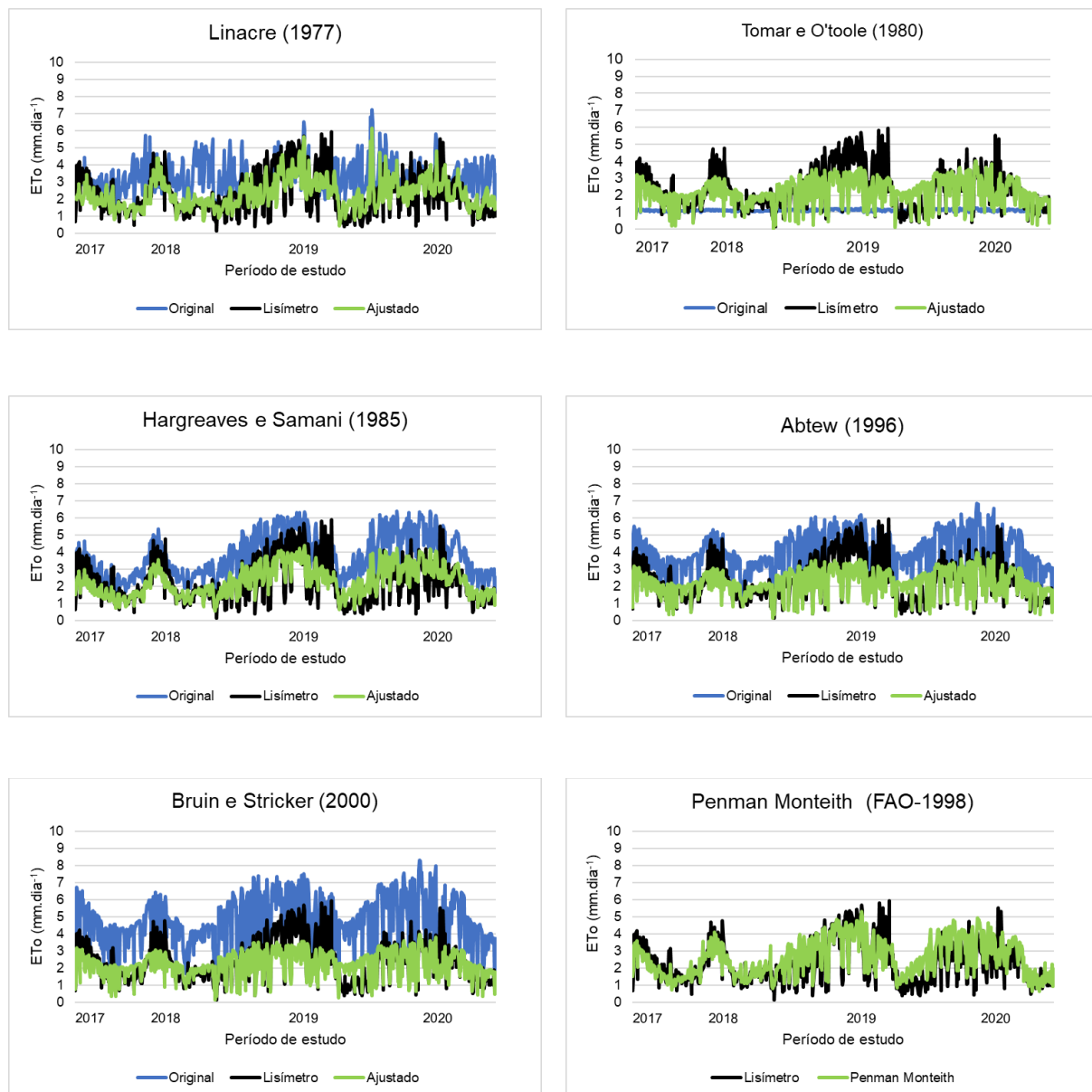
Apesar dos modelos serem uma alternativa na estimativa da ET_o , a (Figura 5) também apresenta a eficiência do modelo Penman Monteith/FAO 56. Por apresentar maior número de variáveis meteorológicas, seu comportamento é similar ao indicado pelo lisímetro.

Analisando a amplitude dos dados da ET_o , em cada representação gráfica, verifica-se que, para os modelos originais em período mensal, o maior valor obtido foi de aproximadamente 200 mm.mês^{-1} entre o período de 2019 e 2020. Já o ajuste proporcionou amplitude no valor de 100 mm.mês^{-1} , que se iguala ao valor do lisímetro.

Para os modelos diários, o maior valor observado é de aproximadamente 6 mm.d^{-1} , exceto os modelos Jensen e Haise que indica uma amplitude de 9 mm.mês^{-1} , para o ano de 2019. Os menores valores observados estão no intervalo de 0 e 1, em todos os modelos e em todos os anos analisados.

Figura 5 – Comportamento gráfico dos valores da ET_o quantificado pelo lisímetro e estimado de acordo com os modelos empíricos originais e ajustados





A Tabela 6. informa os valores dos coeficientes ajustados para a região de estudo, de forma a satisfazer as condições locais para estimativa da ET_0 .

Tabela 6 – Valores dos parâmetros ajustados dos modelos empíricos, para o município de Botucatu – SP, de acordo com o valor de referência (lisímetro)

Metodologia / Mensal	Equação	Coeficientes
Thornthwaite (1948)	$ET_0 = x. \left(\frac{y \cdot T_n}{I} \right)^a$	$x = 7$ $y = 14$

Blaney-Criddle (1950)	$ET_0 = a + b.p(x.T_{med} + y)$	$x = 0,51$ $y = 0,25$
Camargo et al. (1999)	$ET_0 = x.\left\{\frac{y.[z.(t.T_{max} - T_{min})]}{I}\right\}^a$	$x = 9$ $y = 4$ $z = 0,14$ $t = 15$
Metodologia / Diária	Equação	Coefficientes
Makkink (1957)	$ET_0 = x.R_s\left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) - y$	$x = 0,43$ $y = -0,11$
Turc (1961)	$ET_0 = a_t.x.\left(\frac{T_{med}}{T_{med} + y}\right)\left(\frac{\left(\frac{R_s}{z} + w\right)}{\lambda}\right)$	$x = 0,015$ $y = 36$ $z = 0,018292$ $w = 78$
Jensen e Haise (1963)	$ET_0 = R_s (x.T_a + y)$	$x = 0,008$ $y = -0,038$
Camargo (1971)	$ET_0 = x.Q_o.T_{Med}.ND$	$x = 0,008$
Priestley eTaylor (1972)	$ET_0 = x.\left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right)(R_n - G)$	$x = 1,11$
Linacre (1977)	$ET_0 = \frac{\frac{x.(T+w.Z)}{y-A} + t.(T + T_d)}{v - T}$	$x = 171$ $y = 110$ $v = 35$ $t = -1$ $w = 0,010$

Tomar e O'toole (1980)	$ET_o = x + y \cdot R_s$	$x = -0,1$ $y = 0,132$
Hargreaves e Samani (1985)	$ET_o = x \cdot Q_o \cdot (T_{m\acute{a}x.} - T_{m\acute{i}n.})^z (T_{med} + y)$	$x = 0,0033$ $y = -0,9$ $z = 0,41$
Abtew (1996)	$ET_o = x \cdot \frac{R_s}{\lambda}$	$x = 0,31$
Bruin e Stricker (2000)	$ET_o = x \cdot \left(\frac{R_n}{\lambda} \right)$	$x = 0,81$

1.4 CONCLUSÃO

A partir das análises estatísticas, os modelos que são aplicados para clima árido e que utilizam a variável de radiação em sua metodologia, superestimam a ET_o para o município em estudo, em relação ao valor de referência (lisímetro).

O ajuste dos modelos, para as condições climática de Botucatu-SP, indicou ser necessário. No entanto, para os modelos Priestley e Taylor, Bruin e Stricker, Turc e Camargo, o ajuste não apresentou eficiência na estimativa da ET_o , impossibilitando sua aplicação para as condições climática de Botucatu/SP. A calibração dos coeficientes proporcionou menores valores dos índices MAE, MBE e RMSE. Em todos os modelos ajustados, houve redução desses índices, quando comparado com os valores apresentados nos modelos originais.

Comprovando o manual da FAO-56, que indica a equação de Penman Monteith para todo as localidades, o modelo é indicado para determinar a evapotranspiração para períodos diários e mensais.

O modelo de Thornthwaite com coeficientes originais ou ajustados, é recomendado para Botucatu. Em ambos os casos o modelo apresentou médias da ET_o próxima ao valor de referência, bem como valores elevados dos índices d (Willmott) e r (coeficiente de correlação de Pearson). Os valores estimados por esse modelo não apresentaram diferenças significativas, o que confirma a sua eficiência.

Medidas estimadas para período diferentes do diário e mensal, também são recomendadas. Os modelos ajustados e analisados para períodos de três, cinco e sete dias, indicaram médias de ET_o próximas ao valor referência. A utilização de período acumulados da ET_o , no sistema de irrigação, proporciona reserva hídrica no solo, que supre as necessidades da cultura, auxilia no manejo da cultura e e benefícios econômicos para o produtor em campo.

Os modelos originais de Priestley e Taylor e Bruin e Stricker, não são indicados para serem aplicados na estimativa da evapotranspiração para o município de estudo.

REFERÊNCIAS

ABTEW, W. Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in south Florida. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 32, n. 3, p. 465-473, 1996.

ALLEN, R.G. *et al.* **Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.** Rome, Italy: United Nations – FAO. 300 pp. 1999.

BARROS, V. R. *et al.* Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.

BASSANEZI, R. C. **Ensino aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia.** São Paulo: Contexto, 2002.

BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. D., "Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data", U.S. **Department of Agriculture Soil Conservation Service**, SCS - TP - 96, Washington, D.C., ago, 1950.

BRUIN, H. A. R.; STRICKER, J. N. M. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. **Hydrological sciences journal**, v. 45, n. 3, p. 391-406, 2000.

CAMARGO, A. P. Balanço hídrico no Estado de São Paulo. Campinas: IAC, 28p. **Boletim Técnico**, v. 116, 1971.

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

CARVALHO, L. G. *et al.* Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.

CARVALHO, D. F. *et al.* Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 1, p. 1-11, 2015.

COUTINHO, E. R. *et al.* Avaliação de Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET_o) Diária Para Regiões dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 649-657, 2020.

DOORENBOS J.; PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage, Paper 24, **Rome: FAO**, 179p. 1977.

EL MOUATASIM, A; ETTAHIRI, A. Stochastic perturbation of Frank-Wolfe method for nonconvex programming problems. **Annals of the University of Craiova-Mathematics and Computer Science Series**, v. 47, n. 2, p. 314-330, 2020.

ESCOBEDO, J. F. *et al.* Modeling hourly and daily fractions of UV, PAT and NIR to global solar radiation under various Sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, London, v. 86, n. 2, p. 299-309, 2009.

ESCOBEDO, J.F. *et al.* Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. **Renewable Energy**, v. 36, p. 169-178, 2011.

FACÓ, J. L. D.; OLIVEIRA, L. A. A. Aplicação de Computação paralela à resolução numérica de problemas de programação não linear com restrições. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2003, Natal. **A pesquisa Operacional e os Recursos Renováveis**: anais... Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2003/pdf/arg0236.pdf>>. Acesso em: 3 jun. 2022

FENNER, W. *et al.* Desenvolvimento, calibração e validação de lisímetros de pesagem para medida de evapotranspiração de culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 4, p. 297-302, 2019.

FERNANDES, L.C.; PAIVA, C.M.; ROTUNNO FILHO, O.C. Evaluation of six empirical evapotranspiration equations - case study: Campos dos Goytacazes/Rj. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 3, p. 272-280, 2012.

FIALLOS, G. La Correlación de Pearson y el proceso de regresión por el Método de Mínimos Cuadrados. **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, v. 5, n. 3, p. 2491-2509, 2021.

FREVERT, D. K.; HILL, R. W.; BRAATEN, B. C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 109, n. 2, p. 265-270, 1983

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied engineering in agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

JENSEN, M. E.; HAISE, Howard R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 89, p. 15-41, 1963.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlagcondicionadas. **Justus Perthes**. n.p. 1928.

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural meteorology**, v. 18, n. 6, p. 409-424, 1977.

MAKKINK, G. F. Ekzameno de la formula de Penman. **Neth. J. Agric. Sci**, v. 5, p. 290-305, 1957.

MARINHO, F. P. *et al.* Influência dos fenômenos climáticos do El Niño e da La Niña na previsão da média diária de irradiação global na cidade de fortaleza. **Revista Científica Acerte**, v. 2, n. 2, p. e2253-e2253, 2022.

MARTINS, I. P. *et al.* Evapotranspiração e coeficiente de cultivo de manjerição determinados por lisímetros de pesagem. **Horticultura Brasileira**, v. 37, n. 4, p. 373-378, 2019.

MENDONÇA, J. C. *et al.* Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, p. 275-279, 2003.

OLIVEIRA, E. R.; SILVA, T. C.; RAMOS, R. F. O. Evapotranspiração de referência em Januária-MG pelos métodos tanque classe “A” e Hargreaves-Samani. In: **Colloquium Agrariae**. ISSN: 1809-8215. 2020. p. 48-54.

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração. Campinas**, SP: Fundag, 2013. 323 p

PRIESTLEY, C. H. B; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly weather review**, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

SACOMAN, M. A. R. Otimização de projetos utilizando GRG, Solver e Excel. In: **XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. 2012.

SALES, R. A. *et al.* Ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da evapotranspiração de referência para São Mateus, ES. **Irriga**, v. 23, n. 1, p. 154-167, 2018.

SANTIAGO, A. V. *et al.* Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decendial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, RS. 10: 9 p. 2002.

SANTOS, A. A. R.; *et al.* Evapotranspiração de referência em função dos extremos da temperatura do ar no estado do Rio de Janeiro. **Irriga**, v. 21, n. 3, p. 449-465, 2016.

SANTOS, F. L. *et al.* Efeitos da rega e do regime hídrico em olival superintensivo no Alentejo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 36, n. 2, p. 206-219, 2013.

SARNIGHAUSEN, V. C. R. *et al.* Estimativa da evapotranspiração de referência para Botucatu-SP por meio de modelos de regressão. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, 2021.

SILVA, H. S.; DA SILVEIRA, H. B. Modelagem matemática: Aplicações sobre medidas agrárias em pequenas propriedades rurais no distrito de Vila Mandi. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 78410-78425, 2020.

SOUZA, A. P. *et al.* Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 3, p. 219-228, 2011.

TERAMOTO, É. T. *et al.* Comparação de Métodos de Estimativa da Radiação Solar Ultravioleta Horária: Modelos Empíricos, Redes Neurais Artificiais e Máquina de Vetores de Suporte. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 35-43, 2020.

THORNTHWAIT, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, jan, 1948.

TOMAR, V. S.; O'TOOLE, J. C. Water use in lowland rice cultivation in Asia: a review of evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v. 3, n. 2, p. 83-106, 1980.

TURC, L. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. **Annals of Agronomy**, v.12, n.1, p.13-49, 1961.

ULIANA, E. M., *et al.* Modelos hidrológicos SAC-SMA E IPH II: calibração e avaliação do desempenho na estimativa de vazões na bacia do rio Piracicaba (MG). **Irriga**, v. 25, n. 2, p. 202-222, 2020.

VIEIRA, S. Bioestatística: tópicos avançados. In: **Bioestatística: tópicos avançados**. 2010. p. 278-278.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, Palm Beach, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981

WILM H. G. *et al.* Report of the Commite on evapotranspiration and transpiration. Transactions of the American Geophysical Union, v.25, n. 4, p. 686-693, 1944.

CAPÍTULO 2

AJUSTE DE MODELOS EMPÍRICOS NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA, PARA O MUNICÍPIO DE BOTUCATU - SÃO PAULO, EM RELAÇÃO AO MODELO DE PENMAN-MONTEITH

ANA CLÁUDIA MARASSÁ ROZA BOSO, ALEXANDRE DAL PAI

Resumo: Por recomendação da FAO 56, a evapotranspiração de referência (ET_o) é estimada por Penman-Monteith. Entretanto essa metodologia é composta por variáveis que nem sempre estão disponíveis em campo, e a utilização de métodos simplificados torna-se uma solução. Neste sentido o trabalho objetivou em avaliar a eficiência e ajustar os modelos empíricos na estimativa da ET_o , em relação ao modelo Penman-Monteith, para o município de Botucatu-SP. As análises demonstraram que a realização do ajuste dos modelos, proporcionou melhor desempenho dos índices d e r , com redução média dos erros em 87,1%, e valores de ET_o semelhantes ao de referência. O modelo original e ajustado de Thornthwaite obteve estimou a ET_o com valores próximos ao de referência. Modelos originais, que são caracterizados para regiões árida, demonstraram desempenho insatisfatório e superestimaram a ET_o para o município de estudo, em comparação ao valor de Penman-Monteith/FAO56. Dos modelos ajustados destaca-se Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani e Jensen e Haise, pois apresentaram uma diferença média de 0.06 mm.dia^{-1} da ET_o , em relação ao modelo da FAO. O estudo também apontou que a utilização de escala de tempo maiores para estimar a ET_o , proporciona bons resultados. Para períodos acumulados de três, cinco e sete dias, apenas o modelo ajustado de Priestley e Taylor apresentou subestimativa em média de $1,5 \text{ mm.dia}^{-1}$.

Palavras-chave: Penman-Monteith; modelagem; estimativa; evapotranspiração; ajuste.

**ADJUSTMENT OF EMPIRICAL MODELS IN ESTIMATING THE REFERENCE
EVAPOTRANSPIRATION, FOR THE MUNICIPALITY OF BOTUCATU - SÃO
PAULO, IN RELATION TO THE PENMAN-MONTEITH MODEL**

ANA CLÁUDIA MARASSÁ ROZA BOSO, ALEXANDRE DAL PAI

Abstract: As recommended by FAO 56, the reference evapotranspiration (ET_o) is estimated by Penman-Monteith. However, this methodology is composed of variables that are not always available in the field, and the use of simplified methods becomes a solution. In this sense, the work aimed to evaluate the efficiency and adjust the empirical models in estimating the ET_o , in relation to the Penman-Monteith model, for the municipality of Botucatu-SP. The analyzes showed that performing the adjustment of the models provided better performance of the d and r indices, with an average reduction of errors of 87.1%, and ET_o values like the reference. Thornthwaite's original and adjusted model obtained estimated ET_o with values close to the reference. Original models, which are characterized for arid regions, showed unsatisfactory performance, and overestimated the ET_o for the study municipality, compared to the value of Penman-Monteith/FAO56. Of the adjusted models, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani and Jensen and Haise stand out, since they presented an average difference of 0.06 mm.day^{-1} of the ET_o , in relation to the FAO model. The study also pointed out that the use of longer time scales to estimate the ET_o provides good results. For accumulated periods of three, five and seven days, only the adjusted model of Priestley and Taylor presented an underestimation of 1.5 mm.day^{-1} on average.

Keywords: Penman-Monteith; modeling; estimate; evapotranspiration; adjustment.

2.1 INTRODUÇÃO

Por ser um elemento indispensável no ciclo hidrológico, a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) é fundamental para as áreas agrícola e ambientais (ADAMALA, 2018). No manejo de irrigação a evapotranspiração é essencial para o desenvolvimento da cultura, no auxílio das técnicas de manejo de irrigação relacionados com as características climáticas e no teor hídrico no solo (LOPES SOBRINHO et al. 2019). Dependendo da necessidade, a ET_o pode ser determinada por diferentes metodologias, sendo elas direta ou indireta.

Os métodos diretos são equipamentos que apresentam maior precisão, mas demanda custo e manutenção. A falta desses equipamentos em campo, possibilita a utilização dos métodos indiretos na estimativa da ET_o . Esses métodos são equações empíricas que utilizam dados meteorológicos, como radiação solar, umidade relativa e temperatura (Trigo et al., 2018).

Conforme a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), a ET_o deve ser estimada de acordo com o modelo de Penman-Monteith, descrito em Allen et al. (1998). Esse método pode ser aplicado para todas as condições climáticas, pois é um método preciso e combina as características aerodinâmica e balanço de energia. Entretanto essa metodologia requer variáveis meteorológica que, por falta de equipamentos instalados, nem sempre estão disponíveis em campo (Didari e Ahmadi, 2019).

A impossibilidade da utilização do modelo Penman-Monteith, permite aplicar os métodos empíricos que não necessitam de muitos parâmetros de entrada (Allen et al., 1998). Cada equação é aplicada de acordo com a localidade e condição climática em que foi desenvolvida. O modelo de Thornthwaite (1948), por exemplo, foi confeccionado para os Estados Unidos e apresenta bons resultados para condições de clima úmido (CAMARGO; CAMARGO, 2000). Já o modelo de Hargreaves-Samani, demonstrar desempenho satisfatório para estimativa da ET_o , em localidades de clima árido e semiárido (JÚNIOR et al., 2017).

Apesar dessa dependência da característica climática do local, os modelos empíricos podem ser calibrados de acordo com a necessidade de sua aplicação. Diversas são as técnicas utilizadas para o ajuste local de um modelo. As mais

utilizadas são por regressão linear e programação linear, que ajusta equações lineares e não lineares (ALLEN et al., 1998; COBANER, 2011).

Avaliando a importância de ajuste local, das equações empíricas para estimativa da evapotranspiração, o presente trabalho tem como objetivo calibrar os modelos empíricos para estimar a ET_o , de acordo com as características local do município de Botucatu - SP, bem como compará-los com o modelo de referência da FAO 56, Penman-Monteith.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido para as características climáticas do município de Botucatu-SP (Figura 1), que se localiza a 22°50' Sul, 48°25' Oeste e 786 m de altitude. Sua característica climática está classificada em Cwa, sendo subtropical úmido com período chuvoso entre novembro e abril e estiagem no inverno (ESCOBEDO et al., 2011; KÖPPEN; GEIGER, 1928).

Figura 1 – Localização do município de Botucatu/SP



Fonte: FAMILYSEARCH, 2022.

De acordo com os dados apresentados pela estação meteorológica convencional (EMC) da Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP) de Botucatu a Faculdade de Ciências Agrônomicas – Unesp de Botucatu, o município apresenta umidade relativa média do ar em 69,8 %, temperatura média anual de 21,04°C e precipitação média anual de 1521,76 mm (FRANCO et al., 2022).

2.2.2 Aquisição de dados meteorológicos

Para estimar a ET_o foram utilizadas as seguintes variáveis meteorológicas: radiação solar global, radiação extraterrestre, radiação líquida, velocidade do vento, umidade relativa, temperatura e fotoperíodo. Aquisição desses dados ocorreu por meio dos seguintes equipamentos: sensor de temperatura e umidade do ar; pluviômetro; anemômetro e saldo radiômetro. Todos os equipamentos estão instalados nas estações meteorológica e radiométrica, situadas no interior da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP.

O período para estudo compreendeu-se entre março de 2017 e junho de 2020, totalizando 1321 dias, com medidas na escala mensal e diária. No entanto foi utilizado apenas 61% (812 dias) dos dados, pois houve a necessidade de realizar a calibração dos dados. Por se tratar de aparelhos com alto nível de sensibilidade e requisito de manutenção, foram retirados os dias em que os aparelhos não mensuraram corretamente as variáveis meteorológicas. A Tabela 1 descreve o período e quantidade de dias que foram utilizados para o estudo.

Tabela 1 – Período avaliado das variáveis meteorológicos após a calibração

Período mensal	Período anual /Número de dias			
	2017	2018	2019	2020
Janeiro	-	-	29	30
Fevereiro	-	1	27	23
Março	14	30	28	30
Abril	26	-	9	-
Maio	26	30	-	31
Junho	30	30	-	30
Julho	31	31	31	-
Agosto	19	31	31	-
Setembro	-	30	20	-
Outubro	-	26	31	-
Novembro	-	28	30	-
Dezembro		29	23	-

2.2.3 Estimativa da evapotranspiração e ajuste dos modelos

A evapotranspiração de referência foi estimada por 13 modelos empíricos, sendo eles: Thornthwaite, Makkink, Camargo, Turc, Jensen e Haise, Priestley-Taylor, Linacre, Tomar e O'toole, Hargreaves-Samani, Abtew, Camargo et al., Bruin e Stricker, e Blaney-Criddle. Para o ajuste do modelo de Blaney-Criddle., foi utilizada a equação apresentada por Doorenbos e Pruitt (1977) e modificada por Frevert, Hill e Braaten (1983). Os resultados obtidos com os modelos empíricos foram comparados com o modelo de referência da FAO-56, Penman-Monteith (Allen et al., 1998). A Tabela 2, apresenta as equações de cada metodologia analisada.

Tabela 2 – Características dos modelos empíricos utilizados para estimar a evapotranspiração de referência

Metodologia	Equação	Zona Climática	Escala
Thornthwaite (1948)	$ET_o = 16. \left(\frac{10. T_n}{I} \right)^a$	Úmido	Mensal
Makkink (1957)	$ET_o = 0,61. R_s \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) - 0,12$	Úmido	Diário
Turc (1961)	$ET_o = a_t. 0,013. \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right) \left(\frac{\frac{R_s}{0,0238846} + 50}{\lambda} \right)$	Úmido	Diário
Jensen e Haise (1963)	$ET_o = R_s (0,025. T_a + 0,078)$	Árido e semiárido	7 a 10 dias
Camargo (1971)	$ET_o = 0,01. Q_o. T_{Med}. ND$	Úmido	10 dias /Mensal

Priestley-Taylor (1972)	$ET_o = 1,26. \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G)$	Semiárido	Diário
Linacre (1977)	$ET_o = \frac{500. \frac{(T+0,006.Z)}{(100-A)} + 15(T - T_d)}{80 - T}$	Temperado, seco e quente	Diário
Tomar e O'toole (1980)	$ET_o = 0,9 + 0,0115. R_s$	Úmido	Diário
Blaney-Criddle. (1950)	$ET_o = a + b. p(0,46. T_{med} + 8,13)$	Semiárido Árido	Mensal
Hargreaves- Samani (1985)	$ET_o = 0,0023. Q_o. (T_{máx.} - T_{mín.})^{0,5} (T_{med} + 17,8)$	Árido e semiárido	Diário
Abtew (1996)	$ET_o = 0,53. \frac{R_s}{\lambda}$	Úmido	Diário
Camargo et al. (1999)	$ET_o = 16. \left\{ \frac{10. [0,36. (3. T_{max} - T_{min})]}{I} \right\}^a$	Árido e superúmido	Mensal
Bruin e Stricker (2000)	$ET_o = 0,86. \left(\frac{R_n}{\lambda} \right)$	Úmido	Diário
Penman- Monteith (Allen et al., 1998)	$ET_o = \frac{0,408. \Delta. (R_n - G) + \left[\frac{\gamma. 900. U_2. (e_s - e_a)}{T_{med} + 273} \right]}{\Delta + \gamma. (1 + 0,34. U_2)}$	Todas	Diário

Legenda: ET_o – evapotranspiração de referência ($\text{mm dia}^{-1}/\text{mm.mês}^{-1}$), U_2 – velocidade do vento a 2 m de altura (m.s^{-1}), γ – coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Δ - tangente à curva da pressão de saturação do vapor d'água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), e_s – pressão de vapor na saturação (kPa), e_a – pressão de vapor atual (kPa), T_{med} – temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$), R_n – radiação líquida ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), G – fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), R_s – radiação solar global ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), I (adimensional), a (adimensional), Q_o - Irradiância solar extraterrestre ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), T_a – temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$), ND – número de dias, T_d – temperatura no ponto de orvalho ($^\circ\text{C}$).

Estimada a evapotranspiração por meio dos modelos empíricos, foi realizado o ajuste dos coeficientes de cada metodologia. O ajuste foi executado por meio da técnica GRG não linear do pacote solver, instalado no software Excel 2016® da empresa Microsoft Office. A técnica consiste por meio da Equação (1), encontra um ponto ótimo que minimize a função objetivo, de acordo com as restrições do problema (EL MOUATASIM; ETTAHIRI, 2020).

$$GRG = df(\vec{x}) = \{\nabla_z^T f(\vec{x}) - \nabla_y f(\vec{x})^T \cdot [B^{-1}A]\}d \quad (1)$$

onde $\nabla f(\vec{x})$ é a gradiente da função objetivo em relação as variáveis dependentes e independentes, B indica o gradiente das restrições em relação as variáveis independentes e A representa o gradiente das restrições em relação as variáveis independentes.

Para o específico estudo, a função objetivo foi minimizar o erro médio absoluto (MAE) entre a ET_o estimada por modelos empíricos e o valor obtido por Penman-Monteith (FAO 56). Os valores iniciais das interações utilizadas no solver, foram os valores originais dos coeficientes. Destaca que não se aplicou nenhuma restrição sobre os coeficientes, durante o procedimento de ajuste.

2.2.4 Eficiência estatística dos modelos originais e ajustados

A verificação da eficiência dos modelos em estimar a ET_o , em relação ao modelo de referência, foi realizada para todos os modelos originais e calibrados. Essa eficiência foi quantificada por meio do cálculo da raiz do erro quadrático médio (RMSE), do erro médio absoluto (MAE), do índice de Willmott (d), erro absoluto médio (MBE) e o coeficiente de correlação de Pearson (r). Suas equações estão representadas, respectivamente, a seguir (FIALLOS, 2021; MARINHO et al., 2022):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2} \quad (4)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (5)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y)(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

onde $\hat{y}_i$ é o valor da *ETo* estimada pelos modelos; y_i representa o valor obtido pelo modelo da FAO; $\bar{y}$ é a média da *ETo* obtida pelo modelo da FAO; n é a quantidade de dados em dias da *ETo*; e y é a média da *ETo* estimada pelos modelos empíricos.

A comparação de semelhança entre os valores estimados da *ETo* e de referência, foi realizada por meio do teste não-paramétrico de Mann-Whitney (Equação 7). A utilização desse teste ocorreu devido aos dados não apresentarem normalidade e homocedasticidade.

$$\begin{cases} U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1 \\ U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - R_2 \end{cases} \quad (7)$$

onde n_1 é o número de casos do grupo 1, n_2 representa o número de casos do grupo 2 e R indica a soma de postos de cada grupo.

O teste avalia duas amostras independentes por meio das medianas, pois está se encontra mais próxima da “massa dos dados” A partir no menor valor obtido entre U_1 e U_2 , é realizado a comparação entre um ponto crítico tabelado. Caso o valor tabelado for maior que o valor de U , a hipótese nula é rejeitada (BRITO; CALUMBY, 2019).

2.2.5 Validação dos dados

A validação dos modelos ajustados, foi realizada por meio da técnica de amostragem aleatória simples. Para os modelos diários, foi selecionado 45% do total de dados, sendo 365 dias de uma população de 812. Como os modelos mensais

utilizam em seu cálculo, períodos de 12 meses, foi definida uma amostra de 40% do total, representando 12 meses de uma população de 30.

Para modelos ajustados que não apresentaram resultados satisfatórios, quando comparados ao valor de referência, foi realizado o agrupamento dos dados para períodos de três, cinco e sete dias. Em seguida foi realizada as análises de eficiências dos modelos agrupados na estimativa da evapotranspiração, bem como a validação dos dados. Para validar os modelos agrupados por períodos acumulados, foi realizado um agrupamento da amostra de 365 dias retirada da população de 812. O agrupamento ocorreu de acordo com o período estudado.

Após a seleção das amostras, foram realizados novamente os testes estatísticos com o coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de Willmott (d) e o teste não-paramétrico de Mann-Whitney.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Muitos são os estudos que descrevem a importância de estimar a ET_o por metodologia indireta, quando a medida real por lisímetro não está disponível em campo. Vasta é a quantidade de estudos que comparam localmente, a eficiência dos modelos empíricos com o modelo de Penman-Monteith (FAO 56), na estimativa da ET_o . Em contrapartida, poucos são os trabalhos que descrevem o ajuste local desses modelos, para a determinação da evapotranspiração.

A Tabela 3 apresenta o desempenho dos modelos originais e ajustados, na estimativa da ET_o , em comparação ao modelo de referência Penman Monteith/FAO 56. Dos modelos originais, apenas os modelos Thornthwaite e Camargo não apresentaram diferença significativa dos dados, em relação ao valor de referência. Neste caso o modelo pode ser aplicado para as condições climáticas do município em estudo e não necessita de ajuste. Já os demais modelos demonstram a necessidade de serem ajustados de acordo com a localidade.

Destaca que o modelo Tomar e O'toole apresentou a maior diferença do valor estimado em comparação ao valor descrito por Penman Monteith/FAO 56, uma subestimativa de 57,36%.

Os modelos Blaney-Criddle, Camargo (1999) e Jensen e Haise, que apontaram valores superiores em 81,08%, 117,94%, e 72,09% respectivamente.

Tabela 3 – Análise estatística dos modelos empíricos (originais, ajustado e validação) em relação ao valor de referência Penman- (FAO 56)

Metodologia (mm.mês ⁻¹)	Original				Ajustado				Validação			
	$\bar{X}$	M_e	σ	p	$\bar{X}$	M_e	σ	p	$\bar{X}$	M_e	σ	p
Thornthwaite (1948)	72,78	67,38	26,11	0,574	71,78	64,65	25,60	0,771	72,89	66,34	28,56	0,814
Blaney-Criddle (1950)	126,41	123,15	33,04	0,000*	69,67	62,80	25,92	0,982	74,32	73,84	29,63	0,954
Camargo et al. (1999)	152,14	159,87	59,91	0,000*	67,42	68,11	26,26	0,726	68,29	74,67	31,04	0,862
Penman Monteith/FAO 56**	69,81	64,83	26,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Metodologia (mm.dia ⁻¹)	Original				Ajustado				Validação			
	$\bar{X}$	M_e	σ	p	$\bar{X}$	M_e	σ	p	$\bar{X}$	M_e	σ	p
Makkink (1957)	3,19	3,10	1,13	0,000*	2,64	2,57	0,92	0,025*	2,63	2,61	0,93	0,099
Turc (1961)	2,45	2,37	0,82	0,209	2,69	2,56	0,94	0,007*	2,69	2,57	0,95	0,040*
Jensen e Haise (1963)	4,44	4,16	1,75	0,000*	2,56	2,39	1,07	0,927	2,56	2,40	1,07	0,717
Camargo (1971)	2,90	2,84	1,04	0,000*	2,66	2,68	0,85	0,017*	2,66	2,62	0,85	0,039*
Priestley-Taylor (1972)	2,45	2,34	1,37	0,007*	2,28	2,17	1,30	0,000*	2,26	2,15	1,31	0,000*
Linacre (1977)	3,21	3,09	0,91	0,000*	2,51	2,43	0,86	0,498	2,53	2,39	0,89	0,930
Tomar e O'toole (1980)	1,10	1,10	0,07	0,000*	2,69	2,68	0,80	0,002*	2,67	2,69	0,82	0,027*
Hargreaves-Samani (1985)	3,80	3,69	1,22	0,000*	2,61	2,50	0,94	0,308	2,62	2,55	0,94	0,246
Abtew (1996)	2,83	3,82	2,14	0,000*	2,66	2,65	0,85	0,008*	2,65	2,66	0,87	0,064
Bruin e Stricker (2000)	2,28	2,23	1,24	0,000*	2,32	2,65	0,85	0,000*	2,29	2,25	1,27	0,003*
Penman Monteith/FAO 56**	2,58	2,46	1,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legenda: “*” significativo para nível de 5% do teste de Mann-Whitney, “ d ” índice de Willmott e “ r ” Coeficiente de correlação de Pearson, “***” valor de referência da evapotranspiração, “ $\bar{X}$ ” média, “ M_e ” mediana, “ σ ” desvio padrão e “ p ” p-valor.

Os três modelos foram desenvolvidos para condições de aridez e por isso tendem superestimar valores de ET_o em clima úmido (SENTELHAS et al., 2010).

Apesar dos modelos originais apresentarem valores superiores ao de referência, apenas as equações Thornthwaite, Turc, Camargo e Priestley-Taylor alcançaram valores próximos ao apresentando por Penman Monteith/FAO 56. Resultado similar foi apresentado por Santana et al. (2018), para os modelos de Turc, Priestley-Taylor e Camargo na estimativa da ET_o para Balsas/MA, onde apresenta uma classificação climática de AW (tropical quente e úmido).

Analisando os modelos ajustado, observa-se que os modelos Thornthwaite, Blaney-Criddle, Camargo (1999), Jensen e Haise, Linacre e Hargreaves-Samani não apresentaram diferença significativa entre os seus valores estimados e o valor obtido por Penman Monteith/FAO 56. Esses resultados colaboram para a importância de realizar ajustes e estudos relacionados à essa área. Ferreira et al. (2018), também confirmou que o ajuste do modelo de Hargreaves-Samani foi satisfatório para estimar a ET_o em seis localidades de Minas Gerais.

Todos os modelos ajustados apresentaram valores médio da ET_o próximo ao valor médio estimado por Penman Monteith/FAO 56. As maiores diferenças foram apresentadas nos modelos Turc e Tomar e O'toole, ambos com $0,11 \text{ mm. dia}^{-1}$ na escala diária, e no modelo Thornthwaite com $1,97 \text{ mm.dia}^{-1}$ na escala mensal.

Na validação o modelo Camargo (1999) subestimou em 7,14% a ET_o , e os modelos Thornthwaite e Blaney-Criddle superestimaram em 0,88% e 1,06% respectivamente, sobre o modelo de referência. Os modelos de período diário, Priestley-Taylor e Bruin e Stricker subestimaram a ET_o em 11,72% e 10,55% respectivamente.

Severas variações de dados meteorológicos podem provocar efeitos relevantes nos valores da ET_o , quanto menor for a escala de tempo utilizada (SANTIAGO et al., 2002). Neste sentido, para os modelos ajustados, que apontaram diferença significativa entres as médias estimadas e o valor apresentado por Penman Monteith/FAO 56, foi proposto análise do desempenho da ET_o acumulada em 3, 5 e 7 dias. Os resultados dos ajustes são descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Análise estatística dos modelos ajustados para períodos de três, cinco e sete dias

Metodologia	Período – 3 dias				Validação			
	$\bar{X}$	r	d	p	$\bar{X}$	r	d	p
Makkink (1957)	7,95	0,87	0,92	0,242	7,92	0,86	0,91	0,762
Turc (1961)	8,09	0,91	0,94	0,115	8,09	0,92	0,94	0,272
Priestley-Taylor (1972)	6,90	0,92	0,93	0,005*	6,82	0,93	0,93	0,071
Bruin e Stricker (2000)	7,99	0,81	0,86	0,153	7,96	0,80	0,85	0,376
Camargo (1971)	8,00	0,91	0,94	0,166	8,02	0,91	0,94	0,242
Tomar e O'toole (1980)	8,08	0,81	0,85	0,069	8,05	0,80	0,83	0,261
Abtew (1996)	7,99	0,81	0,86	0,153	7,96	0,80	0,85	0,376
Penman Monteith/FAO 56**	7,77	-	-	-	7,70	-	-	-
	Período – 5 dias				Validação			
	$\bar{X}$	r	d	p	$\bar{X}$	r	d	p
Makkink (1957)	13,23	0,89	0,92	0,384	17,19	0,93	0,96	0,607
Turc (1961)	13,47	0,92	0,94	0,121	7,55	0,95	0,97	0,451
Priestley-Taylor (1972)	11,44	0,93	0,93	0,328	14,78	0,95	0,96	0,193
Bruin e Stricker (2000)	13,31	0,84	0,86	0,320	17,28	0,89	0,93	0,578
Camargo (1971)	13,31	0,93	0,96	0,057	17,39	0,97	0,96	0,513
Tomar e O'toole (1980)	13,45	0,84	0,85	0,207	17,46	0,88	0,92	0,505
Abtew (1996)	13,31	0,84	0,86	0,321	17,27	0,89	0,93	0,578
Penman Monteith/FAO 56**	12,93	-	-	-	16,68	-	-	-
	Período – 7 dias				Validação			
	$\bar{X}$	r	d	p	$\bar{X}$	r	d	p
Makkink (1957)	18,34	0,91	0,92	0,551	18,47	0,90	0,90	0,838
Turc (1961)	18,85	0,95	0,95	0,309	18,87	0,94	0,94	0,605
Priestley-Taylor (1972)	15,99	0,95	0,93	0,066	15,90	0,95	0,93	0,288
Bruin e Stricker (2000)	18,62	0,88	0,87	0,551	18,57	0,85	0,84	0,873
Camargo (1971)	18,62	0,94	0,96	0,278	18,69	0,95	0,97	0,430
Tomar e O'toole (1980)	19,03	0,86	0,86	0,286	18,77	0,85	0,82	0,767
Abtew (1996)	18,61	0,88	0,87	0,551	18,57	0,85	0,84	0,873
Penman Monteith/FAO 56**	18,09	-	-	-	17,95	-	-	-

Legenda: “*” significativo para nível de 5% do teste de Mann-Whitney, “ d ” índice de Willmott e “ r ” coeficiente de correlação de Pearson, “***” valor de referência da evapotranspiração, “ $\bar{X}$ ” média e “ p ” p-valor.

Para período de 3 dias, apenas o modelo de Priestley-Taylor apresentou diferença significativa, em relação ao valor de referência. Uma subestimativa da ET_o em 11,2%. Entretanto apresentou correlação com os valores indicados por Penman Monteith/FAO 56, apresentado $r = 0,92$ e $d = 0,93$.

Nos períodos de 5 e 7 dias, todos os modelos não apresentaram diferença significativa entre os valores estimados e o valor de referência. No entanto o modelo de Priestley-Taylor novamente subestimou a ET_o em 11,56% para 5 dias e 11,61% para sete dias.

O modelo Camargo apresentou, para o período de sete dias, os maiores valores do índice de Willmott e do coeficiente de correlação ($d = 0,96$ e $r = 0,93$ respectivamente). A eficiência do modelo Camargo, também foi verificada por Tagliaferre et al. (2010), que relata bom desempenho do modelo, bem como de Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani e Turc na estimativa da ET_o para o município de Eunápolis - Ba, nos períodos de 5 e 7 dias. Para Seropédica - RJ também foi constatado que a ET_o estimada por Makkink e Camargo, no acumulado de cinco dias, apresentaram valores próximos aos de referência do estudo, configurando ser uma alternativa de aplicação (Barros et al., 2009).

Observando a validação apenas o modelo Priestley-Taylor subestimou em média 11,41% a ET_o , nos três períodos avaliados. No entanto não apresentou diferenças significativas entre as medianas analisadas, de acordo com o índice p-valor.

A Tabela 5 apresenta a acurácia dos modelos originais e ajustados, na estimativa da ET_o . Para todos os modelos calibrado, houve redução dos índices que mensura o erro dos modelos. O mesmo pode ser observado em Sales et al. (2018), com ajuste de modelos para o município de São Mateus – ES. Em seu trabalho o autor descreve que todos os modelos ajustados apresentaram erros inferiores a 25%.

Por serem desenvolvidas para condições de clima úmido as equações, originais e ajustadas, dos modelos de Thornthwaite, Turc, Makkink e Camargo apresentaram boa acurácia na estimativa da ET_o para Botucatu/SP. O mesmo desempenho é demonstrado por Melo e Fernandes (2012), na estimativa da ET_o para Uberaba-MG, classificado em AW, em relação aos modelos originais.

A equação original de Turc exibiu os menores valores das métricas, mas subestimou a ET_o conforme $MBE = - 0,13$. Já para as equações calibrados, Hargreaves-Samani apresentou a melhor acurácia, indicado por $RMSE = 0,42$ e $MAE = 0,33$. Ao ser calibrado, o modelo Hargreaves-Samani também apresentou redução

Tabela 5 – Acurácia dos modelos empíricos (ajustados, originais e validação) em relação ao valor de referência Penman-Monteith (FAO - 56)

Metodologia – Mensal	Original					Ajustado				
	MAE	MBE	RMSE	<i>r</i>	<i>d</i>	MAE	MBE	RMSE	<i>r</i>	<i>d</i>
Thornthwaite (1948)	8,94	2,77	11,18	0,91	0,91	7,47	1,97	9,04	0,94	0,97
Blaney-Cridde (1950)	56,59	56,59	59,08	0,85	0,44	6,91	-0,16	8,50	0,94	0,97
Camargo et al. (1999)	86,09	82,33	91,99	0,80	0,37	9,09	-2,40	11,98	0,88	0,94
Metodologia – Diária	Original					Ajustado				
	MAE	MBE	RMSE	<i>r</i>	<i>d</i>	MAE	MBE	RMSE	<i>r</i>	<i>d</i>
Makkink (1957)	0,73	0,61	0,87	0,84	0,84	0,46	0,06	0,57	0,84	0,91
Turc (1961)	0,48	-0,13	0,57	0,86	0,90	0,38	0,11	0,50	0,88	0,94
Jensen e Haise (1963)	1,89	1,85	2,08	0,89	0,60	0,38	-0,02	0,48	0,90	0,95
Camargo (1971)	0,48	0,32	0,62	0,87	0,90	0,42	0,08	0,54	0,87	0,92
Priestley-Taylor (1972)	0,92	0,53	0,66	0,90	0,92	0,50	-0,30	0,66	0,90	0,92
Linacre (1977)	0,91	0,62	1,21	0,45	0,54	0,57	-0,07	0,71	0,75	0,85
Tomar e O'toole (1980)	1,49	-1,48	1,79	0,69	0,70	0,54	0,10	0,67	0,78	0,86
Hargreaves-Samani (1985)	1,22	1,22	1,31	0,92	0,74	0,33	0,02	0,42	0,92	0,96
Abtew (1996)	1,30	1,25	1,47	0,78	0,65	0,54	0,06	0,66	0,78	0,87
Bruin e Stricker (2000)	2,11	2,09	2,29	0,88	0,91	0,54	-0,26	0,08	0,88	0,92

Legenda: “MAE” Erro médio absoluto, “MBE” Erro absoluto médio, “RMSE” Raiz do erro quadrático médio, “*d*” Índice de Willmott e “*r*” Coeficiente de correlação de Pearson.

do valor de RMSE em Adria et al. (2021), para estimativa da *ET_o* para regiões áridas e semiáridas do Marrocos.

A equação Thornthwaite apresentou o menor valor do erro absoluto médio, tanto para o modelo original, quanto para o modelo ajustado (8,94 e 7,47 respectivamente). No entanto não houve a mesma observação por parte de Ribeiro et al. (2015), onde os autores descrevem que o modelo original Thornthwaite não obteve desempenho em estimar a *ET_o* para Sobral – CE, classificado com clima em BSw'h (clima quente).

Para a escala diária, o menor valor obtido de MAE foi com os modelos originais Turc e Camargo (ambos apresentando um valor de 0,48) e o modelo ajustado Hargreaves-Samani, com 0,33. Para o município de Rio Branco/AC, o modelo original de Turc também apresentou desempenho na estimativa da evapotranspiração, sendo indicado para região de estudo, que descreve o clima úmido (SOUZA; SOUSA, 2020)

Verificando o índice RSME, os modelos originais, na escala mensal, Thornthwaite e Blaney-Criddle indicaram valores de 11,18 e 8,5 nesta ordem. Entretanto, para os modelos de escala diária, a equação original de Turc exibiu RMSE = 0,57 e o modelo ajustado Bruin e Stricker, 0,08. A importância do ajuste do modelo Turc também foi observada por Brixner et al. (2018), para estimativa da *ET_o* em Torre-RS, que é uma região de clima úmido.

As maiores reduções das métricas, após o ajuste dos coeficientes, podem ser observadas nos modelos desenvolvidos para condições de aridez, como os de Blaney-Criddle, Camargo (1999) e Jensen e Haise. A redução média desses modelos foram 91,01%, 93,11% e 85,97% respectivamente.

Na validação dos modelos as métricas MAE e RMSE, para os modelos de período diário, apresentaram similaridades aos valores indicados nos modelos ajustados. Para os modelos mensais, as métricas exibiram elevação em seus resultados, quando comparados com o ajuste dos modelos.

Analisando o desempenho dos modelos originais em relação ao do índice *d*, Blaney-Criddle e Camargo (1999) baixa correlação com os valores de referência. No entanto no trabalho apresentado por Barros et al. (2017), o modelo Blaney-Criddle apresentou *d* = 0,75 na escala diária, para estimativa da evapotranspiração em Canindé – Se de clima semiárido.

Para escala diárias os modelos originais Jensen e Haise, Linacre, Tomar e O'toole, Abtew e Bruin e Stricker, também apresentaram valores inferiores do índice d . Em Gurski et al. (2018), trabalho relacionado com a ET_o para vários municípios do estado do Paraná, o modelo Linacre também não apresentou desempenho adequado para a cidade de Curitiba- PR.

Todos os modelos ajustados apresentaram valores iguais ou superiores a 0.85 do índice d . O ajuste elevou os valores d e r , caracterizando desempenho adequado para as equações calibradas.

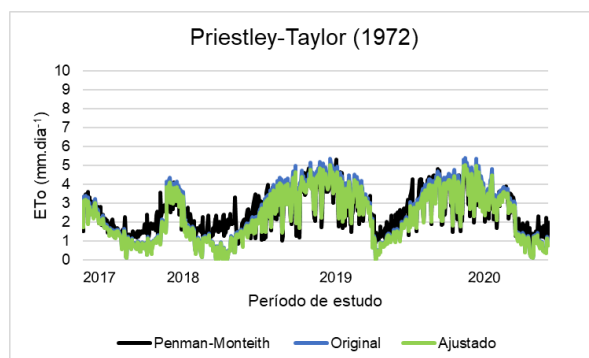
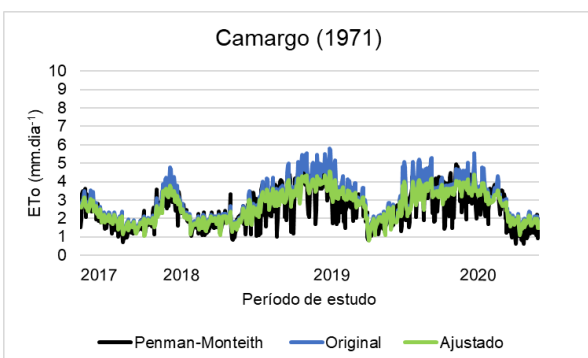
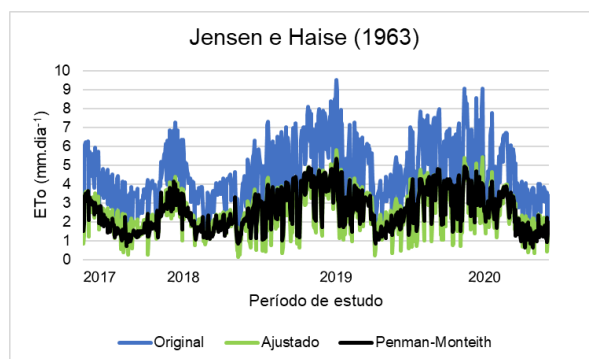
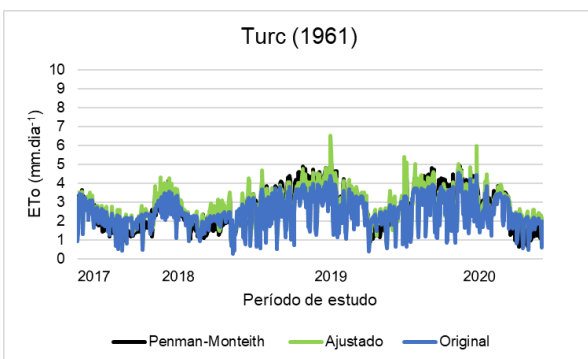
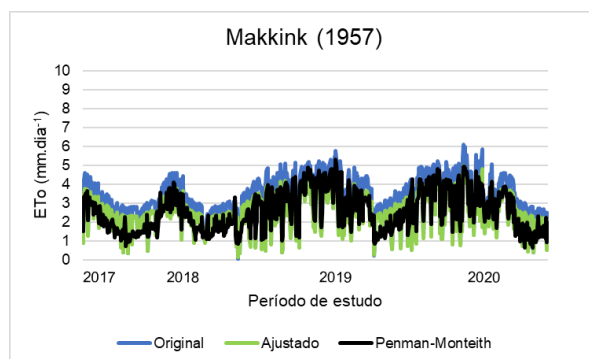
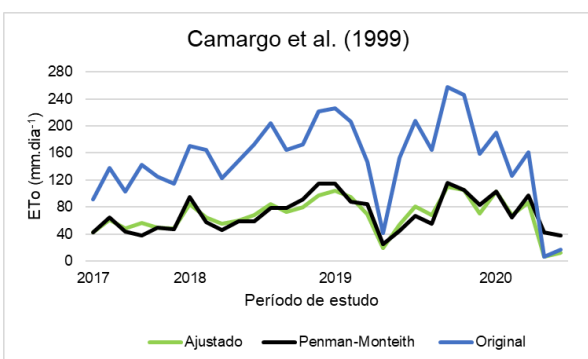
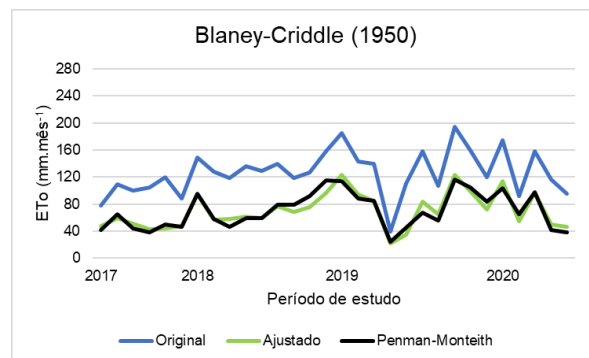
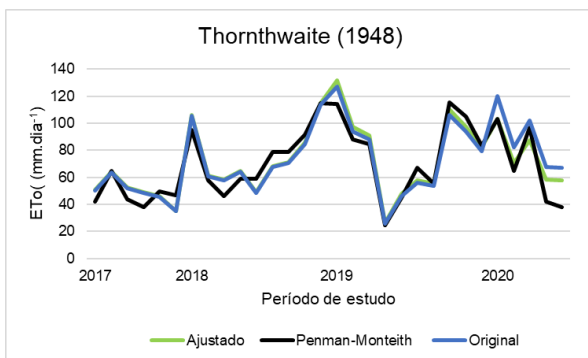
Observando a correlação entre os valores estimados com os modelos originais e o valor de quantificado por Penman Monteith/FAO 56, o modelo Linacre apresentou correlação de 0,45. A baixa correlação desse modelo, pode ser observada em Sanches et al. (2015). No entanto o mesmo autor descreve que a calibração dos modelos Jensen e Haise, Makkink e Priestley-Taylor, para região Norte do Brasil, apresentaram bons resultados.

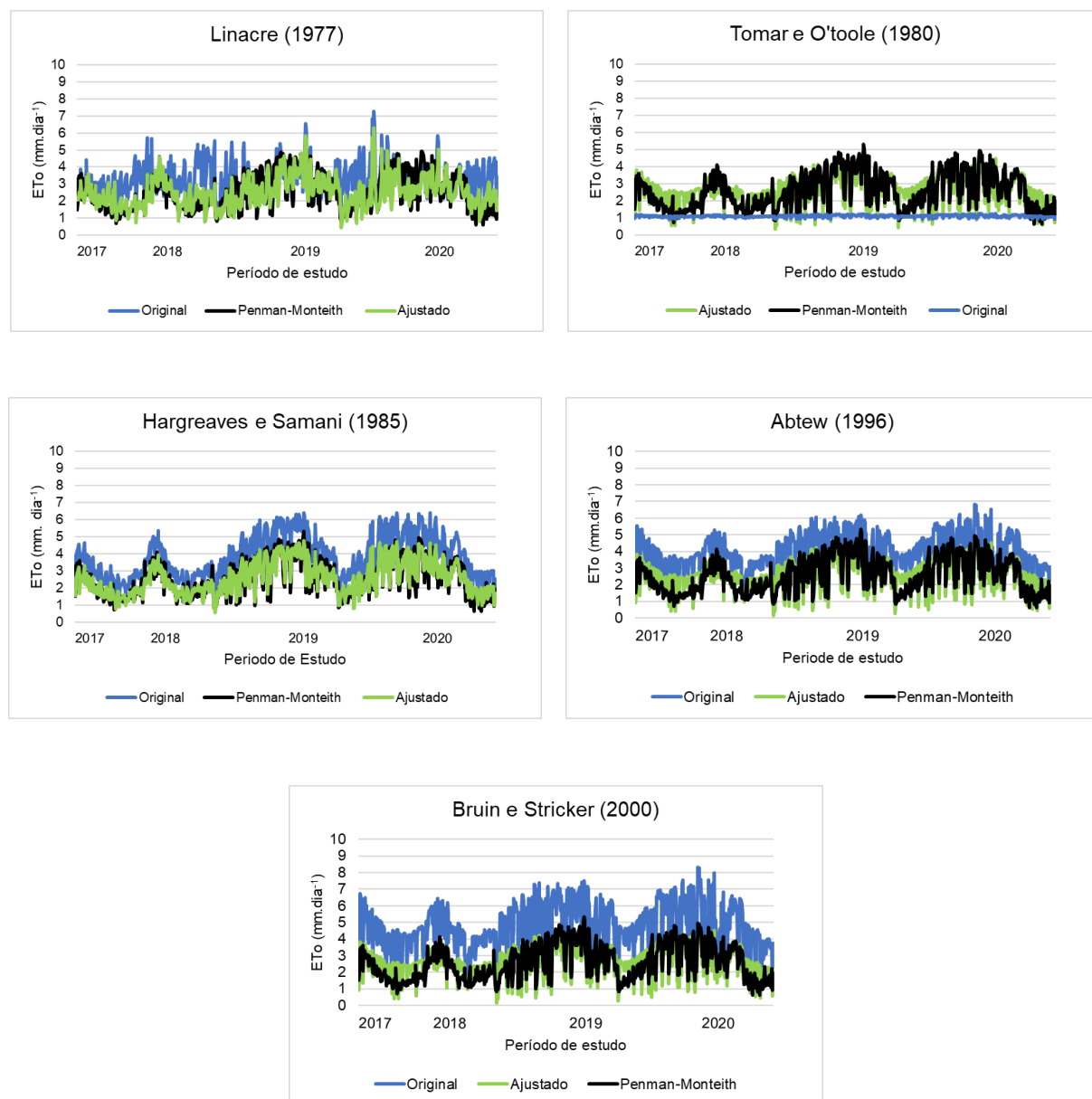
Os demais modelos originais apresentaram valores de r superiores à 0,78, indicando bom desempenho dos modelos na estimativa da ET_o . Em relação os modelos ajustados, todos apresentaram valores r acima de 0,75. Destaque para os modelos Blaney-Criddle e Thornthwaite, que apontaram um valor de $r = 0,94$

Para o estudo em questão, os modelos ajustado e original de Priestley-Taylor subestimaram a ET_o , mas ambos apresentaram valores de d e r satisfatório, 0,90 e 0,92 respectivamente. Trabalho apresentado por Ribeiro et al. (2020), também apontou que o modelo Priestley-Taylor, obteve bons resultados em estimar a ET_o para o município de Lavras – MG, com condição climática classificada em Cwa.

De forma visual, os valores da ET_o estimados por meio dos modelos originais e ajustados estão representados graficamente na Figura 2. O objetivo da análise gráfica é verificar a tendência dos modelos na estimativa da ET_o em relação ao modelo Penman Monteith/FAO 56.

Figura 2 – Desempenho gráfico dos models ajustados e originais em relação ao modelo de referência de Penman-Monteith (FAO 1998)





Fonte: Autor

Verifica-se que todos os modelos, originais e calibrados, apresentaram a mesma distribuição da evapotranspiração durante o período de estudo. Todos os modelos seguiram a mesma tendência do modelo da FAO 56, com aproximação das curvas.

Os modelos originais e mensais Thornthwaite, Camargo (1999) e Blaney-Criddle apresentaram maiores amplitudes dos dados no ano de 2019, com valores próximos à 140 mm.mês⁻¹, 200 mm.mês⁻¹ e 250 mm.mês⁻¹ respectivamente. Também é observado entre os anos de 2019 e 2020 as maiores amplitudes dos modelos diários, indicando valores entre 5 mm.dia⁻¹ e 7 mm.dia⁻¹. No entanto o modelo TO manteve seus valores, em todo o período de estudo, próximo a 1 mm.dia⁻¹.

Tabela 6 – Coeficientes ajustado dos modelos empíricos, para o município de Botucatu-SP, de acordo com o modelo de referência Penman-Monteith (FAO 56)

Métodos	Original					Ajustado				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Thornthwaite (TH)	16	10	-	-	-	10	12	-	-	-
Blaney-Criddle (BC)	0,46	8,13	-	-	-	0,59	-0,39	-	-	-
Camargo et al. (CM)	16	10	0,36	3	-	11	4	0,14	14	-
Makkink (MA)	0,61	0,12	-	-	-	0,49	-0,03	-	-	-
Turc (TU)	0,013	15	0,0238846	50	-	256,021	774561	0,0247546	216	-
Jensen e Haise (JH)	0,025	0,078	-	-	-	0,007	-0,01	-	-	-
Camargo (CA)	0,01	-	-	-	-	0,009	-	-	-	-
Priestley e Taylor (PT)	1,26	-	-	-	-	1,18	-	-	-	-
Linacre (LI)	500	100	80	15	0,006	171	110	35	-1	0,010
Tomar e O'toole (TO)	0,9	0,011	-	-	-	0,8	0,141	-	-	-
Hargreaves e Samani (HS)	0,0023	17,8	0,5	-	-	0,52	3,8	-	-	-
Abtew (AB)	0,53	-	-	-	-	0,37	-	-	-	-
Bruin e Stricker (BS)	0,86	-	-	-	-	0,49	-	-	-	-

Para os modelos ajustados Blaney-Criddle e Camargo (1999) o maior valor observado localizou-se próximo à 100 mm.mês⁻¹. Nos modelos ajustados e diários, a amplitude dos dados compreendeu-se no intervalo de 4 a 5 mm.dia⁻¹, para os anos de 2019 e 2020. Para os anos de 2017 e 2018, a amplitudes da *ET_o* foram aproximadamente 3 mm.dia⁻¹ e 4 mm.dia⁻¹, respectivamente. A Tabela 6 apresenta os valores dos coeficientes dos modelos originais e ajustados, que estimaram a *ET_o* para o município em estudo.

2.4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados comparativos e validação estatística desse trabalho, conclui-se:

1. A utilização de ajuste dos modelos, para localidade de aplicação, se faz necessária devido a performance na estimativa da *ET_o*. Todos os modelos calibrados apresentaram estimativas e comportamento semelhantes ao apresentado por Penman Monteith (FAO 56).
2. Dentre os modelos originais, Thornthwaite, Camargo, Turc e Priestley-Taylor demonstraram ser robusto, pois indicaram boa exatidão em suas previsões. O modelo Thornthwaite é o mais indicado como alternativa para estimar *ET_o* para o município de Botucatu – SP.
3. Modelos que utilizam variáveis de radiação em suas equações, tendem a superestimar a *ET_o* para o município de estudo.
4. A utilização de escalas de tempo maiores que a diária, na estimativa a *ET_o*, apresentou ser uma ótima opção, pois apresentaram médias semelhantes a ao apresentado Penman Monteith/FAO 56. com alto desempenho. Com isso sua utilização em campo torna-se essencial para projetos de irrigação e economia de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- ABTEW, W. Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in south Florida. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 32, n. 3, p. 465-473, 1996.
- ADAMALA, S. Temperature based generalized wavelet-neural network models to estimate evapotranspiration in India. **Information processing in agriculture**, v. 5, n. 1, p. 149-155, 2018.
- ALLEN, R. G. *et al.* Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, **Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- BARROS *et al.* Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em perímetro irrigado no baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v. 11, nº 8, Fortaleza, p. 2183 - 2193, nov./dez. 2017.
- BARROS, V. R. *et al.* Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.
- BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. D., "Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data", U.S. **Department of Agriculture Soil Conservation Service**, SCS - TP - 96, Washington, D.C., ago, 1950.
- BRITO, Khaíck; CALUMBY, Rodrigo. Ferramentas de análise estatística e correlação para sistemas de recuperação da informação. In: **Anais da XIX Escola Regional de Computação Bahia, Alagoas e Sergipe**. SBC, 2019. p. 136-141.
- BRIXNER, G. *et al.* Ajuste das equações de estimativa da evapotranspiração de referência para Torres-RS. **Revista da Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa-Congrega Urcamp**, Bagé, v. 15, n. 15, p. 706-720, 2018.
- BRUIN, H. A. R.; STRICKER, J. N. M. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. *Hydrological sciences journal*, v. 45, n. 3, p. 391-406, 2000.
- CAMARGO, A. P. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 28p. Boletim Técnico, v. 116, 1971.
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.
- CAMARGO, A. P.; MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C. 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**, v.7 n.2, p.251-257, 1999.
- COBANER, M. Estimativa de evapotranspiração por dois sistemas diferentes de inferência neuro-fuzzy. *Journal of Hydrology*, v. 398, n. 3-4, p. 292-302, 2011.

DE COIMBRA RIBEIRO, J P. *et al.* Desempenho dos métodos de Hargraves e Priestley-Taylor na estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Augustus**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 49, p. 199-208, 2019.

DE OLIVEIRA, J. C.; BELCHIOR, F. N. Energia elétrica produzida por um sistema fotovoltaico versus dados meteorológicos—uma aplicação da correlação de pearson. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 5, p.52075-52088, mai. 2021.

DE SALES, R. A. *et al.* Ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da evapotranspiração de referência para São Mateus, ES. **Irriga**, Botucatu, v. 23, n. 1, p. 154-167, 2018.

DE SOUZA, M. L. A.; DE SOUSA, J. W. Avaliação do desempenho de métodos empíricos para a estimativa da evapotranspiração de referência em Rio Branco, Acre: Avaliação do desempenho de métodos empíricos para a estimativa da evapotranspiração de referência em Rio Branco, Acre. **Scientia Naturalis**, Rio Branco, v. 2, n. 1, p. 254-267, 2020.

DIDARI, S.; AHMADI, S. H. Calibration and evaluation of the FAO56-Penman-Monteith, FAO24-radiation, and Priestly-Taylor reference evapotranspiration models using the spatially measured solar radiation across a large arid and semi-arid area in southern Iran. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 136, n. 1, p. 441-455, 2019.

DOOREMBOS, J.; PRUIT, W. O. Guidelines for predicting Crop Water Requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, n. 24, 2. ed. Rome, 1977. 144p.

EL MOUATASIM, A.; ETTAHIRI, A. Stochastic perturbation of Frank-Wolfe method for nonconvex programming problems. **Annals of the University of Craiova-Mathematics and Computer Science Series**, v. 47, n. 2, p. 314-330, 2020.

ESCOBEDO, J.F.; GOMES, E.N.; OLIVEIRA, A.P.; SOARES, J. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. **Renewable Energy**, v. 36, p. 169-178, 2011.

FAMILYSEARCH. **Botucatu, São Paulo, Brasil – Genealogia**. Disponível em: https://www.familysearch.org/pt/wiki/Botucatu,_São_Paulo,_Brasil_-_Genealogia Acesso em 24 ago. 2022.

FERREIRA, L. B. *et al.* Calibration methods for the Hargreaves-Samani equation. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 42, n.1, p.104-114, jan. /fev. 2018.

FIALLOS, G. La Correlación de Pearson y el proceso de regresión por el Método de Mínimos Cuadrados. **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, v. 5, n. 3, p. 2491-2509, 2021.

FRANCO, J. R. *et al.* Análise Comparativa Entre Medidas Meteorológicas da Estação Convencional e Automática da Fazenda Lageado no Município de Botucatu, São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, p. 223-232, 2022.

FREVERT, D. K.; HILL, R. W.; BRAATEN, Bruce C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 109, n. 2, p. 265-270, 1983.

GURSKI, B. C.; JERSZURKI, D.; DE SOUZA, J. L. Alternative reference evapotranspiration methods for the main climate types of the state of Paraná, Brazil **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.53, n.9, p.1003-1010, sept. 2018.

HADRIA, R. *et al.* Comparative assessment of different reference evapotranspiration models towards a fit calibration for arid and semi-arid areas. **Journal of Arid Environments**, v. 184, p. 104318, 2021.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division, v. 89, p. 15-41, 1963.

JÚNIOR, J. C. F. B. *et al.* Equação de Hargreaves-Samani calibrada em diferentes bases temporais para Sete Lagoas, MG. **Revista Engenharia na Agricultura-Revang**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 38-49, 2017.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*, **Justus Perthes**, Gotha, p.91-102, 1928.

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural meteorology**, v. 18, n. 6, p. 409-424, 1977.

LOPES SOBRINHO, O. P. *et al.* A cultura da cana-de-açúcar (*saccharum officinarum*) e o manejo da irrigação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá (PR). v. 12, n.4, p. 1605-1625. 2019

MAKKINK, G. F. Ekzameno de la formula de Penman. **Neth. J. Agric. Sci**, v. 5, p. 290-305, 1957.

MARINHO, F. P. *et al.* Influência dos fenômenos climáticos do El- Niño e da La-Niña na previsão da média diária de irradiação global na cidade de fortaleza. **Revista Científica Acertte**, v. 2, n. 2, p. e2253-e2253, 2022.

MELO, G. L.; FERNANDES, A. L. T. Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, State of Minas Gerais, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, p. 875-888, 2012.

PRIESTLEY, C. Henry Brian; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly weather review**, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

RIBEIRO, A. A. *et al.* Avaliação de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência em Sobral - CE. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 7, n. 4, p. 71-81, dez. 2015.

SANCHES, F. M. *et al.* Estimativa da evapotranspiração de referência na região norte do Brasil. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, v. 13, n. 2, p. 19-31, 2015.

SANTANA, J. *et al.* Equações de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) para a região de Balsas - MA. **Enciclopédia biosfera**, Goiânia, v. 15, n. 27, p.1-14, 2018.

SANTIAGO, A. V. *et al.* Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decendial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.10, n.1, p.57-66, 2002.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural water management**, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.

TAGLIAFERRE, C. *et al.* 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.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geography Review**, v.38, p.55-94, 1948.

TOMAR, V. S.; O'TOOLE, J. C. Water use in lowland rice cultivation in Asia: a review of evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v. 3, n. 2, p. 83-106, 1980.

TURC, L. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. **Annals of Agronomy**, v.12, n.1, p.13-49, 1961.

TRIGO, I. F. *et al.* Validation of reference evapotranspiration from Meteosat Second Generation (MSG) observations. **Agricultural and forest meteorology**, v. 259, p. 271-285, 2018.

CAPÍTULO 3

EFICIÊNCIA DO SENSORIAMENTO REMOTO MODIS16 NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA O MUNICÍPIO DE BOTUCATU - SÃO PAULO

Efficiency of MODIS16 remote sensing in estimating evapotranspiration for the municipality of Botucatu - São Paulo

Eficiencia del sensor remoto MODIs16 y estimación de la evapotranspiración para el municipio de Botucatu - São Paulo

Ana Cláudia Marassa Roza Boso

Engenharia Rural e Socioeconomia/ Faculdade de Ciências Agrônômicas - Câmpus de Botucatu, Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho- UNESP

Localização – Botucatu, São Paulo, Brasil

E-mail: Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6317-9536>

Alexandre Dal Pai

Bioprocessos e Biotecnologia/ Faculdade de Ciências Agrônômicas - Câmpus de Botucatu, Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho- UNESP

Localização – Botucatu, São Paulo, Brasil

E-mail: Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1283-901X>

Resumo: Inúmeros são as metodologias que quantificam a evapotranspiração (ET) de uma cultura, sendo elas de forma direta (lisímetro) ou indireta (equação empíricas). No entanto, dependendo da situação em campo, ambos os métodos não são aplicáveis ou acessíveis para o produtor. Neste caso, técnicas diferenciadas, como o sensoriamento remoto, vêm obtendo espaço na estimativa da ET. Nessa perspectiva, o presente trabalho objetiva comprovar a eficiência do satélite MODIS16 (SR) na quantificação da evapotranspiração, para o município de Botucatu/SP, em relação aos valores apresentados pelo lisímetro e a equação de Penman-Monteith (FAO 56). Para obter uma relação entre cada associação de metodologia, foi desenvolvido uma constante k, que auxilia na análise dos dados. Os resultados demonstram que o modelo SR superestimou a ET em 5,42% e 12,19% em relação aos valores de PM e do lisímetro, respectivamente. Essa relação pode ser observada na razão entre SR/PM e SR/Lisímetro, que apresentaram valores de k em 1,13 e 1,20 respectivamente. Apesar dessa superestimativa do modelo SR, a similaridade entre os dados (21,37 mm/8dias – SR, 18,64 mm/8dias – Lisímetro, 20,27 mm/8dias – PM) permitem aplicabilidade do modelo SR na estimativa da ET, em condições climáticas apresentadas pelo município em estudo.

Palavras-chave: Penman-Monteith. Lisímetro. Satélite. Razão.

¹Capítulo redigido de acordo com as normas do periódico **Revista Brasileira de Climatologia**.

Abstract: There are countless methodologies that quantify the evapotranspiration (ET) of a crop, either directly (lysimeter) or indirectly (empirical equations). However, depending on the situation in the field, both methods are not applicable or accessible to the producer. In this case, different techniques, such as remote sensing, have gained space in the ET estimation. In this perspective, the present work aims to prove the efficiency of the MODIS16 (SR) satellite in the quantification of evapotranspiration, for the municipality of Botucatu/SP, in relation to the values presented by the lysimeter and the Penman-Monteith equation (FAO 56). To obtain a relationship between each methodology association, a k constant was developed, which helps in data analysis. The results demonstrate that the SR model overestimated the ET by 5.42% and 12.19% in relation to the PM and lysimeter values, respectively. This relationship can be observed in the ratio between SR/PM and SR/Lysimeter, which presented k values of 1.13 and 1.20 respectively. Despite this overestimation of the SR model, the similarity between the data (21.37 mm/8days – SR, 18.64 mm/8days – Lysimeter, 20.27 mm/8days – PM) allows the applicability of the SR model in estimating the ET, in climatic conditions presented by the municipality under study.

Keywords: Penman-Monteith. Lysimeter. Satellite. Reason.

Resumen: Calibri, Existen innumerables metodologías que cuantifican la evapotranspiración (ET) de un cultivo, ya sea directamente (lisímetro) o indirectamente (ecuaciones empíricas). Sin embargo, dependiendo de la situación en el campo, ambos métodos no son aplicables ni accesibles para el productor. En este caso, diferentes técnicas, como la teledetección, han ganado espacio en la estimación de la ET. En esa perspectiva, el presente trabajo tiene como objetivo probar la eficiencia del satélite MODIS16 (SR) en la cuantificación de la evapotranspiración, para el municipio de Botucatu/SP, en relación a los valores presentados por el lisímetro y la ecuación de Penman-Monteith (FAO 56). Para obtener una relación entre cada asociación metodológica, se desarrolló una constante k, que ayuda en el análisis de datos. Los resultados demuestran que el modelo SR sobrestimó la ET en 5,42% y 12,19% en relación a los valores de PM y lisímetro, respectivamente. Esta relación se puede observar en la relación entre SR/PM y SR/Lisímetro, que presentó valores de k de 1,13 y 1,20 respectivamente. A pesar de esta sobreestimación del modelo SR, la similitud entre los datos (21,37 mm/8 días – SR, 18,64 mm/8 días – Lisímetro, 20,27 mm/8 días – PM) permite la aplicabilidad del modelo SR en la estimación de ETo, en las condiciones climáticas que presenta el municipio en estudio.

Palabras clave: Penman-Monteith. Lisímetro. Satélite. Razón.

3.1 INTRODUÇÃO

Diversos são os componentes que influenciam no desenvolvimento de uma cultura, sendo o principal a evapotranspiração (*ET*). Por envolver a transpiração da planta e evaporação do solo, a *ET* é o elemento chave para quantificar as exigências hídricas de uma planta (ONGARATTO; BORTOLIN, 2021)

A *ET* pode ser determinada por metodologias diretas e indiretas, como o lisímetro de pesagem e modelos empíricos, respectivamente (MARTINS, 2019). Coberto por solo e uma camada fina de grama, o lisímetro de pesagem é o mais indicado para se determina a *ET*.

Por meio das células de carga, que quantifica entrada e saída de água o sistema quantifica a evapotranspiração diária. Entretanto a aquisição e manutenção desse equipamento se tornam inacessível em campo (DE SOUZA et al., 2022). Já as medidas indiretas são mais acessíveis e estimam a *ET* por meio de modelos matemáticos, utilizando dados meteorológicos.

A utilização de modelos empíricos depende das características climáticas do local e das variáveis meteorológicas disponíveis em campo. Cada metodologia empírica é aplicada para uma condição específica de clima, o que limita sua prática para qualquer condição climática (DE MACÊDO et al., 2018).

Na busca por uma metodologia que estima a *ET*, para qualquer localidade e condição climática, a equação de Penman-Monteith é recomendada pelo manual da FAO (Food and Agriculture Organization). Por se tratar de um modelo físico, que abrange os conceitos aerodinâmico e fisiológico da planta, o modelo proporciona resultados próximos ao valor real da evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). Apesar de ser o método mais completo, sua aplicabilidade em campo, também se limita nas variáveis meteorológicas que nem sempre estão disponíveis. Neste caso, a utilização de sensoriamento remoto vem obtendo espaço no monitoramento dos componentes agrônômicos.

Diversos são os satélites que permitem estimar a *ET*, entre eles o SEBAL, MODIS16 e o GLEAM. A sua aplicabilidade se torna acessível, pois necessitam de apenas uma ferramenta computacional. O modelo MODIS 16 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), desenvolvido pelo NASA e inserido na plataforma Google Earth Engine, estima a evapotranspiração por meio da equação de Penman-Monteith, inserido em seu algoritmo, e em junção com outros satélites que disponibilizam dados meteorológicos para a sua execução (MOREIRA; ADAMATTI; RUHOFF, 2018). Com escala global, sua resolução espacial é de 500 metros e sua base de dados trabalha com períodos de 8 dias, mensais e anuais (SILVA; MAGNONI; MANZIONE, 2021)

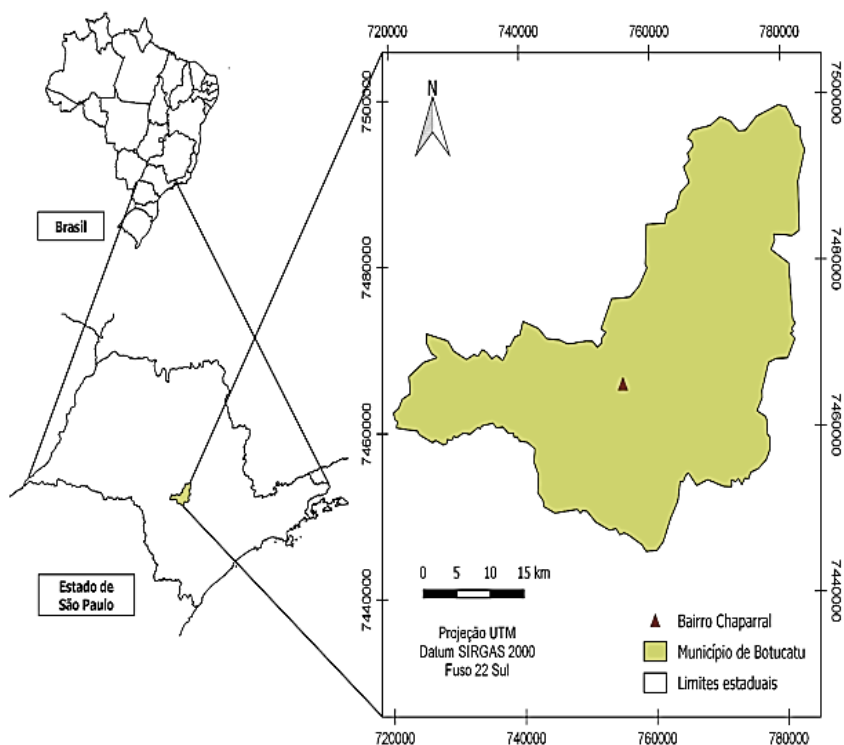
Diante do exposto, objetiva o presente trabalho em comparar o desempenho do sensoriamento remoto, na estimativa da evapotranspiração de referência, sobre os valores quantificados pelo lisímetro e equação de Penman-Monteith.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localidade do estudo

As análises sobre a evapotranspiração obtidas no presente estudo, foi realizada para as características do município de Botucatu/SP Figura 1. Suas coordenadas geográficas são 22°50' Sul, 48°25' Oeste e 786 m de altitude. Com 1483 Km², o município de Botucatu está localizado entre as bacias do rio Tietê e rio Pardo (IBGE, 2022). Seu clima é classificado, de acordo com Köppen, em Cwa (clima subtropical úmido).

Figura 1 – Localização do município de Botucatu/SP



Fonte: SILVA, 2020.

De acordo com Cunha e Martins (2009), a temperatura média anual é de 19,1°C, com variação entre 12°C e 29°C. O poder de evapotranspiração do município é de 945,15 mm, sendo a maior porcentagem no verão, com 33%.

3.2.2 Aquisição da evapotranspiração de referência

As medidas da evapotranspiração de referência (ET_o) foram obtidas por três metodologias: lisimetria, equação de Penman-Monteith (FAO-56) e sensoriamento remoto.

As medidas reais da (ET_o) foram adquiridas por meio do lisímetro de pesagem (Figura 2), instalado na Estação Evapotranspirométrica do Departamento de Bioprocessos da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Câmpus de Botucatu/SP. Toda a estrutura do local segue as recomendações da World Meteorological Organization e da FAO (Food and Agriculture Organization).

Figura 2 – Lisímetro de pesagem instalado no Departamento de climatologia UNESP- Botucatu



Fonte: MONTANHA, 2022.

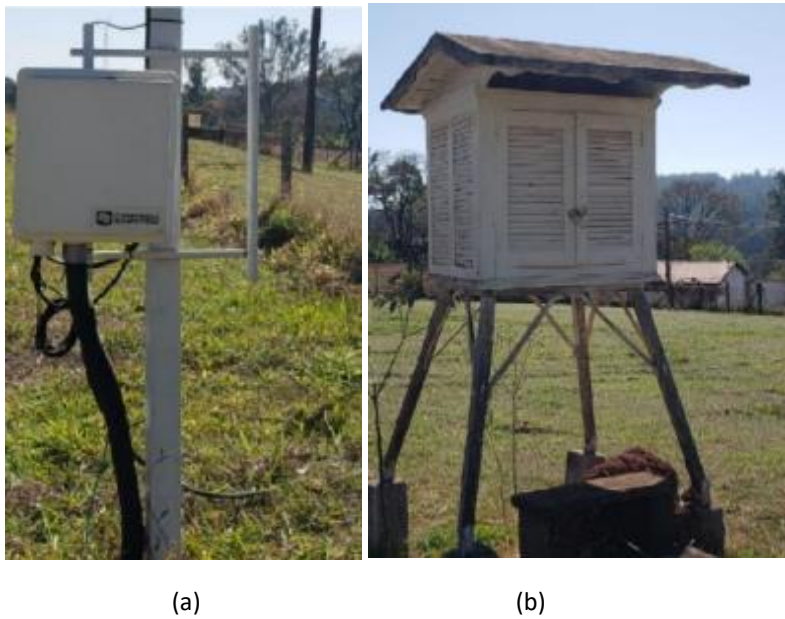
A estimativa da ET_o foi realizada por meio a equação de referência Penman-Monteith (FAO), que utiliza dados meteorológicos (Equação 1). Sua estrutura é composta pela radiação solar, fluxo de calor do solo, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e pressão do ar. Tais dados foram adquiridos pela estação meteorológica e radiométrica (Figura 3 e Figura 4), situadas no interior da Faculdade de Ciências Agronômicas (ALLEN et al.,1998).

$$(1) \quad ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \left[\frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{T_{med} + 273} \right]}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)}$$

onde R_n - saldo de radiação à superfície ($\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$), G - densidade do fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$), T - temperatura do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$); u_2 - velocidade de vento a 2 m de

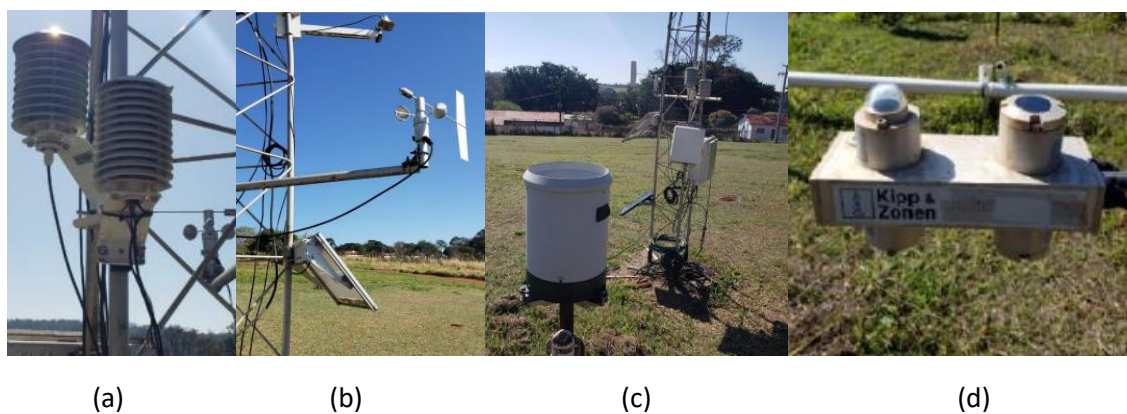
altura (m s^{-1}); e_s - pressão de vapor de saturação (kPa); e_a - pressão parcial de vapor (kPa); Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), e γ - coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Figura 3 – Estação Meteorológica automatizada (a) e convencional (b) da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo



Fonte: MONTANHA, 2022.

Figura 4 – Componentes da estação meteorológica e da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo: (a) Sensor de temperatura e umidade do ar; (b) Anemômetro; (c) Pluviômetro; (d) Saldo radiômetro.



Fonte: MONTANHA, 2022.

A coleta de dados compreendeu-se de março de 2017 a junho de 2020, com coleta de 1321 dias (Tabela 1). No entanto, após a calibração dos dados, foram utilizados apenas 812 dias (61% do total), na escala mensal e diária. A calibração dos dados constituiu em retirar os dias em que os equipamentos não realizaram medições, devido a manutenção dos mesmos. Após a coleta de dados e estimada a ET_o , foi realizado o agrupamento da ET_o para período de oito dias, pois o algoritmo do sensoriamento remoto trabalhar nesta escala de tempo.

Tabela 1 – Período de coleta das variáveis meteorológicas para o estudo

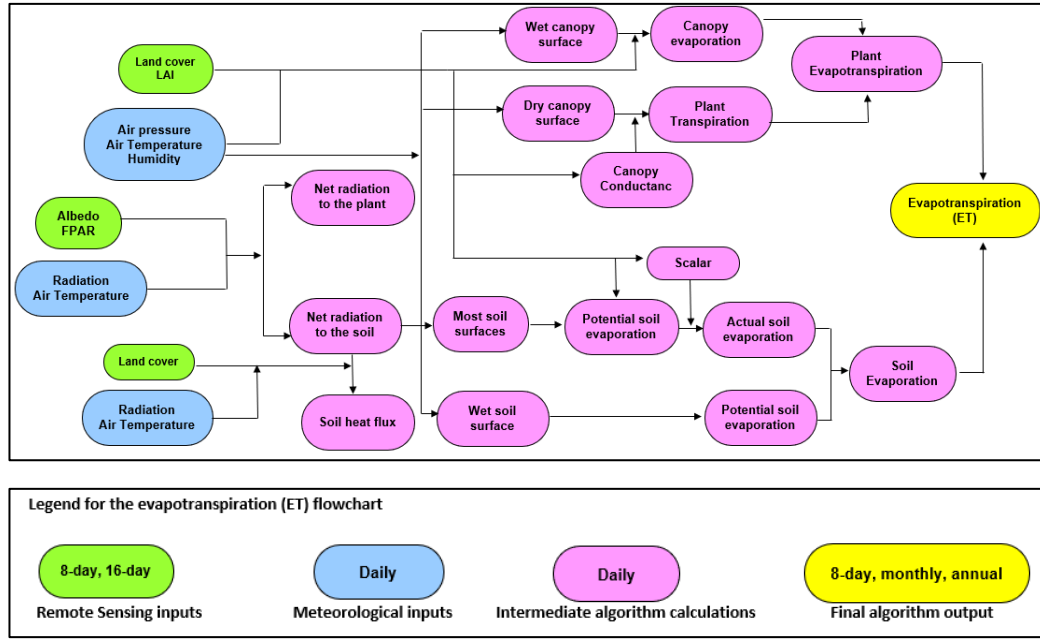
Período anual	Período mensal analisado											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul	Ago.	Set	Out.	Nov.	Dez.
2017			x	x	x	x	x	x				
2018			x		x	x	x	x	x	x	x	x
2019	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
2020	x	x	x		x	x						

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Para aquisição dos dados da evapotranspiração por meio do sensoriamento remoto, foi utilizado o modelo MOD16A2v006 Evapotranspiration/Latent Heat Flux, que está inserido na plataforma Google Earth Engine. O modelo MOD16 tem como objetivo estimar a evapotranspiração da superfície, utilizando a equação de Penman-Monteith e em conjunto os dados dos satélites Terra/MODIS e Aqua/MODIS (RUNNING; MU; ZHAO, 2017). Com uma resolução espectral é de 500m, o modelo disponibiliza os valores de evapotranspiração de referência e potencial para períodos de 8 dias, mensal e anual (SILVA; MAGNONI; MANZIONE, 2021).

Em seu algoritmo (Figura 5) a evapotranspiração é estimada com base nos fundamentos da equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965) (Equação 2), ajustado para o sensoriamento remoto.

Figura 5 – Algoritmo do sensoriamento remoto MOD16A2v006 Evapotranspiration/Latent Heat Flux



Fonte: MU; ZHAO; RUNNING (2013).

Seu sistema abrange dados metrológicos diários, albedo, propriedades da vegetação e cobertura da terra (LINS et al., 2021). Essa junção de dados fornece o algoritmo principal do modelo (Equação 3), que se divide em evaporação da superfície molhada do dossel (λE_{wet_c}), evaporação da superfície do solo (λE_{SOIL}) e transpiração vegetal (λE_{trans}) (HE et al., 2019).

$$(2) \quad \lambda E = \frac{s \times A' + \rho \times C_p \times \frac{(e_{sat} - e)}{r_a}}{s + \gamma \times (1 + \frac{r_s}{r_a})} = \frac{s \times A' + \rho \times C_p \times \frac{VPD}{r_a}}{s + \gamma \times (1 + \frac{r_s}{r_a})}$$

$$(3) \quad \lambda E = \lambda E_{wet_c} + \lambda E_{trans} + \lambda E_{SOIL}$$

onde VPD - déficit de pressão de vapor (kPa), C_p - capacidade calorífica específica do ar; γ - constante psicrométrica (kPa.°C⁻¹), r_s - resistência da superfície à evapotranspiração (s.m⁻¹), r_a - resistência aerodinâmica (s.m⁻¹), s - inclinação da curva relativa à pressão de vapor de água saturação (kPa.°C⁻¹), A' - energia disponível dividida entre calor sensível, calor latente e fluxos de calor do solo na superfície da terra (W.m⁻²) e ρ - fluxo de calor no solo (Kg.m⁻³).

Para obter o valor final da evapotranspiração por meio da equação 3, é necessário realizar um ajuste fornecido pelo modelo. De acordo com o algoritmo, realiza-se a multiplicação dos valores de saída pela escala 0.1.

Os dados de entrada incluem temperatura média do ar, temperatura mínima do ar, radiação solar incidente, temperatura média do ar durante o dia e pressão do vapor d'água. Também se utilizam dados de entrada de sensoriamento remoto, como o índice de vegetação (MOD13Q), cobertura do solo (MCD12Q1), albedo (MOD43C1), índice de área foliar (LAI/FPAR MOD15A2).

A evaporação da superfície molhada do dossel (λE_{wet_c}) é determinada pela Equação 4, e utiliza a fração de cobertura vegetal de cada pixel (F_c – Equação 5), a resistência à transferência de calor latente (r_{vc}), resistência aerodinâmica (r_{hrc}) e da radiação da superfície terrestre (R_{net}) (BRUST et al., 2021).

$$(4) \quad \lambda E_{wet_c} = \frac{(s \times A_c + \rho \times C_p \times (e_{sat} - e) \times \frac{F_c}{r_{hrc}}) \times F_{wet}}{s + \frac{\rho \times C_p \times r_{vc}}{\lambda \times e \times r_{hrc}}}$$

$$(5) \quad F_c = \frac{EVI - EVI_{min}}{EVI_{max} - EVI_{min}}$$

onde EVI indica o índice de vegetação melhorado, que por meio da banda espectral azul, reduz os efeitos da atmosfera e do solo no resultado espectral sobre a cobertura vegetal.

A evaporação da superfície do solo (λE_{SOIL}) e a transpiração vegetal (λE_{trans}) são obtidas pelas Equações 6 e 7, descritas a seguir (YUAN et al., 2021):

$$(6) \quad \lambda E_{SOIL} = \lambda E_{wet_SOIL} + \lambda E_{SOIL_POT} \times \left(\frac{RH}{100} \right)^{\frac{VPD}{100}}$$

$$(7) \quad \lambda E_{trans} = \frac{(s \times A_c + \rho \times C_p \times (e_{sat} - e) \times \frac{F_c}{r_a}) \times (1 - F_{wet})}{s + \gamma \times (1 + \frac{r_s}{r_a})}$$

onde λE_{SOIL_POT} indica a evaporação potencial do solo, λE_{wet_SOIL} é a evaporação do solo úmido e RH a umidade relativa do ar.

3.2.3 Eficiência do MOD16A2 na estimativa da *ETo*

A eficiência do sensoriamento remoto na estimativa da *ETo*, foi realizada por meio de duas comparações: R1(valores estimados pelo sensoriamento remoto e medido pelo lisímetro) e R2 (valores estimados pelo sensoriamento remoto e equação de Penman-Monteith - PM). Para isso utilizou-se dos seguintes indicadores: raiz do erro quadrático médio (RMSE – Equação 8), do erro médio absoluto (MAE – Equação 9), do índice de Willmott (d – Equação 10), erro médio por viés (MBE – Equação 11) e o coeficiente de correlação de Pearson (r – Equação 12). Suas equações estão representadas, respectivamente, a seguir:

$$(8) \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

$$(9) \quad MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

$$(10) \quad d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2}$$

$$(11) \quad MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)$$

$$(12) \quad r = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

onde $\hat{y}_i$ é o valor da *ETo* estimada pelo sensoriamento remoto; y_i representa o valor de referência nas comparações R1 e R2 (lisímetro e PM respectivamente); $\bar{y}$ é a média da *ETo* obtida por cada valor de referência em R1 e R2; n é a quantidade de dados em dias da *ETo*; e y é a média da *ETo* estimada pelo sensoriamento remoto.

Avaliação do RMSE é indicada para verificar a significância do erro em determinada estimativa. (ANDRADE, 2021). Já o indicador MBE verifica a existência da subestimação ou superestimação dos dados à um referencial (DA SILVA, 2022). A métrica MAE indica a extensão do erro (TERAMOTO et al., 2020). O coeficiente de Pearson avalia a relação entre duas variáveis, sendo seu valor expresso entre -1 e 1 (DE OLIVEIRA; BELCHIOR, 2021). O índice d também avalia o nível de concordância entre as variáveis. Quanto mais próximo à 1, maior é a concordância (Willmott, 1981).

Por não apresentarem homocedasticidade e normalidade dos dados, foi realizado o teste não-paramétrico de Mann-Whitney (U). O teste (U) tem a finalidade de comparar a semelhança entre as métricas (HAPP; BATHKE; BRUNNER, 2019).

Também foi determinado um valor K proporcional, que permite verificar a relação das medidas estimadas pelo sensoriamento remoto, com os valores estimados por Penman-Monteith e medidos pelo lisímetro.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Poucos são os trabalhos associados à eficiência do sensoriamento remoto MODIS16, em referência ao lisímetro. Os resultados descritos na Tabela 2, indicam superestimativa do modelo SR em 5,42% e 12,19% em relação aos valores de PM e do lisímetro, respectivamente. Resultado oposto pode ser observado em Tito et al. (2020), que descreve uma subestimativa da ET_o do sensoriamento remoto quando comparado ao modelo PM, para o município do Rio de Janeiro – Brasil.

Tabela 2 – Estatística descritiva da ET_o decorrentes do SR – MODIS 16, Lisímetro e PM - Penman-Monteith

Metodologia	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância	Máximo	Mínimo
SR	21,37	21,20	7,01	49,13	36,5	10,6
Lisímetro	18,64	18,08	7,54	56,90	37,4	5,84
PM	20,27	20,81	7,24	52,46	36,35	7,61

Legenda: (PM) Penman Monteith -FAO; (SR) sensoriamento remoto.

O SR apresentou pouca diferença em relação a equação PM-FAO, uma superestimativa de 5,43%. Isso deve-se ao fato do SR utilizar em algoritmo a equação de Penman-Monteith (1965). Avaliando a relação entre PM e o lisímetro, nota-se que o modelo PM superestimou em 8,75% o valor da ET_o .

Nas três metodologias há uma variabilidade dos dados em relação as médias, ou seja, não na uniformidade dos dados e os dados não estão próximos da média. Essa dispersão dos dados pode estar associada aos outliers. Entre valores limites e a média é observado uma diferença média de 16,6 e 12,08 para os valores de máximo e mínimo respectivamente. Em Lins et al. (2021), apresentaram similaridade para os valores limites, máximo e mínimo, bem como o valor do desvio padrão, na estimativa da ET_o para a Bacia Experimental do Riacho Jatobá em Pernambuco.

De acordo com o teste não paramétrico de Mann-Whitney, houve diferença significativa entre as métricas apresentadas pelo SR e o lisímetro. No entanto a relação R1 apresentou menores valores dos índices MAE, RMSE, em comparação com os valores apresentados na relação R2 (Tabela 3).

Tabela 3 – Desempenho e correlação da metodologia SR em relação aos valores apresentados por PM e lisímetro

Relação	r	d	p-valor	MAE	RSME	MBE
R1	0,64	0,74	0,005*	5,212	6,773	2,272
R2	0,50	0,66	0,267	5,684	7,186	1,1

Legenda: "*" significativo para nível de 5% do teste de Mann-Whitney, " d " índice de Willmott e " r " coeficiente de correlação de Pearson, raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE), erro médio por viés (MBE), (R1) relação sensoriamento remoto/lisímetro, (R2) relação sensoriamento remoto/ Penman Monteith.

Analisando os valores do índice de concordância de Willmott e coeficiente de correlação, verifica que SR apresentou menores valores em relação ao modelo PM, quando confrontado com a relação R1 ($r = 0,5$ e $d = 0,66$). Resultado corroboram com Tito et al. (2021), na estimativa da ET_o para o município do Rio de Janeiro – Brasil.

A relação R2 apresentou o menor valor do índice MBE, em comparação com R1, mas obteve maiores valores para RMSE e MAE.

Verificando a relação entre as metodologias analisados, foi desenvolvido uma constante K sobre os valores da ET_o . A Tabela 4 apresenta a estatística descritiva dos valores K , obtidos na comparação de R1 e R2.

Tabela 4 – Estatística da constante K na relação SR/Lisímetro (R1) e SR/PM (R2)

Razão	Média (K)	Mediana	Desvio Padrão	Variância	Máximo	Mínimo
R1	1,20	1,15	0,35	0,12	2,50	0,59
R2	1,13	1,03	0,44	0,19	2,89	0,49

Legenda: (R1) relação sensoriamento remoto/lisímetro, (R2) relação sensoriamento remoto/ Penman Monteith.

Também é possível verificar, por meio da constante k , a superestimativa do modelo SR nas duas relações. Ambas as relações apresentaram baixo desvio padrão dos dados, o que descreve uma homogeneidade dos valores da constante. Assim, é definido as seguintes relações:

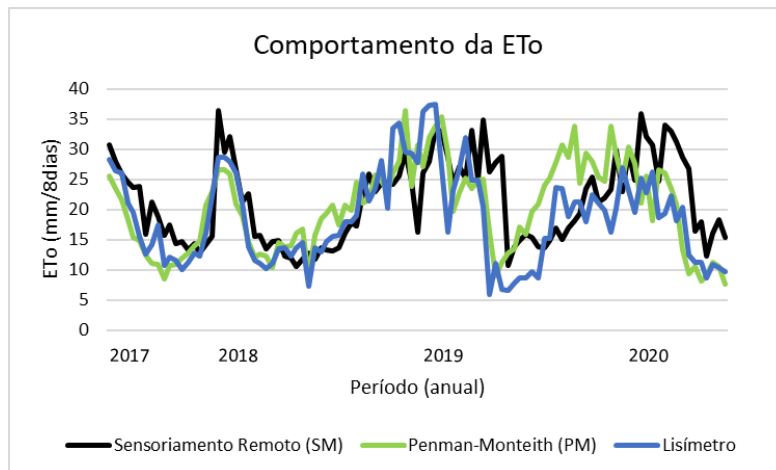
$$R1: SR = 1,20 \times ET_o \text{ (Lisímetro)}$$

$$R2: SR = 1,13 \times ET_o \text{ (Penman – Monteith/FAO)}$$

A Figura 6 descreve análise gráfica da relação dos valores da ET_o estimada pelos modelos SR e PM, bem como as medidas quantificada por meio do lisímetro. Observa-se que as amplitudes dos dados, apresentadas por SR, compreende entre o final e início de cada ano analisado, situando-se entres os meses de dezembro a janeiro. Seus valores são superiores a 35 mm/8dias e superestimam em média 40% nesse período. A mesma amplitude de dado foi observada entre o final do ano de 2018 e início de 2019, para o modelo PM.

No ano de 2019 verifica-se uma subestimativa do modelo SR sobre PM, com uma diferença média de 9,72 mm/8dias. Nos demais períodos, com pouca diferença entre os valores observados, ou seja, os modelos apresentaram o mesmo comportamento.

Figura 6 – Análise comportamental das medidas lisimétrica e dos modelos SR e PM, na estimativa da ET_o



Fonte: Autor

Outro ponto interessante é a dinâmica dos dados em relação aos anos analisados. Observa-se que os modelos apresentaram comportamento semelhante, como pouca variação dos dados, em comparação aos períodos anuais avaliados.

O modelo SR apresentou, para o início dos anos de 2019 e 2020, valores superiores em relação aos dados apresentados pelo lisímetro. Uma diferença média de 9,72 mm/8dias e 9,32 mm/8dias respectivamente. Os menores valores obtidos pelo lisímetro estão próximo de 5 mm/8dias, contra 10 mm/8dias para o modelo SR.

Entre o início e o meio do ano de 2019, observa subestimativa do modelo SR em relação ao modelo PM, com uma diferença de aproximadamente 15 mm/8dias.

3.4 CONCLUSÃO

Analisando os resultados estatísticos, os três modelos avaliados, apresentaram similaridades dos resultados da ET_o para as condições climática do local.

O modelo MODIS 16 superestima a evapotranspiração para o município de Botucatu/SP. No entanto o modelo é capaz de simular os valores observados pelo lisímetro e estimado por Penman-Monteith (FAO), apresentado ser uma opção para o produtor a sua utilização em campo.

REFERÊNCIA

ALLEN, R. G. *et al.* Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, **Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ANDRADE, A. M. D. *et al*. Downward longwave radiation estimates for clear and all sky conditions in Central Amazonia. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 28, p. 602-618, jan. / jun. 2021.

BRUST, C. *et al*. Using SMAP Level-4 soil moisture to constrain MOD16 evapotranspiration over the contiguous USA. **Remote Sensing of Environment**, v. 255, p. 112277, 2021.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 1, p. 1-11, fev. 2009.

DE MACÊDO, K. G. *et al*. Desenvolvimento e ajuste de equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência no estado de Pernambuco. **Irriga**, v. 23, n. 1, p. 1-16, 2018.

DE OLIVEIRA, J. C.; BELCHIOR, F. N. Energia elétrica produzida por um sistema fotovoltaico versus dados meteorológicos—uma aplicação da correlação de Pearson. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 5, 2021.

DA SILVA, H. M. Análise estatística do brilho solar no estado do acre entre os anos de 1991 e 2015 para determinação de normais climatológicas provisórias de insolação. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR-CBENS**. 2022. Florianópolis, p. 1-10.

DE SOUZA, V. Q. *et al*. Desempenho de modelos para estimativa da evapotranspiração de referência na microrregião de Tomé Açú-Pa. **Irriga**, v. 27, n. 1, p. 155-167, 2022.

HAPP, M.; BATHKE, A. C.; BRUNNER, E. Planejamento ótimo do tamanho da amostra para o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney. **Estatística em medicina**, v. 38, n. 3, p. 363-375, 2019.

HE, M. *et al*. Satellite data-driven modeling of field scale evapotranspiration in croplands using the MOD16 algorithm framework. **Remote Sensing of Environment**, v. 230, p. 111201, 2019.

IBGE – **INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**. SIDRA – Sistema IBGE de recuperação automática. Disponível em: Acesso em 10 de maio de 2022.

LINS, F. A. C. *et al*. Análise da dinâmica temporal da evapotranspiração real em uma bacia hidrográfica do semiárido através de modelagem hidrológica e sensoriamento remoto. **Irriga**, v. 26, n. 3, p. 543-564, 2021.

MARTINS, C. M. R. **Evapotranspiração de canaviais em diferentes fases fenológicas por sensoriamento remoto no vale do submédio do São Francisco**. 2019. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2019.

MONTANHA, L. E. V. **Desempenho das medidas de um lisímetro de lençol freático constante a partir do modelo de Penman-Monteith**. 2022. 64 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2022.

MONTEITH, J. L. Evaporação e meio ambiente. In: Simpósios da sociedade para biologia experimental. **Cambridge University Press (CUP) Cambridge**, 1965. p. 205-234.

MOREIRA, A. A.; ADAMATTI, D. S.; RUHOFF, A. L. Avaliação dos produtos de evapotranspiração baseados em sensoriamento remoto mod16 e GLEAM em nove sítios de

fluxos turbulentos do programa LBA. In: Ciencia e natura. Vol. 40, Special Edition: X Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, **Anais...**, p. 112-118. 2018.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. MODIS global terrestrial evapotranspiration (ET) product (NASA MOD16A2/A3). **Algorithm Theoretical Basis Document**, Collection, v. 5, p. 600, 2013.

ONGARATTO, J. M.; BORTOLIN, T. A. Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de referência no município de São José dos Ausentes (RS), Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, p. 979-987, 2021.

RUNNING, S.; MU, Q.; ZHAO, M. **MOD17A2H MODIS/Terra Gross Primary**

Productivity 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A2H.006>>. Acesso em: 8 out. 2022.

SILVA, C. O. F.; MAGNONI, P. H. J.; MANZIONE, R. L. Sensoriamento remoto orbital para modelagem da evapotranspiração: síntese teórica e aplicações em computação na nuvem. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15, n. 3, p. 425-468, 2021.

SILVA, L. F. **Sustentabilidade da produção agrícola de agricultores familiares ligados à associação dos produtores rurais do bairro do Chaparral e região - Botucatu/SP**. 2022. 98 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2020.

TANGUNE, B. F.; ROMÁN, R. M. S. Redes neurais artificiais, regressão e métodos empíricos para a modelagem da evapotranspiração de referência na cidade de Inhambane, Moçambique. **Irriga**, v. 24, n. 4, p. 802-816, 2019.

TERAMOTO, É. T. *et al.* Comparing different methods for estimating hourly solar ultraviolet radiation: Empirical Models, Artificial Neural Network and Support Vector Machine. **Revista Brasileira de Meteorologia**, p. 35-43, 2020.

TITO, T. M. *et al.* Estimativa da evapotranspiração baseada em elementos meteorológicos e sensoriamento remoto no Parque Nacional de Itatiaia, Brasil. In: OLIVEIRA, R. J. **Recursos Naturais: energia de biomassa florestal**. 1. Guarujá: Científica Digital, 2021. v. 2, cop. 3, p. 38-55.

TITO, T. M. *et al.* Assessment of evapotranspiration estimates based on surface and satellite data and its relationship with El Niño–Southern Oscillation in the Rio de Janeiro State. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 7, p. 1-15. 2020.

Willmott, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, vol. 2, n. 2, p. 184-194.1981

YUAN, Ling *et al.* An enhanced MOD16 evapotranspiration model for the Tibetan Plateau during the unfrozen season. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 126, n. 7, p. e2020JD032787, 2021.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, para o município de Botucatu – São Paulo, foi apresentado alguns pontos importantes na estimativa da evapotranspiração de referência. O primeiro ponto é a importância do ajuste local dos modelos empíricos, na falta de medidas obtidas por lisímetro. Apesar das características de cada modelo e para qual condição climática ele foi desenvolvido, a calibração dos coeficientes permite estimar medida mais próximas da realidade.

O segundo ponto importante é o valor utilizado como referência, para realizar a calibração dos modelos empíricos. A utilização do modelo de Penman-Monteith, como referência para a calibração dos modelos, apresentou bom desempenho de acordo com os valores indicado dos índices d (Willmott) e r (coeficiente de correlação de Pearson). No entanto o valor médio estimado por Penman-Monteith, apresentou diferença significativa, quando comparado com as medias dos modelos ajustados.

A utilização da medida lisimetrica, como referência no ajuste das equações empíricas, também demonstrou bom desempenho no ajuste, mas com valores dos índices r e d um pouco abaixo em relação aos exibidos no ajuste utilizando Penman-Monteith. Entretanto a maioria dos modelos ajustados não apresentou diferença significativa entre as medias dos modelos ajustados e o valor medido no lisímetro, ao contrário do que foi apresentado no ajuste utilizando o modelo da FAO como referência.

Dessa forma e apesar de ser o modelo mais completo para estimativa da evapotranspiração, a utilização do modelo de Penman-Monteith só se faz necessária na falta da medida direta.

O terceiro ponto importante é a calibração dos modelos para escala de tempo maiores que da diária. Tanto para o ajuste com o valor do modelo de Penman-Monteith, como o valor do lisímetro, ajuste dos modelos para evapotranspiração acumulada em três, cinco e sete dias apresentaram boa estimativa e bom desempenho estatístico. A utilização de escalas maiores, é uma ferramenta importante para os agricultores, em relação ao manejo adequado dos recursos hídricos para fins de irrigação, como redução de gastos financeiros.

A utilização do sensoriamento remoto é adequada para as condições climática, do município em estudo, quando é verificado a falta da medida direta ou restrição de dados meteorológico em campo, utilizado na equação de Penman-Monteith (FAO).

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G., **PEREIRA**, L.S., RAES, D., Smith, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- ALLEN, R.G., M. TASUMI, R. TRESSA. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 133(4): 395–406, 2007.
- BARROS, A. C. *et al.* Estimativa diária da evapotranspiração de referência por Hargreaves-Samani e ajuste de parâmetros para Alagoas. **IRRIGA**, v. 24, n. 3, p. 527-537, 2019.
- BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. D., "Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data", U.S. **Department of Agriculture Soil Conservation Service**, SCS - TP - 96, Washington, D.C., ago, 1950.
- CAMARGO, A. P. Balanço hídrico no Estado de São Paulo. Campinas: IAC, 28p. **Boletim Técnico**, v. 116, 1971.
- CAMARGO, A. P.; MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C. 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**, v.7 n.2, p.251-257, 1999.
- CARNEIRO, R. L. *et al.* Métodos de gradiente para otimização simultânea: estudo de casos de sistemas alimentares. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 353-362, jul./set. 2005
- CARVALHO, L. G. *et al.* Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p. 456-465, 2011.
- COSTA T. S. *et al.* Estimativa da evapotranspiração de referência para morro do Chapéu, Bahia. In: SEMANA ACADÊMICA DO CURSO DE AGRONOMIA DO CCAE/UFES, 30., 2019, Alegre. **Anais [...]**. Alegre: SEAGRO, 2019, v. 3, n.1. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/seagro/article/view/26425>. Acesso em: 23 fev. 2021
- CARVALHO, W. S.; MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; DOS SANTOS, T. L. Uso e cobertura do solo utilizando a Plataforma Google Earth Engine (GEE): Estudo de caso em uma unidade de conservação. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 15280-15300, 2021.
- DE MEDEIROS, G. A.; FURUTA, K. K. D. Agricultura urbana: desenvolvimento de um protótipo para o cultivo de hortaliças em ambiente residencial. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 3, p. 651-663, 2021.

DOORENBOS J.; PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements, **Rome: FAO**, 1977. 179p. Irrigation and Drainage, Paper 24.

FISHER, J. B. *et al.* O futuro da evapotranspiração: Requisitos globais para o funcionamento do ecossistema, feedbacks de carbono e clima, gestão agrícola e recursos hídricos. **Pesquisa de Recursos Hídricos**, v. 53, n. 4, p. 2618-2626, 2017.

FREITAS, P. A. *et al.* Evapotranspiração de referência diária por diferentes modelos na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe (Pernambuco-Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 4, n. 1, 2018.

FREVERT, D. K.; HILL, R. W.; BRAATEN, Bruce C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 109, n. 2, p. 265-270, 1983.

JÚNIOR, J. B. C. *et al.* Considerações sobre a evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL no semiárido brasileiro. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 7, n. 1, p. 45-51, 2021.

LEMO FILHO, L. C. A. *et al.* Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 1294–1303, 2010.

LUENBERGER, D. G.; YE, Y. Linear and nonlinear programming. 3 ed. New York: Springer, 516 p. 2008.

MONTEITH, J. L. Evaporação e meio ambiente. In: **Simpósios da sociedade para biologia experimental**, 19.,1965, Cambridge University Press (CUP) Cambridge, 1965. p. 205-234.

MOREIRA, E. B. M. *et al.* Evapotranspiração real na bacia hidrográfica do Rio de Ondas–BA através do algoritmo Sebal e imagens Landsat 8. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 19.,2019, Santos. **Anais [...]**. Santos: INPE, 2019. p. 3645-3648. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/10.01.17.17/doc/97674.pdf>
Acesso em: 22. fev. 2019.

NASCIMENTO, *et al.* Desempenho de um lisímetro de pesagem hidráulica com diferentes sistemas de leitura. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 01, p. 232-245, 2016.

OLIVEIRA, E. R.; SILVA, T. C.; DE OLIVEIRA RAMOS, R. F. Evapotranspiração de referência em Januária-mg pelos métodos tanque classe “A” e Hargreaves-Samani. *In: Colloquium Agrariae*. ISSN: 1809-8215. 2020. p. 48-54.

OLIVEIRA, M. E. G. *et al.* Estimativa da evapotranspiração baseada em elementos meteorológicos e sensoriamento remoto no parque nacional de Itatiaia, Brasil. **Recursos naturais: energia de biomassa florestal-volume 2**, v. 2, n. 1, p. 38-55, 2021.

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLANOVA, N. A. **Evapotranspiração. Campinas: Fundag, 2013. 323 p.**

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly weather review**, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

RAZIEI, T; PEREIRA, L.S. Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. **Agricultural Water Management**, v.121, p.1-18, 2013.

SANTANA, M. J. *et al.* Estimativa da evapotranspiração e dos coeficientes de cultivo da cultura da beterraba. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 14, n. 4, 2020.

SANTOS, L. F. B. *et al.* Avaliação da condutância estomática na cultura do abacaxi sob irrigação nas condições da Chapada Diamantina. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA*, 24., 2016, São Luis. **Anais [...]**. Fruticultura: fruteiras nativas e sustentabilidade. São Luis, MA: SBF, 2016.

SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: Histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v. 4. n. 1. p. ixii. 1996.

SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; TEIXEIRA, A. H. C. Modelagem espacial da evapotranspiração e produtividade hídrica na porção paulista do afloramento do aquífero Guarani entre 2013 e 2015. **Holos Environment**, v. 18, n. 2, p.126-140, 2018.

SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; TEIXEIRA, A. H. C. Sensoriamento remoto orbital para modelagem da evapotranspiração: síntese teórica e aplicações em computação na nuvem. **BIOENG**, v. 15, n. 3, p. 425-468, 2021.

SULINO, A. L. *et al.* Construção e desempenho de lisímetros de drenagem para determinação do balanço hídrico no solo. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 2, p. 1193-1205, 2019.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, jan, 1948.

TITO, T. M. *et al.* Assessment of evapotranspiration estimates based on surface and satellite data and its relationship with El Niño–Southern Oscillation in the Rio de Janeiro State. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 7, p. 1-15, 2020.

VIEIRA, N. *et al.* Estimativa da evaporação nos reservatórios de Sobradinho e Três Marias usando diferentes modelos. **Engenharia Agrícola**, v. 36, p. 433-448, 2016.

WILM, H. G. *et al.* Relatório da Comissão de Transpiração e Evaporação, 1943-44. **Eos, Transações União Geofísica Americana**, v. 25, n. 5, p. 683-693, 1944.

XIANG, K. *et al.* Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration—a review. **Agricultural Water Management**, v. 232, p. 106043, 2020.