

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de  
30/11/2023

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online  
until  
November 30, 2023

**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 BOSO**

**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 Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Alexandre Dal Pai

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

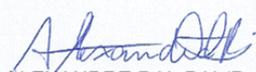
## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

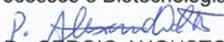
TÍTULO DA TESE: MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE  
BOTUCATU/SP

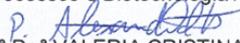
AUTORA: ANA CLAUDIA MARASSÁ ROZA BOZO

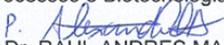
ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

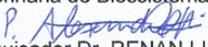
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Agrícola, pela  
Comissão Examinadora:

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

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

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN (Participação Virtual)  
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

  
Prof. Dr. RAUL ANDRES MARTINEZ URIBE (Participação Virtual)  
Engenharia de Biosistemas / 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 Floriano

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 eficiência 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-Cridle 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 Agrônômicas – UNESP..... 30
- Figura 3 – Estações meteorológica e radiométrica da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP..... 30
- 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..... 31
- Figura 5 – Comportamento gráfico dos valores da *ET<sub>o</sub>* 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 modelos 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 $ET_0$ 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

<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO 1 - MODELOS CALIBRADOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA, PARA O MUNICÍPIO DE BOTUCATU/SP, EM RELAÇÃO AO LISÍMETRO DE PESAGEM.....</b>	<b>25</b>
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
<b>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.....</b>	<b>58</b>
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
<b>CAPÍTULO 3 - EFICIÊNCIA DO SENSORIAMENTO REMOTO MODIS16 NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA O MUNICÍPIO DE BOTUCATU - SÃO PAULO.....</b>	<b>83</b>
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
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>99</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>101</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

No ciclo hidrológico e no balanço hídrico do meio agrícola, a evapotranspiração é uma das variáveis mais importantes de ser analisada (RAZIEI; 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 (plântio direto, capacidade de água disponível – CAD densidade do solo, densidade do plântio 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 incluiu 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  $\text{mm.dia}^{-1}$ , 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 irrigadas, 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).

## 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.

LEMOS 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.