



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ GUSTAVO DA SILVA

**DESEMPENHO DE MODELOS INDIRETOS DE ESTIMATIVA DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0) E COMPARAÇÃO
GEORREFERENCIADA COM DADOS ORBITAIS EM PERNAMBUCO**

Recife

2022

JOSÉ GUSTAVO DA SILVA

**DESEMPENHO DE MODELOS INDIRETOS DE ESTIMATIVA DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0) E COMPARAÇÃO
GEORREFERENCIADA COM DADOS ORBITAIS EM PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Profa. Dra. Leijdane Maria Maciel de Oliveira.

Coorientadora: Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro.

Recife

2022

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

S586d Silva, José Gustavo da.
Desempenho de modelos indiretos de estimativa de evapotranspiração de referência (ET_o) e comparação georreferenciada com dados orbitais em Pernambuco / José Gustavo da Silva. – 2022.
98 f.: il., fig., tab., abrev., e siglas.

Orientadora: Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira.
Coorientadora: Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2022.
Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia civil. 2. Evapotranspiração de referência. 3. Penman-Monteith. 4. Sensoriamento remoto. 5. MOD16. I. Oliveira, Leidjane Maria Maciel de (Orientadora). II. Montenegro, Suzana Maria Gico Lima (Coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2022-27

JOSÉ GUSTAVO DA SILVA

**DESEMPENHO DE MODELOS INDIRETOS DE ESTIMATIVA DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0) E COMPARAÇÃO
GEORREFERENCIADA COM DADOS ORBITAIS EM PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 21/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência
Profa. Dra. Sylvana Melo dos Santos (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande

Participação por videoconferência
Dr. Diego Cezar dos Santos Araújo (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico:

A Deus;

A minha amada mãe, Vera Lúcia;

Aos meus queridos avós, Eutália e João Alberto (*In memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus, por toda resiliência dada para enfrentar os desafios da vida e atingir os meus objetivos.

A minha mãe, por ser meu exemplo de força, determinação e superação para vencer as batalhas da vida, por todo amor e por toda ajuda a manter o foco, pelo incentivo e todo apoio ao longo de minha trajetória.

À Prof.^a Dr.^a Leidjane Oliveira, orientadora desta dissertação, pelo seu empenho à pesquisa científica, pela sua disponibilidade, pelas palavras incentivadoras e por cada abraço genuíno recebido.

À Prof.^a Dr.^a Suzana Montenegro, coorientadora desta dissertação, pela sua competência profissional e dedicação no trabalho procurando sempre promover o melhor aos discentes da Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pelo banco de dados hidrometeorológicos, sem os quais não poderia ter realizado este trabalho.

Aos colegas pesquisadores do PPGEC que pude conhecer, por terem feito parte do cotidiano desta conquista, dentro e fora da universidade. Em especial, a Evely Nascimento e a Diego Araújo por todo conhecimento compartilhado em Sensoriamento Remoto.

Aos meus amigos, por me incentivarem e ensinarem que vale a pena o cultivo de verdadeiras amizades na vida.

A todos os professores da Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE, pela importância e responsabilidade que tiveram em minha vida acadêmica e formação profissional.

A todos vocês, obrigado.

RESUMO

O conhecimento da estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) auxilia cada vez mais os pesquisadores e profissionais na execução de projetos agrícolas e ambientais, por ser fundamental nos estudos de balanço hídrico, projetos e manejo de irrigação, modelagem de processos climatológicos e planejamento do gerenciamento dos recursos hídricos. Este trabalho tem o objetivo de avaliar o desempenho de diferentes modelos indiretos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em Pernambuco, mais especificamente em três cidades: Floresta, Ibimirim e Serra Talhada. Em virtude disto, foram utilizados o modelo de Penman-Monteith, considerado pela FAO como padrão e os modelos indiretos de Benavides-Lopez, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Kharrufa, Jensen-Haise, Makkink, Priestley-Taylor, Radiação Solar e Turc, além de dados de evapotranspiração do sensor MODIS (*Terra*), estimados pelo algoritmo MOD16. Os dados utilizados para estimar a ET_o foram obtidos das estações meteorológicas automáticas do INMET, no período de 2015 a 2019. Para avaliação da precisão dos modelos utilizou-se os indicadores estatísticos de regressão linear simples e coeficiente de correlação de Pearson (r), como também foram utilizados o erro de estimativa padrão (EEP), o índice de concordância de Willmott (d) e o índice de desempenho (c). Os resultados evidenciam que o modelo Jensen-Haise obteve o melhor desempenho na estimativa de ET_o em relação ao modelo padrão, com classificação “Muito bom” para Floresta ($c = 0,81$) e Ibimirim ($c = 0,81$), e “Bom” para Serra Talhada ($c = 0,73$). O modelo Makkink também estimou satisfatoriamente a ET_o para a região de estudo, com índice de desempenho variando entre 0,69 e 0,80. Os demais modelos apresentaram desempenho não satisfatórios, com restrições de uso para as condições climáticas locais. Os dados do sensor MODIS revelaram superestimativa da ET_o estimada pelo produto MOD16A3 para Floresta e Serra Talhada, e subestimativa da ET_o pelo mesmo produto para Ibimirim, na escala anual, quando comparados ao modelo Penman-Monteith. No entanto, as imagens do sensor possuem a vantagem de representar a distribuição espacial da ET_o em Pernambuco. Em todos os municípios verificou-se melhor correlação da ET_o estimado pelo produto MOD16A2 para o período seco no ano de 2018, devido ao fato do produto representar um dado agregado de 8 dias.

Palavras-chave: evapotranspiração de referência; Penman-Monteith; sensoriamento remoto; MOD16.

ABSTRACT

The knowledge of the reference evapotranspiration estimate (ET_o) increasingly helps researchers and professionals in the execution of agricultural and environmental projects, as it is fundamental in water balance studies, irrigation projects and management, modeling of climatological processes and management planning of water resources. This work aims to evaluate the performance of different indirect models for estimating reference evapotranspiration (ET_o) in Pernambuco, more specifically in three cities: Floresta, Ibimirim and Serra Talhada. In this case, the Penman-Monteith model (considered by FAO as a standard) and the indirect models of Benavides-Lopez, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Kharrufa, Jensen-Haise, Makkink, Priestley-Taylor, Solar Radiation and Turc were used, as the evapotranspiration data from the MODIS sensor (Terra) were also used, estimates by the MOD16 algorithm. The data used to estimate the ET_o were obtained from INMET's automatic meteorological stations, from 2015 to 2019. To assess the accuracy of the models, statistical indicators of simple linear regression and Pearson's correlation coefficient (r) were used, as were also standard estimation error (EEP), Willmott concordance index (d) and performance index (c) were used. The results show that the Jensen-Haise model obtained the best performance in the expectation of ET_o in relation to the standard model, with classification “Very good” for Floresta ($c = 0.81$) and Ibimirim ($c = 0.81$), and “Good” for Serra Talhada ($c = 0.73$). The Makkink model also satisfactorily estimated the ET_o for the region, with a performance index varying between 0.69 and 0.80. The other models showed non-advanced performance, with usage restrictions for local climatic conditions. The MODIS sensor data revealed an overestimation of the ET_o estimated by the MOD16A3 product for Floresta and Serra Talhada, and an underestimation of the ET_o by the same product for Ibimirim, in the annual scale, when compared to the Penman-Monteith model. However, the sensor images have the advantage of representing the spatial distribution of ET_o in Pernambuco. In all cities, there was a better correlation of the ET_o estimated by the MOD16A2 product for the dry period in 2018, due to the fact that the product represents an aggregate data of 8 days.

Keywords: reference evapotranspiration; Penman-Monteith; remote sensing; MOD16.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Mapa do estado de Pernambuco com destaque para cidades avaliadas, que possuem bases meteorológicas fixas do INMET	32
Figura 2 –	Fluxograma Metodológico	34
Figura 3 –	Foto ilustrativa do processo de extração por área do produto MOD16A3 para Serra Talhada-PE	45
Figura 4 –	Foto ilustrativa do processo de extração por ponto do produto MOD16A2 para Ibimirim-PE	46
Figura 5 –	Fluxograma do algoritmo ET MOD16 melhorado	48
Figura 6 –	Médias diárias de estimativa de evapotranspiração no município de Floresta-PE	53
Figura 7 –	Regressão linear entre os valores diários de ETo estimados pela comparação dos modelos de Benavides-Lopez (A), Camargo (B), Hamon (C), Hargreaves-Samani (D), Kharrufa (E), Jensen-Haise (F), Makkink (G), Priestley-Taylor (H), Turc (I) e Radiação Solar (J), com padrão Penman-Monteith FAO, entre os anos de 2015 e 2019 em Floresta-PE	57
Figura 8 –	Médias diárias de estimativa de evapotranspiração no município de Ibimirim-PE	59
Figura 9 –	Regressão linear entre os valores diários de ETo estimados pela comparação dos modelos de Benavides-Lopez (A), Camargo (B), Hamon (C), Hargreaves-Samani (D), Kharrufa (E), Jensen-Haise (F), Makkink (G), Priestley-Taylor (H), Turc (I) e Radiação Solar (J), com padrão Penman-Monteith FAO, entre os anos de 2015 e 2019 em Ibimirim-PE	63
Figura 10 –	Médias diárias de estimativa de evapotranspiração no município de Serra Talhada-PE	65
Figura 11 –	Regressão linear entre os valores diários de ETo estimados pela comparação dos modelos de Benavides-Lopez (A), Camargo (B), Hamon (C), Hargreaves-Samani (D), Kharrufa (E), Jensen-Haise (F), Makkink (G), Priestley-Taylor (H), Turc (I) e Radiação Solar (J), com padrão Penman-Monteith FAO, entre os anos de 2015 e	69

	2019 em Serra Talhada-PE	
Figura 12 –	Evapotranspiração anual de Floresta-PE obtidas com produto MODIS, de 2015 a 2019	71
Figura 13 –	Estimativa da ETo pelo sensor MODIS e modelo de Penman-Monteith (8 dias) e precipitação acumulada, em Floresta-PE para o ano de 2018	73
Figura 14 –	Evapotranspiração anual de Ibimirim-PE obtidas com produto MODIS, de 2015 a 2019	76
Figura 15 –	Estimativa da ETo pelo sensor MODIS e modelo de Penman-Monteith (8 dias) e precipitação acumulada, em Ibimirim-PE para o ano de 2018	79
Figura 16 –	Evapotranspiração anual de Serra Talhada-PE obtidas com produto MODIS, de 2015 a 2019	81
Figura 17 –	Estimativa da ETo pelo sensor MODIS e modelo de Penman-Monteith (8 dias) e precipitação acumulada, em Serra Talhada-PE para o ano de 2018	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Descrição das estações, coordenadas, altitudes e classificação do clima	32
Tabela 2 –	Fatores de conversão para radiação solar	40
Tabela 3 –	Proporção média diária (p) de horas de luz para diferentes latitudes	42
Tabela 4 –	Classificação das correlações de acordo com o r	49
Tabela 5 –	Critérios de interpretação do desempenho dos modelos de estimativa da ETo pelo índice “c”	50
Tabela 6 –	Evapotranspiração média (ETo), diferença percentual em relação ao modelo padrão (ETo PM) dos modelos empíricos de ETo no município de Floresta-PE, 2015 a 2019	52
Tabela 7 –	Índices e coeficientes de comparação entre os diferentes modelos de determinação da ETo, entre 2015 e 2019 para Floresta-PE	53
Tabela 8 –	Evapotranspiração média (ETo), diferença percentual em relação ao modelo padrão (ETo PM) dos modelos empíricos de ETo no município de Ibimirim-PE, 2015 a 2019	58
Tabela 9 –	Índices e coeficientes de comparação entre os diferentes modelos de determinação da ETo, entre 2015 e 2019 para Ibimirim-PE	60
Tabela 10 –	Evapotranspiração média (ETo), diferença percentual em relação ao modelo padrão (ETo PM) dos modelos empíricos de ETo no município de Serra Talhada-PE, 2015 a 2019	64
Tabela 11 –	Índices e coeficientes de comparação entre os diferentes modelos de determinação da ETo, entre 2015 e 2019 para Serra Talhada-PE	66
Tabela 12 –	Acumulados anuais de estimativa da ETo pelo sensor MODIS e modelo de Penman-Monteith, em Floresta-PE	72
Tabela 13 –	Correlação entre ETo MOD16A2 e ETo PM, em 2018 para Floresta-PE	74
Tabela 14 –	Acumulados anuais de estimativa da ETo pelo sensor MODIS e modelo de Penman-Monteith, em Ibimirim-PE	77
Tabela 15 –	Correlação entre ETo MOD16A2 e ETo PM, em 2018 para Ibimirim-PE	79
Tabela 16 –	Acumulados anuais de estimativa da ETo pelo sensor MODIS e	82

modelo de Penman-Monteith, em Serra Talhada-PE

Tabela 17 – Correlação entre ETo MOD16A2 e ETo PM, em 2018 para Serra Talhada-PE

84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIRS	Atmospheric Infrared Sounder
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS
AMSU-A	Advanced Microwave Sounding Unit-A
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System
EOS	Earth Observing System
ET	Evapotranspiração global
ETc	Evapotranspiração da cultura
ETo	Evapotranspiração de referência
ETr	Evapotranspiração real
FAO	Food and Agriculture Organization
FAO-56	Boletim nº 56 da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
GLEAM	Global Land Evaporation Amsterdam Model
GMAO	Global Modeling and Assimilation Office
HSB	Humidity Sounder for Brazil
IAC	Instituto Agrônomo de Campinas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LE	Fluxo de calor latente
LP DAAC	Land Processes Distributed Active Archive Center
MISR	Multi-angle Imaging Spectro Radiometer
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOD12	MODIS Global Land Cover Dynamics Product
MOD15	MODIS Leaf Area Index and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation Product
MOD16	MODIS Global Evapotranspiration Product
MOPITT	Measurement of Pollution in the Troposphere
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PM-FAO	Penman-Monteith-FAO
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
SR	Sensoriamento Remoto
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

LISTA DE SÍMBOLOS

α	albedo ou coeficiente de reflexão (0,23)
z	altitude local (m)
z_m	altura onde é medida a velocidade do vento (m)
cal	calorias
cm	centímetros
a_t	coeficiente de ajuste com base na umidade relativa do ar
r	coeficiente de correlação
k_t	coeficiente empírico, em regiões continentais (0,162)
σ	constante de Stefan-Boltzmann igual a $4,903 \cdot 10^{-9}$ (MJ K ⁻⁴ m ⁻² dia ⁻¹)
G_{sc}	constante solar (0,0820 MJ m ⁻² min ⁻¹)
γ	constante psicométrica (kPa K ⁻¹)
δ	declividade solar (rad)
ρ	densidade do ar (kg m ⁻³)
J	dia Juliano referente ao dia do mês no ano
d_r	Distância inversa relativa sol-terra (rad)
Pi	ETo estimada pelos modelos (mm dia ⁻¹)
Oi	ETo observada pelo modelo de Penman-Monteith (mm dia ⁻¹)
ETo MOD16	evapotranspiração de referência pelo sensor MODIS (mm/8 dia)
ETo (BL)	evapotranspiração de referência por Benavides e Lopez (mm dia ⁻¹)
ETo (C)	evapotranspiração de referência por Camargo (mm dia ⁻¹)
ETo (H)	evapotranspiração de referência por Hamon (mm dia ⁻¹)
ETo (HS)	evapotranspiração de referência por Hargreaves-Samani (mm dia ⁻¹)
ETo (JH)	evapotranspiração de referência por Jensen-Haise (mm dia ⁻¹)
ETo (K)	evapotranspiração de referência por Kharrufa (mm dia ⁻¹)
ETo (MK)	evapotranspiração de referência por Makkink (mm dia ⁻¹)
ETo (PM)	evapotranspiração de referência por Penman-Monteith (mm dia ⁻¹)
ETo (PT)	evapotranspiração de referência por Priestley-Taylor (mm dia ⁻¹)
ETo (RS)	evapotranspiração de referência por Radiação Solar (mm dia ⁻¹)
ETo (T)	evapotranspiração de referência por Turc (mm dia ⁻¹)
F	fator de ajuste que varia com temperatura média anual do local
fr	fator de correção
G	fluxo de calor no solo (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
a_s e b_s	fração da radiação extraterrestre em dias claros (n=N)

°C	grau Celsius
K	grau Kelvin
c	índice “c” de desempenho
d	índice de concordância, adimensional, variando de 0 a 1
N	insolação máxima diária teórica em função da latitude e época do ano
J	joule
O	média da ETo observada pelo modelo de Penman-Monteith (mm dia ⁻¹)
m	metro
MJ	megajoule
mm	milímetro
n	número de observações
n_h	número de horas reais de insolação (h)
α'	parâmetro de Priestley-Taylor (1,26)
p	percentagem média diária de horas de luz para diferentes latitudes
P	precipitação (mm dia ⁻¹)
$P_{(atm)}$	pressão atmosférica (Kpa)
$e^0 (T_{m\acute{a}x})$	pressão de saturação de vapor à temperatura máxima (kPa)
$e^0 (T_{m\acute{i}n})$	pressão de saturação de vapor à temperatura mínima (kPa)
e_a	pressão de vapor atual (kPa)
e_s	pressão de vapor na saturação (kPa)
$R_{a(mj)}$	radiação extraterrestre (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
R_n	radiação líquida ou saldo de radiação (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
R_{so}	radiação solar em dias de céu claro (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
R_s	radiação solar incidente (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
ra	resistência aerodinâmica (s m ⁻¹)
rs	resistência de superfície (s m ⁻¹)
R_{ns}	saldo de radiação de ondas curtas (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
R_{nl}	saldo de radiação de ondas longas (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
R_n	saldo da radiação ou saldo da radiação líquida (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
s	segundo
Δ	tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água (kPa °C ⁻¹)
T_{max}	temperatura máxima do ar (° C)
$T_{max,K}$	$T_{max,K}$ = temperatura máxima diária em kelvin (K)
T	Temperatura média do ar (°C)
$T_{min,K}$	temperatura mínima diária em kelvin (K)

T_{min}	temperatura mínima do ar (° C)
UR	umidade relativa do ar (%)
$UR_{máx}$	umidade relativa máxima do ar (%)
$UR_{mín}$	umidade relativa mínima do ar (%)
φ	valor da latitude (rad)
U_2	velocidade do vento a 2m de altura (m s ⁻¹)
U_z	velocidade do vento na altura medida (m s ⁻¹)
W	Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	21
2.1	Objetivo geral	21
2.2	Objetivos específicos	21
3	REFERENCIAL TEÓRICO	22
3.1	Conceitos básicos	22
3.1.1	Evaporação	22
3.1.2	Transpiração	23
3.1.3	Evapotranspiração	23
3.2	Modelos de estimativa de evapotranspiração de referência	25
3.2.1	Aspectos Gerais	24
3.2.2	Modelo Penman-Monteith FAO (PM-FAO)	27
3.3	Sensoriamento Remoto para estimativa da evapotranspiração	28
3.3.1	Sensor MODIS	29
3.3.1.1	<i>Produto Global de Evapotranspiração MOD16</i>	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1	Modelo padrão	34
4.1.1	Modelo Penman-Montheith FAO-56 – ETo (PM-FAO)	35
4.2	Modelos indiretos	39
4.2.1	Modelo de Benavides-Lopez – ETo (BL)	39
4.2.2	Modelo de Camargo – ETo (C)	39
4.2.3	Modelo de Hamon – ETo (H)	40
4.2.4	Modelo de Hargreaves-Samani – ETo (HS)	40
4.2.5	Modelo de Kharrufa – ETo (K)	41
4.2.6	Modelo de Jensen-Haise – ETo (JH)	42
4.2.7	Modelo de Makkink – ETo (MK)	42
4.2.8	Modelo de Priestley-Taylor – ETo (PT)	43
4.2.9	Modelo de Radiação Solar – ETo (RS)	43
4.2.10	Modelo de Turc – ETo (T)	44
4.3	Obtenção de dados orbitais	44
4.3.1	Algoritmo MOD16	46

4.4	Avaliação estatística dos modelos	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1	Comparação entre os modelos de estimativa da ETo diária	51
5.1.1	Município de Floresta	51
5.1.2	Município de Ibimirim	58
5.1.3	Município de Serra Talhada	64
5.2	Sensor MODIS	70
5.2.1	Município de Floresta	70
5.2.2	Município de Ibimirim	75
5.2.3	Município de Serra Talhada	80
6	CONCLUSÕES	86
	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICE A – SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETo) PELOS MODELOS PENMAN MONTEITH E MOD16 E SOMA DE PRECIPITAÇÃO NA COMPOSIÇÃO DE 8 DIAS EM FLORESTA-PE	96
	APÊNDICE B – SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETo) PELOS MODELOS PENMAN MONTEITH E MOD16 E SOMA DE PRECIPITAÇÃO NA COMPOSIÇÃO DE 8 DIAS EM IBIMIRIM-PE	97
	APÊNDICE C – SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETo) PELOS MODELOS PENMAN MONTEITH E MOD16 E SOMA DE PRECIPITAÇÃO NA COMPOSIÇÃO DE 8 DIAS EM SERRA TALHADA-PE	98

1 INTRODUÇÃO

O uso racional da água na agricultura é importante, não somente visando atender às necessidades hídricas das plantas, mas também, seu uso para fins domésticos e industriais, de forma a garantir a disponibilidade deste recurso para as gerações futuras (VILLA *et al.*, 2021). Complementando o contexto de uso racional, Grassi (2011) ressalta que um dos principais desafios da humanidade é o atendimento à demanda por água de boa qualidade. Por outro lado, alguns fatores podem gerar sérios problemas ao abastecimento de água pelos próximos anos, como o crescimento populacional de forma exponencial, a necessidade populacional de produção de alimentos e o crescimento industrial.

Um dos principais componentes do ciclo hidrológico é a evapotranspiração que se destaca devido à sua importância na transferência de água à atmosfera, por proporcionar a ocorrência simultânea da evaporação do solo e transpiração da planta com uma parcela transferida à atmosfera, que influencia no balanço hídrico.

Vicente *et al.* (2018) destacam que a determinação da evapotranspiração é um parâmetro básico e de extrema importância para definir a necessidade hídrica de uma região, conseqüentemente, é um parâmetro vital à eficiência do uso de água. Nesse sentido, a escassez de dados para coleta de variáveis necessárias ao cálculo da evapotranspiração pode dificultar a estimativa desse parâmetro de forma indireta.

As pesquisas sobre evapotranspiração fornecem informações relativas à quantidade de água consumida pelas plantas, fornecendo dados para o manejo da água e para o dimensionamento dos sistemas de irrigação (TAGLIAFERRE *et al.*, 2010). Dessa forma, a estimativa de perda de água por evapotranspiração torna-se imprescindível, pois permite determinar as perdas que serão repostas via irrigação, caso as chuvas não sejam suficientes.

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) auxilia pesquisadores e profissionais da área na execução de projetos agrícolas e ambientais, sendo necessária para estudos de balanço hídrico, projetos e manejo de irrigação, modelagem de processos climatológicos e planejamento do gerenciamento dos recursos hídricos (ONGARATTO e BORTOLIN, 2020).

Diversas pesquisas aplicam modelagens para determinar a ET_o, as quais utilizam dados meteorológicos e agronômicos. Dentre eles, se destaca o modelo de Penman-Monteith, por apresentar o melhor desempenho quando aplicado em diversos tipos de clima, sendo por isso recomendado pela FAO (*Food and Agriculture Organization*) como padrão para a estimativa da ET_o e calibração de modelos empíricos (ALLEN *et al.*, 1998).

Conforme Borges Júnior *et al.* (2012), diversas equações para estimativa da ETo têm sido desenvolvidas com variável complexidade e requerimento de dados, constituindo-se em modelos indiretos que podem ser classificados com base no requerimento de dados às equações matemáticas, seja pelo uso de variáveis de radiação ou de temperatura do ar.

Moura *et al.* (2013) ressaltaram a importância da utilização destes modelos por disporem de uma rede de monitoramento de dados meteorológicos, de forma que se mantenha um banco de dados de referência com informações que forneçam subsídios para a avaliação dos estudos e projetos voltados à determinação da evapotranspiração. Também, destaca-se que devido à dificuldade de medição direta da evapotranspiração, vários estudos já foram realizados para se estimar empiricamente esta variável em diversas regiões (COUTINHO *et al.*, 2020; VILLA *et al.*, 2021; SOUZA e SOUSA, 2020; DIAS, 2017; FANAYA JÚNIOR *et al.*, 2012).

Na literatura, há diversos modelos de estimativa da ETo utilizando parâmetros climatológicos, desenvolvidos em diversas condições climáticas e manejos de culturas (ALLEN *et al.*, 1998; BENAVIDES e LOPEZ, 1970; CAMARDO, 1971; HAMON, 1961; HARGREAVES e SAMANI, 1985; KHARRUFA, 1985; JENSEN e HAISE, 1963; MAKKINK, 1957; PRIESTLEY e TAYLOR, 1972; FREVERT *et al.*, 1983; TURC, 1961).

Lima *et al.* (2014) destacam que a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto (SR) permite a determinação espacial da evapotranspiração. Nesse cenário, devido à dificuldade de realização de medições diretas, o uso de dados de SR juntamente com a aplicação dos modelos indiretos tem se tornado uma potencial ferramenta para determinação da variável.

Segundo França *et al.* (2013), o Semiárido brasileiro apresenta características peculiares no que se refere a disponibilidade de água e seus efeitos sobre a vegetação nativa. Em Pernambuco, nos municípios sob condições semiáridas, devido às altas temperaturas e conseqüentemente maior evapotranspiração, vem sendo implementadas novas tecnologias através dos perímetros irrigados, ocasionando intenso desenvolvimento da agricultura irrigada e intensificação de estudos hídricos na região.

Com maior destaque, ainda, tem-se que as técnicas de SR vinculadas às ferramentas de geoprocessamento têm auxiliado na análise de estudos cada vez mais complexos, de maneira integrada e precisa. De tal modo que a popularização dessas técnicas possibilita a difusão desses conhecimentos e a formulação de uma síntese da realidade temporal, principalmente no tocante às formas de uso e ocupação, as quais expõem a dinâmica existente entre a sociedade e a natureza (BENTEMULLER e GOMES, 2019).

Dentre as novas ferramentas disponíveis para a determinação de evapotranspiração

real e potencial em ampla resolução espacial, está o sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) à bordo das plataformas orbitais Terra/Acqua e desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Os produtos MOD16A2/A3 têm como base teórica a aplicação do modelo Penman-Monteith, sendo o algoritmo que combina dados meteorológicos de reanálise e dados do sensor MODIS com resolução espacial de 500 m e temporal de 8 dias e anual (TITO, 2019; TITO *et al.*, 2020).

Diante do cenário de vulnerabilidade climática do Semiárido de Pernambuco, torna-se imprescindível o conhecimento da evapotranspiração, identificando as correlações e similaridades entre as estimativas por modelos indiretos, além do uso de técnicas de SR vinculadas ao geoprocessamento para enseje melhores tomadas de decisões governamentais acerca da segurança hídrica da região.

2 OBJETIVOS

Os objetivos dessa dissertação foram abordados em dois subtópico: objetivo geral, e objetivos específicos.

2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de modelos indiretos e de produtos do sensor MODIS na estimativa de evapotranspiração de referência (ET_o), em relação ao modelo padrão Penman-Monteith em Pernambuco.

2.2 Objetivos específicos

- Modelar um banco de dados de ET_o com medidas diárias dos elementos do tempo da rede INMET;
- Comparar os diferentes modelos de estimativa de ET_o com o modelo padrão, todos em escala diária;
- Comparar a estimativa de ET_o pelo modelo padrão com os resultados obtidos pelos produtos do MOD16;
- Avaliar estatisticamente o conjunto de modelos mais adequado para estimar a ET_o na região de estudo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Para facilitar a compreensão, abordou-se o referencial teórico nos seguintes subtópicos: conceitos básicos, modelos de estimativa de evapotranspiração de referência, e Sensoriamento Remoto para estimativa da evapotranspiração.

3.1 Conceitos básicos

Para o entendimento de componentes do ciclo hidrológico, abordaram-se os conceitos básicos de evaporação, transpiração e evapotranspiração.

3.1.1 Evaporação

A evaporação é o processo físico no qual um líquido ou sólido passa ao estado gasoso. Em meteorologia, o termo restringe-se à mudança da água no estado líquido para vapor devido à radiação solar e aos processos de difusão molecular e turbulenta. Além da radiação solar, as variáveis meteorológicas que interferem na evaporação, particularmente de superfícies livres de água, são a temperatura do ar, vento e pressão de vapor (TUCCI, 2012).

O processo de evaporação ocorre a partir do solo úmido sem vegetação, e de outras superfícies hídricas naturais, como oceanos, lagos e rios, bem como da sublimação que se processa nas superfícies de gelo (geleiras, campos de neve, etc.) (VAREJÃO-SILVA, 2006).

O ciclo hidrológico inicia-se com a evaporação da água presente em superfícies líquidas e no solo, que junto à transpiração das plantas, forma o vapor d'água presente na atmosfera. Ao ser resfriado, ocorre a formação de nuvens e precipitação em forma de chuva e neve (SILVA e CALHEIROS, 2015).

Conforme Tucci (2012), na evaporação de uma superfície de solo descoberto, quando está saturado, ou mesmo quando o nível freático for elevado, atuam somente os fatores meteorológicos. Por outro lado, na condição de solo não-saturado ou nível freático em grande profundidade, o processo de evaporação passa a depender também das propriedades do perfil do solo, principalmente da condutividade hidráulica, que é função da estrutura e textura do mesmo. Ainda, Tucci (2012) destacou que os principais processos responsáveis por abastecer a atmosfera de água são os processos de evaporação e a evapotranspiração, enquanto no sentido atmosfera-superfície, onde a transferência de água ocorre em qualquer estado físico, os processos mais significativos são as precipitações de chuva e de neve.

3.1.2 Transpiração

Allen *et al.* (1998) definem a transpiração como o processo biofísico pelo qual a água que fez parte do metabolismo da planta é transferida para a atmosfera preferencialmente pelos estômatos. As raízes das plantas são responsáveis pela retirada de nutrientes e água do solo, sendo esta água transportada para cima, através do caule e, liberada pelas folhas através dos estômatos, local onde ocorre a vaporização.

Segundo Oliveira e Ferreira (2018), a transpiração é um mecanismo regulatório da quantidade de água presente nas plantas, desenvolvida através das estruturas foliares, cutícula e estômatos; sendo que, enquanto o funcionamento destes é condicionado pelas disposições ambientais (abióticas) e bióticas, a transpiração cuticular não é controlada pela planta. Além disso, na mensuração da quantidade de água consumida pelas plantas, é essencial a investigação voltada para o sistema solo-planta-atmosfera através de metodologias que propiciam a inferência da quantidade de água contida em cada um desses fatores.

A transpiração, bem como a evaporação direta, depende do fornecimento de energia, da pressão de vapor e do vento. Assim, variáveis meteorológicas como radiação, temperatura do ar, umidade do ar e vento devem ser consideradas quando se avalia a transpiração (SOUZA, 2013). A taxa de transpiração também é influenciada por características da cultura, aspectos ambientais e práticas de cultivo (ALLEN *et al.*, 1998).

Devido a pesquisas relacionadas à evapotranspiração e diversas análises acerca do processo evapotranspirativo alguns outros conceitos surgiram na literatura, como: evapotranspiração potencial ou de referência, e evapotranspiração real.

3.1.3 Evapotranspiração

A evapotranspiração é considerada como a perda de água por evaporação do solo e transpiração da planta. A evapotranspiração é importante para o balanço hídrico de uma bacia como um todo e, principalmente, para o balanço hídrico agrícola, que poderá envolver o cálculo de necessidade de irrigação (TUCCI, 2012). O processo de evapotranspiração pode ser afetado pela energia disponível, capacidade de transporte do vapor d'água através da turbulência originada pelo vento, quantidade de água no solo e os fatores fisiológicos da planta (SOUZA, 2013).

Segundo Tucci (2012), na medida em que diminui a umidade do solo, ocorrem restrições à transferência de água para a atmosfera, que passa a depender não somente das

condições meteorológicas, mas também do sistema radicular das plantas, bem como de outras características, como o estado fitossanitário das mesmas. Essa condição permite distinguir entre evapotranspiração potencial e real.

A evapotranspiração potencial (ETp) é a quantidade de água transferida para atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água (PENMAN, 1956). Na definição de evapotranspiração potencial, a taxa de evapotranspiração não se relaciona a uma cultura específica (IRMAK e HAMAN, 2003).

Conforme Souza (2013), a diversidade da vegetação levou à necessidade de uma padronização para termo de ET, devido às diferenças entre as culturas, surgindo assim as definições de ET potencial ou de referência (ETp ou ETo), de evapotranspiração da cultura (ETc), de evapotranspiração real (ETr), entre outras.

Definir claramente a evapotranspiração “potencial” ou “de referência” é importante para entender as mudanças específicas de uma cultura no processo de evapotranspiração. A definição de evapotranspiração “potencial” assume condições para cultivo constantes. No entanto, nesta definição, a cultura de referência não é muito bem especificada, criando potencialmente um problema na eliminação total dos componentes da cultura (IRMAK e HAMAN, 2003). Posteriormente, ao adotar uma cultura de referência (grama), a seleção de coeficientes de cultura ficou mais fácil e prática (DJAMAN, 2013).

A evapotranspiração real (ETr) é a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo. Segundo Gotardo *et al.* (2018) a ETr é a medida da perda de água em uma área nas condições climática e hídrica reinantes, ou seja, a ETr sempre será menor ou igual à ETp.

De maneira mais específica, Ongaratto (2019) reforçou que os dados de evapotranspiração real dificilmente podem ser utilizados para realizar comparações, visto que as variáveis meteorológicas intervenientes oscilam muito no espaço e no tempo.

Boletim nº 56 de Allen *et al.* (1998) da *Food and Agricultural Organization* (FAO) fortaleceu o conceito de evapotranspiração de referência (ETo) como sendo resultado de uma cultura hipotética com altura de 0,12 m, uma resistência de superfície fixa de 70 m s^{-1} e um albedo de 0,23. A grama verde de altura uniforme é adotada como a cultura de referência, crescendo ativamente, sem deficiência de água e livre de doenças (IRMAK e HAMAN, 2003).

Finalmente e como mais uma especificação de evapotranspiração, tem-se a evapotranspiração da cultura (ETc) que é definida como sendo a transferência de água do

sistema solo-planta para a atmosfera observada em uma cultura onde não há presença de pragas e doenças e sob condições de solo próximo à capacidade de campo, sendo fundamental para o adequado manejo de irrigação. Essa transferência é vinculada às condições meteorológicas e ao tipo de cultura, sendo que pode ser compreendida como a evapotranspiração potencial que ocorre nos diferentes estágios fenológicos da mesma (ONGARATTO, 2019).

3.2 Modelos de estimativa de evapotranspiração de referência

A estimativa da evapotranspiração é relativamente mais difícil e complexa, em comparação a da precipitação e do escoamento superficial. Dessa forma, os modelos indiretos foram desenvolvidos a fim de medir e estimar a evapotranspiração.

3.2.1 Aspectos Gerais

Os modelos de quantificação da evapotranspiração podem ser classificados em duas categorias: a primeira inclui os modelos em que a evapotranspiração pode ser determinada por medidas diretas, já a segunda categoria engloba os modelos determinados por dados climatológicos, também denominados de modelos indiretos, nos quais a evapotranspiração de referência é avaliada de forma empírica.

Com o advento da tecnologia empregada nas estações meteorológicas automáticas que permitem medir e registrar os elementos meteorológicos em frações de tempo cada vez menores, o emprego das equações empíricas de estimativa de ETo ganhou importância, devido à facilidade com que os dados são manipulados e por estarem disponíveis em meios eletrônicos de fácil acesso (TAGLIAFERRE *et al.*, 2010).

O uso de um modelo em uma determinada região pressupõe sua validade para um local específico, sendo de fundamental importância realizar a calibração e validação dos diferentes modelos para a região onde se deseja utilizá-los, levando em consideração as condições edafoclimáticas (JENSEN *et al.*, 1990).

Conforme Ferreira *et al.* (2015), as correlações entre os elementos meteorológicos medidos em condições padrões e a evapotranspiração, também medida em condições padronizadas, permitiram a elaboração de inúmeros modelos indiretos para estimar empiricamente a evapotranspiração de referência com base em variáveis meteorológicas locais. Assim, tem-se, na literatura, uma variedade de equações baseadas apenas na

temperatura do ar como variável independente ou modelos baseados no saldo de radiação global, até modelos mais complexos que necessitam de diversas variáveis meteorológicas para o cálculo.

Dentre as equações para estimativa da ETo com base na temperatura do ar, destacam-se as de Benavides-Lopes, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Kharrufa e outros (BENAVIDES-LOPES, 1970; CAMARGO, 1971; HAMON, 1961; HARGREAVES-SAMANI, 1985; KHARRUFA, 1985). Já em relação às equações de estimativa de ET com base no saldo de radiação global, evidenciam-se as de Jensen-Haise, Makkink, Priestley-Taylor, Radiação Solar e Turc (JENSEN-HAISE, 1963; MAKKINK, 1957; PRIESTLEY-TAYLOR, 1972; FREVERT *et al.*, 1983; TURC, 1961). Esses modelos foram desenvolvidos nas mais diversas condições climáticas e de manejo de culturas.

Devido à dificuldade da medição direta da evapotranspiração, vários estudos já foram realizados para se estimar empiricamente essa variável meteorológica em diferentes regiões, a exemplo dos estudos de Villa *et al.* (2021); Ongaratto e Bortolin (2021); Coutinho *et al.* (2020); Souza e Sousa (2020); Silva *et al.* (2020); Santos *et al.* (2017); Fanaya Junior *et al.* (2012); Tagliaferre *et al.* (2010).

Villa *et al.* (2021) avaliaram dez modelos indiretos de estimativa da ETo para a região de Palmeira das Missões-RS. O desempenho dos modelos foi avaliado através de uma série de indicadores estatísticos, em relação ao modelo FAO Penman-Monteith (FAO-PM). Para as condições micrometeorológicas deste município, obtiveram que os modelos de Penman e Jensen-Haise foram os que melhor estimaram a ETo.

Ongaratto e Bortolin (2021) realizaram comparações por meio de valores diários e mensais estimados pelo modelo de Penman-Monteith, o desempenho dos modelos de Thornthwaite, Hargreaves-Samani, Makkink, Blaney-Criddle, Camargo e Jensen-Haise para o município de São José dos Ausentes, no Rio Grande do Sul. Os resultados apontaram que o modelo de Blaney-Criddle foi o que apresentou os melhores valores nas escalas, tanto diária quanto mensal, seguido pelo modelo de Jensen-Haise, na escala mensal. Já os modelos que apresentaram baixo desempenho foram o de Thornthwaite e Camargo em ambas escalas.

Coutinho *et al.* (2020) compararam e avaliaram o desempenho dos modelos de estimativa de ETo: Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Benavides Lopez e Hamon com o modelo padrão Penman Monteith FAO-56, para estimar a ETo diária de seis regiões, três do estado do Rio de Janeiro e três do estado do Espírito Santo. O desempenho dos modelos foi avaliado por diferentes técnicas estatísticas onde o modelo que melhor se adaptou às localidades estudadas nos dois estados foi o de Jensen Haise.

Souza e Sousa (2020) estudaram o desempenho dos modelos empíricos de Benavides-Lopez, Camargo, Hargreaves-Samani, Kharrufa, Linacre, Thornthwaite, Thornthwaite modificado e Turc, correlacionando-os com o modelo de Penman-Monteith, na estimativa da evapotranspiração de referência em Rio de Branco, Acre. Os resultados evidenciaram que apenas o modelo de Turc estimou satisfatoriamente a ETo na região de estudo.

Santos *et al.* (2017) compararam modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Petrolina-PE. O modelo de Jensen-Haise foi considerado como o de melhor classificação de desempenho através dos indicadores estatísticos. Ainda, Fanaya Junior *et al.* (2012) estudaram o desempenho dos modelos empíricos de ETo: Benavides-Lopes, Hamon, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Priestley e Taylor e Turc, nas escalas diária, quinzenal e mensal, comparando com o modelo padrão de Penman-Monteith FAO-56, na região de Aquidauana- MS. Para as médias das estimativas diárias, quinzenais e mensais, o modelo de Priestley e Taylor obteve o melhor desempenho dentre os analisados, seguido pelo modelo de Hargreaves-Samani.

Tagliaferre *et al.* (2010) realizaram um estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis-BA. Atráves dos indicadores, obtiveram desempenho satisfatório para estimativa da ETo para os modelos de Radiação Solar e Blaney-Criddle, para as condições climáticas da região estudada.

3.2.2 Modelo Penman-Monteith FAO (PM-FAO)

Conforme Allen *et al.* (1998), o modelo Penman-Monteith é considerado pela FAO como padrão para a estimativa da ETo por apresentar o melhor desempenho quando aplicado em diversos tipos de clima. A determinação da ETo pelo modelo padrão é recomendada também para localidades com déficit de dados meteorológicos, e bastante utilizada para a calibração de outros modelos, visto que este se mostra eficiente em diversas condições climáticas e escalas de tempo.

Carvalho *et al.* (2011) destacaram que o modelo PM-FAO é considerado, internacionalmente, o mais apropriado para a estimativa da ETo, sendo adotado como padrão e que já vem sendo usado há duas décadas. Esse modelo, além de procurar representar, de maneira consistente, o fenômeno biofísico da evapotranspiração, engloba quase todos os elementos meteorológicos observados em estações meteorológicas de superfície.

Morais *et al.* (2015) ressaltaram que o modelo FAO adotado como padrão de estimativa em escala diária, demanda um grande número de variáveis meteorológicas e, por isso, tem

aplicação limitada, sendo utilizados quando há disponibilidade de todos os dados, em situações de campos experimentais e em áreas agrícolas onde há o emprego de um elevado padrão tecnológico. Adicionalmente, para utilização desse modelo é importante dispor de uma rede de monitoramento de dados meteorológicos (temperatura e umidade do ar, radiação solar, velocidade do vento e precipitação), de forma que se mantenha um banco de dados de referência com informações que forneçam subsídios para a avaliação dos estudos e projetos voltados à determinação da evapotranspiração (MOURA *et al.*, 2013)

Carvalho *et al.* (2013) pontuaram que modelos criados a partir da equação PM-FAO com dados faltantes tende a superestimar o modelo padrão. Contudo, com essa proposta alternativa é possível estimar ETo para irrigação em locais onde não há disponibilidade de todos os dados de entrada necessários para a equação PM-FAO. Em contrapartida, Alencar *et al.* (2015) observaram que, na ausência de dados de umidade relativa e velocidade do vento, o modelo de PM-FAO apresenta pequenos erros de estimativa. Na ausência dos dados de radiação, os erros são maiores em relação a outras variáveis.

Silva *et al.* (2018) analisaram o desempenho do modelo de PM-FAO com dados meteorológicos limitados e de outros modelos como alternativa para estimar a ETo no município de Jaíba-MG. Como resultados, verificaram que na ausência apenas de uma variável como radiação solar, umidade relativa ou velocidade do vento, o modelo de PM-FAO foi o que apresentou o melhor desempenho. Entretanto, quando há ausência de dados de radiação solar em conjunto com outra variável meteorológica, o modelo PM-FAO apresentou um médio desempenho. Já os modelos que utilizam somente dados de temperatura obtiveram baixo desempenho e são não recomendados para a região de estudo.

Embora a equação de PM-FAO seja, do ponto de vista teórico, uma das mais completas e precisas na estimativa da ETo, sua implementação é dificultada devido a necessidade de uma grande quantidade de dados meteorológicos e de parâmetros que descrevam a vegetação (GOERGEN, 2010).

3.3 Sensoriamento Remoto para estimativa da evapotranspiração

O SR pode ser definido como a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou em outras plataformas que têm como objetivo o estudo de eventos que ocorrem na superfície do planeta Terra (NOVO, 2010).

Segundo Andrade *et al.* (2015), devido à insuficiente disponibilidade de dados

meteorológicos, o SR destaca-se pela facilidade da coleta dos dados e por fornecer informações valiosas para a avaliação das condições da vegetação, auxiliando em tomadas de decisões que visam a melhoria dos sistemas produtivos locais.

As dificuldades de obtenção de dados de ETr em ecossistemas mistos através de medições de campo fizeram do SR por imagens de satélites uma ferramenta poderosa, a qual vem sendo utilizada em diferentes regiões climáticas e resoluções espaciais (TEIXEIRA *et al.*, 2014). Ressaltando mais ainda a importância dessa geotecnologia, Lima *et al.* (2014) afirmaram que o SR permite a estimativa da evapotranspiração em grandes áreas, como função das características biofísicas encontradas em cada *pixel*, com a vantagem do emprego de imagens de satélites na estimativa da evapotranspiração, em escala regional, sem a necessidade de se quantificarem outros parâmetros hidrológicos, como a umidade do solo.

Tito (2019) pontuou que o monitoramento da evapotranspiração é ainda mais relevante em regiões populosas inseridas em biomas ameaçados, que conseqüentemente exigem uma elevada demanda dos serviços ecossistêmicos como a regulação climática e recursos hídricos. Assim, torna-se fundamental o desenvolvimento de algoritmos que propõem a estimativa da evapotranspiração por SR em escalas diversificadas.

3.3.1 Sensor MODIS

O sensor MODIS (*MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) é um fundamental instrumento a bordo dos satélites Terra e Aqua, projetado para fornecer uma série de observações globais da superfície terrestre, oceano e atmosfera nas regiões do VIS e do IV (infravermelho) do espectro eletromagnético. Os satélites Terra e Aqua operam em órbitas heliosíncronas descendentes, com inclinação aproximada de 98,2 e 98 graus, respectivamente. O horário de passagem pela área de imageamento corresponde a aproximadamente 10:30 e 13:30 horas, para os satélites Terra e Aqua, respectivamente. Esses satélites integram o programa EOS (*Earth Observing System*), com o objetivo de gerar informações sobre os continentes e oceanos, com cobertura global (SOUZA, 2013).

Souza (2013) explanou, ainda, que o satélite Terra foi lançado em 18 de dezembro de 1999, sendo o primeiro do programa EOS. Essa plataforma possui os sensores MODIS, CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), MISR (*Multi-angle Imaging Spectro Radiometer*), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e o MOPITT (*Measurement of Pollution in the Troposphere*). Já o satélite Aqua,

foi lançado em 04 de maio de 2002, sendo o segundo pelo programa EOS, carregando consigo o Sensor MODIS e mais cinco instrumentos a bordo: o AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*), AMSU-A (*Advanced Microwave Sounding Unit-A*), HSB (*Humidity Sounder for Brazil*), AMSR-E (*Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS*) e CERES.

O sensor foi projetado para fornecer uma série de observações globais da superfície terrestre, oceano e atmosfera, com alta sensibilidade radiométrica (12 bits) em 36 bandas espectrais no intervalo de 0,4 a 14,4 μm do espectro eletromagnético. Duas bandas (bandas 1 e 2) são adquiridas com 250 m de resolução espacial, cinco bandas (bandas 3 a 7) com resolução de 500 m e as bandas restantes (bandas 8 a 36) com resolução de 1 km. Com varredura de 55° para cada lado a uma órbita de 705 km de altura, o sensor tem a capacidade de imagear uma faixa de 2.330 km, cobrindo totalmente a terra a cada 2 dias (MANZIONE *et al.*, 2013).

Os produtos do sensor MODIS, especialmente aqueles cujos potenciais de utilização são voltados a estudos relativos a ecossistemas terrestres, são extremamente úteis, pois têm propiciado a análise das transformações e perturbações ocorridas na cobertura vegetal ao longo de mais de 10 anos (VERBESSELT *et al.*, 2012).

Diante da grande quantidade de bandas disponíveis, foram desenvolvidos e disponibilizados 44 produtos MODIS para a comunidade científica, sendo MOD16 o produto de interesse neste trabalho.

3.3.1.1 Produto Global de Evapotranspiração MOD16

O produto MOD16, criado em 2006, possui dados de ETo para toda a superfície terrestre representando a transpiração das plantas e evaporação da superfície (SOUZA *et al.*, 2016). Este produto disponibiliza dados de evapotranspiração de referência (ETo), fluxo de calor latente (LE) e evapotranspiração potencial ET (ETP) são conjuntos de dados regulares de ETo de superfície terrestre de 1 km² para as áreas de terra vegetada global de 109,03 milhões de km² em 8 dias, intervalos mensais e anuais.

O produto de ETo é calculado a cada dia a partir de MOD12 (cobertura da superfície), MOD15 (Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida, Índice de Área Foliar) e dados meteorológicos do modelo GMAO (*Global Modeling and Assimilation Office*), com resolução espacial igual a 1 km. O desenvolvimento do algoritmo de ETo foi baseado na equação Penman-Monteith adaptada para uso com dados de SR (Cleugh *et al.*, 2006), onde maiores detalhes do algoritmo estão descritos em Mu *et al.* (2007; 2011). Ainda, o MOD16

estima a evapotranspiração com base em um conjunto de dados meteorológicos de reanálise globais, fornecendo uma considerável série temporal de dados de ET para todo o globo (LIAQAT e CHOI, 2017).

Os produtos MOD16A2/A3 integram o projeto NASA-EOS e tem como objetivo principal estimar a evapotranspiração com base em dados de SR dos sensores Terra/MODIS e Aqua/MODIS para o uso em aplicações hidrológicas e ecológicas de larga escala (MU *et al.*, 2007).

O MOD16 possui produtos quem permitem o preenchimento de lacuna, e têm a terminação "GF" adicionada aos nomes dos arquivos de dados, como MOD16A2 GF e MOD16A3 GF, para distinguir dos produtos não preenchidos. O MOD16A2 GF e MOD16A3 GF serão gerados no final de cada ano, quando todos os produtos anuais por composição de 8 dias estiverem disponíveis (Zhao *et al.*, 2005).

Os sensores Terra/MODIS e Aqua/MODIS, que possuem resolução espacial de 250 a 1000 metros com período de revisita diária, impulsionaram o monitoramento dos processos físico-químicos da superfície, possibilitando assim pesquisas com ETo geoespacializando padrões do mosaico terrestre em grande escala, a exemplo de Brito *et al.* (2018) quando utilizaram dados de evapotranspiração do sensor MODIS (Terra/Aqua), estimados pelo algoritmo MOD16, para verificar a aplicabilidade do produto de evapotranspiração para uma área de pastagem, na Fazenda Nossa Senhora no município de Ouro Preto do Oeste, Rondônia.

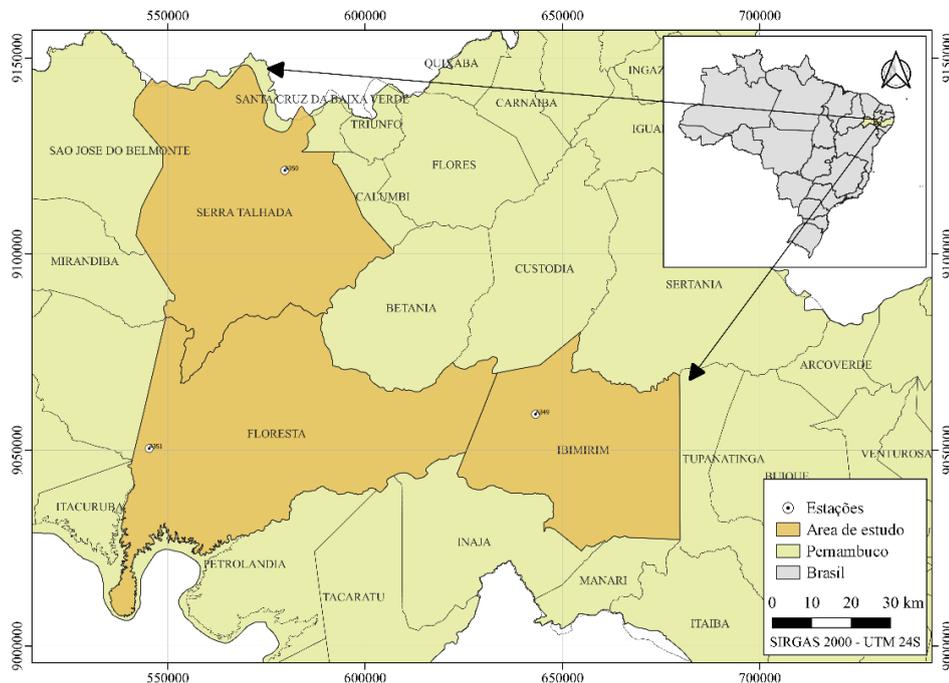
Teixeira *et al.* (2015) testaram a aplicação de uma nova metodologia de obtenção da evapotranspiração com a temperatura da superfície obtida com ou sem a banda termal com satélites MODIS e Landsat para verem a viabilidade em agros-ecossistemas envolvendo culturas irrigadas e vegetação natural, tomando-se como referência a região semiárida brasileira, nos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA. Do mesmo modo com dados orbitais, Moreira *et al.* (2018) avaliaram os produtos de evapotranspiração baseados em SR MOD16 e GLEAM em nove sítios de torres de fluxo brasileiros, para obter a compreensão da dinâmica do ciclo hidrológico, principalmente em grandes escalas, temporal e espacial.

Tito *et al.* (2021) realizaram a estimativa da evapotranspiração baseada em elementos meteorológicos e SR no Parque Nacional de Itatiaia-RJ, avaliando o comportamento da ET com uso de produtos MOD16. Em estudo subsequente, Andrade *et al.* (2022) utilizaram o produto MOD16 para realizar uma análise espaço-temporal da evapotranspiração na Bacia do Rio Paraibuna-MG, a partir de dados do sensor MODIS/Terra.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida com auxílio dos dados meteorológicos obtidos entre o período de 01 de janeiro de 2015 a 31 de dezembro de 2019 na rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), utilizando-se primeiramente das informações de 9 estações distribuídas por Pernambuco, das quais foram selecionadas 3 que apresentaram dados contínuos e sem interrupções, principalmente de radiação. As estações selecionadas situadas no Sertão do estado são: Floresta, Ibirimir e Serra Talhada (Figura 1).

Figura 1 – Mapa do estado de Pernambuco com destaque para cidades avaliadas, que possuem bases meteorológicas fixas do INMET



Fonte: O Autor (2022).

As características das estações, coordenadas, altitudes e classificação do clima dos municípios estudados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição das estações, coordenadas, altitudes e classificação do clima

Município	Estação INMET	Latitude	Longitude	Altitude (m)	*Clima
Floresta	A351	8°35'37"S	38°35'2"W	332	BSw'h'
Ibirimir	A349	8°30'34"S	37°42'41"W	448	BShW
Serra Talhada	A350	7°57'13"S	38°17'41"W	461	Bwh

Fonte: INMET (2022).

*Classificação de Köppen

A região Semiárida do Nordeste brasileiro é caracterizada pela heterogeneidade das condições naturais, como o solo, a topografia, a vegetação, as características socioeconômicas e o clima, que é a particularidade mais marcante desta região, sobretudo pela existência de um regime pluviométrico que delimita duas estações bem distintas: uma curta estação chuvosa, que se concentra de três a cinco meses, e uma longa estação seca, que tem duração de sete a nove meses, gerando um elevado índice de aridez (MORAIS *et al.*, 2015).

Segundo Ministério da Integração Nacional (2017) os critérios técnicos para delimitação do Semiárido aprovados pelas Resoluções do Conselho Deliberativo da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) são: precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm; índice de aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50; e percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano.

O município de Floresta está localizado a 433 km a oeste da cidade de Recife, na mesorregião São Francisco Pernambucano e microrregião Sertão de Itaparica. De acordo com a classificação de Köppen, Floresta apresenta o clima do tipo BSw'h', muito quente, semiárido, tipo estepe. A temperatura média anual é de 26,5 °C e as precipitações variam em torno de 623 mm, concentrando-se nos meses de janeiro a maio, sendo março e abril os mais chuvosos. A evapotranspiração potencial média é de 1646 mm ao ano, com déficit hídrico anual de 1023 mm (SILVA, 2011).

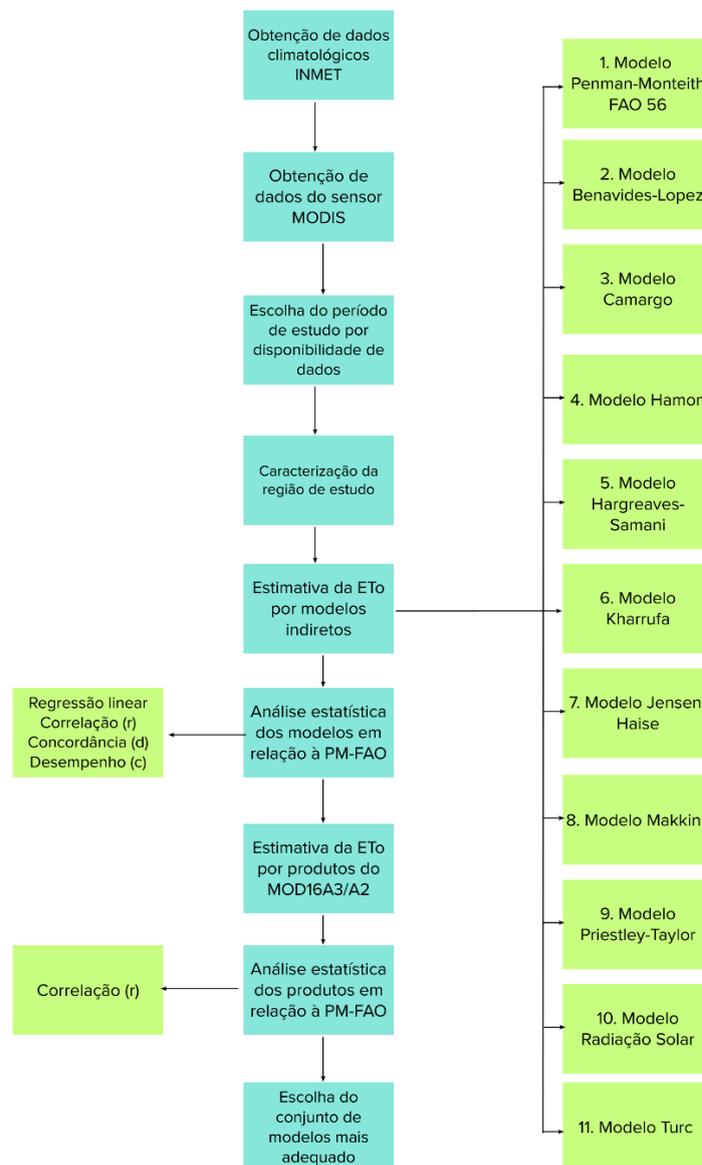
O município de Ibimirim está localizado na Mesorregião do Sertão Pernambucano e na Microrregião do Sertão do Moxotó, distante cerca de 300 km de Recife. Ibimirim, segundo a classificação de Köppen, apresenta um clima BShW (semiárido). A vegetação é típica de caatinga, sendo considerada caatinga hiperxerófila. O município faz parte do perímetro irrigado do Sertão pernambucano através das águas do açude Francisco Saboya. (FRANÇA *et al.*, 2013). Ao longo do ano, a temperatura varia de 18 °C a 36 °C e o período chuvoso dura de novembro a julho, sendo março o mês mais chuvoso.

O município de Serra Talhada está localizado no território do Pajeú na região Nordeste do Brasil na mesorregião do Sertão do estado de Pernambuco. De acordo com a classificação de Köppen, o clima dessa região enquadra-se no tipo Bwh, denominado semiárido quente, com chuvas de verão. O período chuvoso se inicia em novembro com término em abril. A temperatura média anual é de 25,2 °C (LUZ *et al.*, 2016).

A Figura 2 apresenta o fluxograma metodológico deste estudo, englobando todos os modelos avaliados. Foram avaliados valores diários de estimativa da ETo, em mm dia⁻¹, utilizando-se modelos indiretos e o de Penman-Monteith (FAO-56), no qual serviu de modelo

padrão de comparação. Os elementos climáticos coletados nas estações meteorológicas, em períodos diários, foram temperatura mínima (T_{min} , °C), máxima (T_{max} , °C) e média do ar (T_{med} , °C), umidade relativa do ar (%), radiação solar (R_s , $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$), velocidade do vento a 2 metros de altura ($m\ s^{-1}$) e precipitação (P , mm).

Figura 2 – Fluxograma Metodológico.



Fonte: O Autor (2022).

4.1 Modelo padrão

Nesse subtópico, abordou-se na metodologia o modelo Penman-Montheith recomentado como padrão na estimativa da evapotranspiração de referência, pela FAO-56.

4.1.1 Modelo Penman-Montheith FAO-56 – ETo (PM-FAO)

Modelo recomendado pela FAO e considerada a resistência estomática de 70 s m^{-1} , a altura da grama fixada em $0,12 \text{ m}$ e albedo de 23% , obtém-se a evapotranspiração de referência em (mm dia^{-1}) através da equação (ALLEN *et al.*, 1998):

$$ET_o(PM - FAO) = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) \cdot \gamma \cdot \frac{900}{(T + 273)} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (1)$$

Cada termo da equação (1) é calculado mediante a parametrização abaixo, sendo a temperatura média diária (T) monitorada na estação meteorológica e a constante psicrométrica (γ), em ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), determinada por:

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot P_{(atm)} \quad (2)$$

$$P_{(atm)} = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293} \right)^{5,26} \quad (3)$$

Onde:

$P_{(atm)}$ = Pressão atmosférica (Kpa);

z = altitude local (m).

A tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água atmosférico, em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$, é definida pela equação:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (4)$$

Para determinação da pressão de vapor na saturação (e_s), em kPa, faz-se o uso da seguinte equação:

$$e_s = \frac{e^0(T_{m\acute{a}x}) + e^0(T_{m\acute{i}n})}{2} \quad (5)$$

Onde:

$e^0(T_{m\acute{a}x})$ = pressão de saturação de vapor à temperatura máxima (kPa);

$e^0(T_{m\acute{i}n})$ = pressão de saturação de vapor à temperatura mínima (kPa).

Cada pressão citada é calculada pelas fórmulas que seguem:

$$e^0 (T_{m\acute{a}x}) = 0,6108 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T_{m\acute{a}x}}{T_{m\acute{a}x} + 237,3}} \quad (6)$$

$$e^0 (T_{m\grave{i}n}) = 0,6108 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T_{m\grave{i}n}}{T_{m\grave{i}n} + 237,3}} \quad (7)$$

Para o cálculo da pressão de vapor atual (e_a), em kPa, disponibilizando-se das umidades relativas máximas e mínimas, o Boletim da FAO-56 Allen *et al.* (1998) recomendam:

$$e_a = \frac{e^0(T_{m\grave{i}n}) \cdot \frac{UR_{m\acute{a}x}}{100} + e^0(T_{m\acute{a}x}) \cdot \frac{UR_{m\grave{i}n}}{100}}{2} \quad (8)$$

Onde:

$UR_{m\acute{a}x}$ = umidade relativa máxima do ar (%);

$UR_{m\grave{i}n}$ = umidade relativa mínima do ar (%).

A velocidade do vento a 2m de altura (U_2), em $m s^{-1}$, pode ser medida nas estações meteorológicas ou calculada pela equação:

$$U_2 = U_z \cdot \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot z_m - 5,42)} \quad (9)$$

Onde:

U_z = velocidade do vento na altura medida ($m s^{-1}$);

z_m = altura onde é medida a velocidade do vento (m).

O saldo da radiação ou radiação líquida, em $MJ m^{-2} dia^{-1}$, absorvida pela cobertura vegetal, o Boletim da FAO-56 define a equação:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (10)$$

Onde:

R_{ns} = saldo de radiação de ondas curtas ($MJ m^{-2} dia^{-1}$);

R_{nl} = saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Conhecendo-se que o saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns}) corresponde a seguinte formulação:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (11)$$

Neste caso, considera-se o valor de 0,23 para o albedo ou coeficiente de reflexão (α), a radiação solar incidente em ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), pode ser medida nas estações meteorológicas, como realizado neste trabalho, ou calculada pela definição Boletim da FAO-56:

$$R_s = (0,25 + 0,50 \frac{n_h}{N}) \cdot R_{a(mj)} \quad (12)$$

Onde:

n_h = número de horas reais de insolação (h);

N = insolação máxima teórica (h);

$R_{a(mj)}$ = radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

O número máximo de insolação (N) baseia-se no ângulo do pôr-do-sol (w_s) em radianos pela sequência das equações:

$$N = \frac{24 \cdot w_s}{\pi} \quad (13)$$

$$w_s = \arccos [-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (14)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right) \quad (15)$$

Onde:

φ = valor da latitude (rad);

δ = declividade solar (rad);

J = dia Juliano referente ao dia do mês no ano.

Em continuidade da parametrização da FAO-56, a radiação extraterrestre (R_a) é dada por:

$$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [w_s \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) + \text{cos}(\varphi) \cdot \text{cos}(\delta) \cdot \text{sen}(w_s)] \quad (16)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \text{cos}\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \quad (17)$$

Onde:

G_{sc} = constante solar ($0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$);

d_r = distância inversa relativa sol-terra em radianos;

J = dia em Juliano referente ao dia do mês no ano.

Finalmente, para cálculo da equação referente ao saldo da radiação ou saldo da radiação líquida (R_n), a Equação 18 define o saldo de radiação de ondas longas:

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[\frac{T_{max,K^4} + T_{min,K^4}}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \cdot \left(1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (18)$$

Onde:

σ = constante de Stefan-Boltzmann igual a $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;

$T_{max,K}$ = temperatura máxima diária em kelvin (K);

$T_{min,K}$ = temperatura mínima diária em kelvin (K);

R_{so} = radiação solar em dias de céu claro ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

e_a = pressão de vapor atual (kPa).

Assim, a radiação solar em dias de céu claro (R_{so}) pode ser representada pela equação:

$$R_{so} = (a_s + b_s) \cdot R_a \quad (19)$$

Onde:

a_s e b_s = fração da radiação extraterrestre em dias claros ($n=N$), porém não disponibilizando-se dos índices a_s e b_s , considera-se:

$$a_s + b_s = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z \quad (20)$$

Onde:

z = altitude local (m).

O fluxo de calor no solo (G), em ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), considerando-se para períodos diários, tem a recomendação pela FAO-56 que seja desprezado.

4.2 Modelos indiretos

Nesse subtópico, abordaram-se dez modelos indiretos na estimativa da evapotranspiração de referência: Benavides-Lopez, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Kharrufa, Jensen-Haise, Makkink, Priestley-Taylor, Radiação Solar e Turc.

4.2.1 Modelo de Benavides-Lopez – ETo (BL)

Na Equação 21, verifica-se o modelo de estimativa da evapotranspiração que foi proposto por Benavides e Lopes (1970) e, baseia-se em dados de temperatura e umidade relativa do ar.

$$ETo (BL) = 1,21 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot T}{237,5 + T}\right)} \cdot (1 - 0,01 \cdot UR) + 0,21 \cdot T - 2,30 \quad (21)$$

Onde:

$ETo (BL)$ = evapotranspiração de referência por Benavides e Lopes (mm dia^{-1});

T = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$);

UR = umidade relativa do ar (%).

4.2.2 Modelo de Camargo – ETo (C)

Para cálculo da ETo pelo modelo de Camargo foi utilizada a equação 22. Camargo e Camargo (2000) pontuaram a existência de uma equação extremamente simples para estimar a evapotranspiração potencial, que foi detalhada na terceira edição do Boletim 116 do Instituto Agronômico de Campinas (IAC).

$$ETo (C) = F \cdot R_a \cdot T \quad (22)$$

Onde:

$ETo (C)$ = evapotranspiração de referência por Camargo (mm dia^{-1});

R_a = radiação solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), calculada pela Equação 16 e convertida em

mm dia⁻¹ pela Tabela 2;

T = temperatura média do ar (°C);

F = fator de ajuste que varia com temperatura média anual do local (T até 23°C, F = 0,01; T = 24°C, F = 0,0105; T = 25°C, F = 0,011; T = 26°C, F = 0,0115; Tm > 26°C, F = 0,012).

Para realizar a conversão da radiação solar em mm dia⁻¹, foram utilizados dados da Tabela 2 proposta por Allen *et al.* (1998).

Tabela 2 – Fatores de conversão para radiação solar.

Unidades	Fator multiplicativo para obter energia recebida sobre uma superfície unitária por unidade de tempo				Equivalente de lâmina d'água evaporada mm dia ⁻¹
	MJ m ⁻² dia ⁻¹	J cm ⁻² dia ⁻¹	cal cm ⁻² dia ⁻¹	W m ⁻²	
1 MJ m ⁻² dia ⁻¹	1	100	23,9	11,6	0,408
1 cal cm ⁻² dia ⁻¹	4,1868.10 ⁻²	4,1868	1	0,485	0,0171
1 W m ⁻²	0,0864	8,64	2,06	1	0,035
1 mm dia ⁻¹	2,45	245	58,5	28,4	1

Fonte: Allen *et al.* (1998).

4.2.3 Modelo de Hamon – ETo (H)

O modelo desenvolvido por Hamon (1961) para estimativa da evapotranspiração é expresso pela Equação 23:

$$ET_o (H) = 0,55 \cdot \left(\frac{N}{12}\right)^2 \cdot \left(\frac{4,95 \cdot \exp^{0,062 \cdot T}}{100}\right) \cdot 25,4 \quad (23)$$

Onde:

$ET_o (H)$ = evapotranspiração de referência por Hamon (mm dia⁻¹);

N = insolação máxima teórica (h);

T = Temperatura média do ar (°C).

4.2.4 Modelo de Hargreaves-Samani – ETo (HS)

Desenvolvido para condições semiáridas, na ausência de dados de radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, a evapotranspiração pelo modelo de Hargreaves-

Samani (1985) tem sua estimativa através da Equação 24:

$$ETo(HS) = 0,0135 \cdot kt \cdot R_a \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot (T + 17,8) \quad (24)$$

Onde:

$ETo(HS)$ = evapotranspiração de referência por Hargreaves-Samani (mm dia⁻¹);

kt = coeficiente empírico, empregado em regiões continentais (0,162);

R_a = radiação solar extraterrestre (MJ m⁻² dia⁻¹), calculada pela Equação 16 e convertida em mm dia⁻¹ pela Tabela 2;

T = temperatura média do ar (° C);

T_{max} = temperatura máxima do ar (° C);

T_{min} = temperatura mínima do ar (° C).

4.2.5 Modelo de Kharrufa – ETo (K)

Modelo elaborado por Kharrufa (1985) a partir da relação entre ETo e a porcentagem de insolação máxima diária, conforme Equação 25:

$$ETo(K) = 0,34 \cdot p \cdot T^{1,3} \quad (25)$$

Onde:

$ETo(K)$ = evapotranspiração de referência por Kharrufa (mm dia⁻¹);

p = porcentagem de insolação máxima diária (N) em relação ao horário teórico do ano, conforme Tabela 2;

T = temperatura média do ar (° C).

Para obter a porcentagem de insolação máxima diária (p), foram interpolados os valores de latitudes de cada estação meteorológica com a faixa de valor latitude acima e abaixo encontrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Proporção média diária (p) de horas de luz para diferentes latitudes.

Latitude	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0 S	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,277	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
5 S	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28
10 S	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29
15 S	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29
20 S	0,30	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
25 S	0,31	0,29	0,28	0,26	0,25	0,24	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31
30 S	0,31	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23	0,24	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32
35 S	0,32	0,30	0,28	0,25	0,23	0,22	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32
40 S	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21	0,22	0,24	0,27	0,30	0,32	0,34
46 S	0,34	0,32	0,28	0,24	0,21	0,20	0,20	0,23	0,27	0,30	0,34	0,35
50 S	0,35	0,32	0,28	0,24	0,20	0,18	0,19	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36

Fonte: Doorembos e Pruitt (1990) *apud* Tucci (2012).

4.2.6 Modelo de Jensen-Haise – ETo(JH)

Para regiões áridas e semiáridas, Jensen e Haise (1963) apresentaram a equação 26 para estimativa da evapotranspiração obtida a partir da radiação solar e da temperatura média:

$$ETo(JH) = R_s \cdot (0,025 \cdot T + 0,08) \quad (26)$$

Onde:

$ETo(JH)$ = evapotranspiração de referência por Jensen-Haise (mm dia⁻¹);

R_s = radiação solar global expressa em equivalente de evaporação de água (mm dia⁻¹);

T = temperatura média do ar (° C).

4.2.7 Modelo de Makkink – ETo(MK)

O modelo para estimativa da evapotranspiração de referência a partir da medição da radiação solar foi proposto por Makkink (1957), conforme Equação 27:

$$ETo(MK) = R_s \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) + 0,12 \quad (27)$$

Onde:

$ETo(MK)$ = evapotranspiração de referência por Makkink (mm dia⁻¹);

R_s = radiação solar global expressa em equivalente de evaporação de água (mm dia^{-1});
 Δ = tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água atmosférico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);
 γ = constante psicromético ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

4.2.8 Modelo de Priestley-Taylor – ETo(PT)

Este modelo foi constituído em uma aproximação do modelo de Penman, em que permanece apenas o saldo de radiação corrigido por um coeficiente empírico, conhecido como parâmetro Priestley e Taylor, o qual considera a energia adicional ao processo de evapotranspiração proveniente do termo aerodinâmico. Priestley e Taylor (1972) determinaram que este coeficiente tem a média de 1,26 em condições mínimas de advecção regional, sendo a evapotranspiração de referência obtida pela Equação 28:

$$ETo(PT) = \alpha' \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \cdot (R_n - G) \quad (28)$$

Onde:

$ETo(PT)$ = evapotranspiração de referência por Priestley-Taylor (mm dia^{-1});

α' = parâmetro de Priestley-Taylor (1,26);

R_n = saldo de radiação expresso em equivalente de evaporação de água (mm dia^{-1});

G = fluxo de calor no solo (mm dia^{-1})

Δ = tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água atmosférico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

γ = constante psicromético ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

4.2.9 Modelo da Radiação Solar – ETo(RS)

O modelo possui um fator de correção (fr) que depende da velocidade do vento e da umidade relativa do ar, citado por Frevert *et al.* (1983), cuja estimativa pode ser realizada através da Equação 29:

$$ETo(RS) = fr \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \cdot R_s \quad (29)$$

Onde:

$ETo(RS)$ = evapotranspiração de referência por Radiação Solar (mm dia^{-1});

R_s = radiação solar global expressa em equivalente de evaporação de água (mm dia⁻¹);
 Δ = tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água atmosférico (kPa °C⁻¹);
 γ = constante psicromético (kPa °C⁻¹);
 f_r = fator de correção, calculado através da equação 30.

$$Fr = 1,066 - (1,28 \cdot 10^{-3} UR) + (4,5 \cdot 10^{-2} U_2) - (2 \cdot 10^{-4} UR \cdot U_2) + [3,15 \cdot 10^{-5} UR^2] - [1,103 \cdot 10^{-3} U_2^2] \quad (30)$$

4.2.10 Modelo de Turc – ETo(T)

O modelo de Turc (1961) foi baseado nas características do Oeste europeu, onde a média anual da umidade relativa do ar é maior que 50%, e tem sido utilizado em diferentes regiões, cuja estimativa da evapotranspiração é dada pela Equação 31:

$$ET_o(T) = a_t \cdot 0,013 \cdot \left(\frac{T}{T+15} \right) \cdot (R_s \cdot 41,867982 + 50) \quad (31)$$

Onde:

a_t = coeficiente de ajuste que tem como base a umidade relativa do ar (UR), quando a média diária de UR é maior ou igual a 50%, sendo descrita nas condições das Equações 32 e 33:

$$a_t = 1 + \left(\frac{50-UR}{70} \right), \text{ se } UR < 50 \quad (32)$$

$$a_t = 1, \text{ se } UR \geq 50 \quad (33)$$

$ET_o(T)$ = evapotranspiração de referência por Turc (mm dia⁻¹);

R_s = radiação solar global expressa em equivalente de evaporação de água (mm dia⁻¹);

T = temperatura média do ar (°C).

4.3 Obtenção de dados orbitais

Os dados de evapotranspiração de referência do sensor MODIS à bordo das plataforma orbital Terra foram gerados pelo projeto MODIS *Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product* (NASA MOD16A2/A3). Os produtos MOD16A3 e MOD16A2 com preenchimento de lacunas foram obtidos a partir do *site* LP DAAC (*Land Processes Distributed Active Archive Center*) (<https://lpdaac.usgs.gov/>) com resolução temporal, respectivamente, anual e

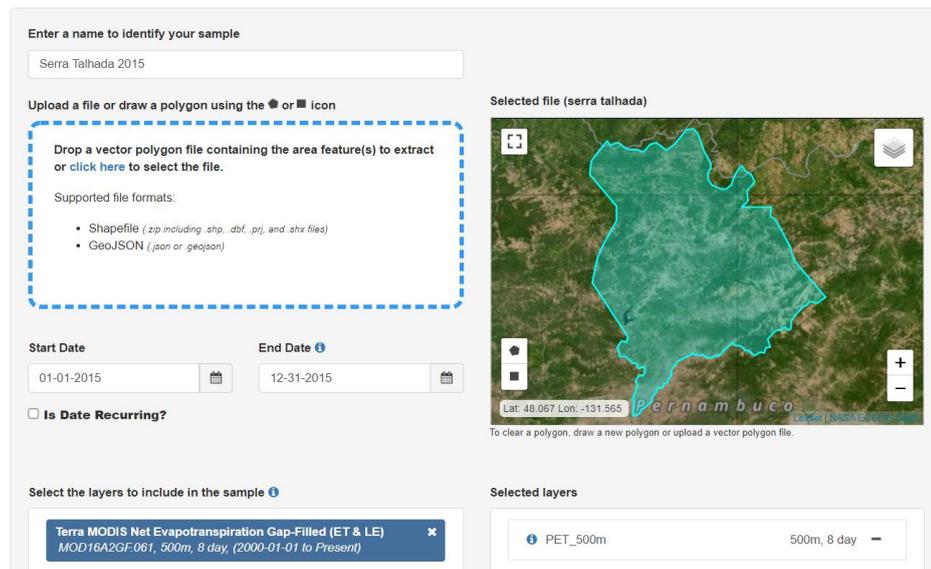
de 8 dias. As imagens compactadas dos produto de evapotranspiração foram disponibilizadas no formato GEOTIFF, com *datum* de referência WGS84, sistema geodésico.

Segundo Tito *et al.* (2021), o sensor MODIS foi desenhado para o mapeamento e monitoramento da terra, atmosfera, oceano e superfície terrestre com alta resolução temporal (tempo de revisita diário), com 36 bandas, a resolução espacial varia de acordo com o conjunto de bandas: 250 m (bandas 1 e 2); 500 m (bandas 3-7) e 1000 m (bandas, de 8 a 36).

Para baixar as imagens do produto MOD16A3 em escala anual foi utilizado o arquivo vetorial *shapefile* para que o *download* das imagens fossem apenas para a área de interesse (Figura 3). Neste trabalho, a ETP fornecida pelo MOD16 foi considerada como ETo, devido à adaptação da equação Penman-Monteith para uso do algoritmo com dados de SR.

O período de dados analisado corresponde ao mesmo aplicado para os modelos indiretos (janeiro de 2015 a dezembro de 2019). Assim, será possível realizar a comparação com a evapotranspiração padrão Penman-Monteith FAO, modeladas neste estudo.

Figura 3 – Foto ilustrativa do processo de extração por área do produto MOD16A3 para Serra Talhada-PE.



Fonte: O Autor (2022).

Utilizando o *software* QGIS 2.18.22 converte-se as imagens para escala anual para realizar a média anual da ET para cada um dos 5 anos de série histórica e seus números foram convertidos para valores biofísicos utilizando o fator de conversão de 0,1 para cada *pixel* (RUNNING *et al.*, 2017). Ainda, realizou-se pelo QGIS a reprojeção do sistema de referência de coordenadas para EPSG 32624, SIRGAS 2000 / UTM 24S.

Para fins comparativos anuais, foram analisados os valores acumulados de

evapotranspiração estimados pelo produto MOD16A3 através da inserção de coordenadas de latitude e longitude das estações meteorológica para a extração por ponto com resolução espacial de 500m, conforme exemplicado na Figura 4, em comparação aos valores de evapotranspiração acumulados estimados pelo modelo padrão.

Figura 4 – Foto ilustrativa do processo de extração por ponto do produto MOD16A2 para Ibimirim-PE.

The screenshot shows a web form for uploading coordinates. On the left, a dashed blue box contains instructions: 'Drop a CSV file containing the coordinates or click here to select the file. Coordinates can also be entered manually in the uploaded coordinates box.' Below this, it states 'The CSV file can contain up to 4 columns separated by commas with each coordinate on a separate line.' A numbered list follows: 1. ID (optional) - uniquely identifies the coordinate; 2. Category (optional) - label to group common coordinates; 3. Latitude - latitude in decimal degrees (-90 to 90); 4. Longitude - longitude in decimal degrees (-180 to 180). Below the instructions are date pickers for 'Start Date' (01-01-2015) and 'End Date' (12-31-2019), and a checkbox for 'Is Date Recurring?'. On the right, a box titled 'Uploaded coordinates (ID, Category, Lat, Long): 1' contains the text 'IB, PET, -8.50944444, -37.71138888'. Below this is a map titled 'Selected coordinates' showing a satellite view of a region with a blue pin and a callout box displaying the coordinates 'IB, PET, -8.50944444, -37.71138888'. The map includes labels for 'mbuco', 'Terra Indígena Kambiwá', and 'Parque Nacional do Catimbau'. At the bottom of the map, it shows 'Lat: -8.344 Lon: -37.304' and a legend for 'NASA VIIRS T10195'.

Fonte: O Autor (2022).

Além do cálculo anual de evapotranspiração MODIS para a comparação com o modelo padrão de evapotranspiração, também foram analisados períodos de seca e de chuva em cada região estudada para o ano de 2018 através de dados em composição de 8 dias, com extração por ponto (estações) pelo produto MOD16A2 para comparação com a ETo Penman-Monteith FAO, com o intuito de entender a melhor performance do modelo para diferentes escalas temporais.

4.3.1 Algoritmo MOD16

Segundo Mu *et al.* (2007), o produto de evapotranspiração é formado pelos elementos de sensores remotos e dados meteorológicos, calculados partir da utilização do algoritmo apresentado pela Equação 1, que é reescrito com base na equação mostrada por Cleugh *et al.* (2007).

$$ET = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \frac{\rho \cdot C_p \cdot (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (34)$$

Onde:

ET = evapotranspiração diária (mm dia⁻¹);

Δ = tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água atmosférico em relação à temperatura média do ar (Pa K⁻¹);

R_n = saldo de radiação (J dia⁻¹);

G = fluxo de calor do solo (J dia⁻¹);

ρ = densidade do ar (kg m⁻³);

C_p = calor específico do ar a uma pressão constante (J kg⁻¹ K⁻¹);

e_s e e_a = pressão de saturação do vapor e pressão de vapor no momento, respectivamente (Pa);

γ = constante psicométrica (0,066 kPa K⁻¹);

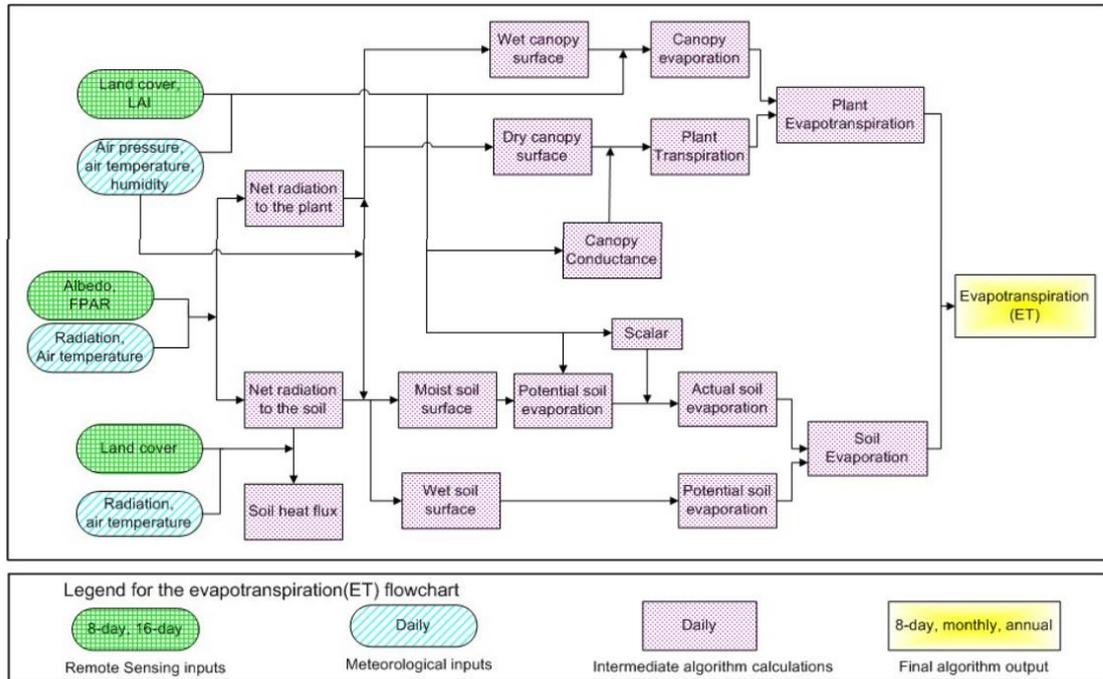
r_s e r_a = resistência de superfície e aerodinâmica, respectivamente (s m⁻¹).

Ruhoff *et al.* (2013) relataram que as melhorias do algoritmo MOD16 (MU *et al.* 2011) em relação à sua versão anterior (MU *et al.* 2007) incluem:

- a) Separação da cobertura em superfície úmida e seca, que fornece estimativas de perda de água da evaporação da cobertura da superfície úmida e da transpiração da cobertura da superfície seca;
- b) Consideração da superfície úmida e da umidade do solo, em que a evaporação da superfície do solo inclui a evaporação potencial da superfície úmida e a evaporação do solo;
- c) Inclusão de estimativas de ET diurnas e noturnas;
- d) A quantidade de fluxo de calor do solo é estimada e agora ocorre apenas para a radiação particionada para a superfície do solo;
- e) Aperfeiçoamento dos modelos de estimativa da resistência aerodinâmica e fração de cobertura vegetal.

A Figura 5 exhibe a lógica adotada no algoritmo MOD16 aprimorado para calcular a ET MOD16 em composição diária.

Figura 5 – Fluxograma do algoritmo ET MOD16 melhorado



Fonte: Running *et al.* (2021).

4.4 Avaliação estatística dos modelos

Os valores das estimativas de ETo diária para os 10 modelos indiretos foram comparados com os valores de ETo obtidos pelo modelo padrão de Penman-Monteith (FAO-56). Para avaliação da precisão dos modelos utilizou-se os indicadores estatísticos de regressão linear simples ($Y = a + bx$), coeficiente de correlação de Pearson (r) (Equação 35), e estimativa do erro padrão (EEP). Já para avaliação dos resultados dos produtos MOD16, utilizou-se o coeficiente de correlação “ r ” para ambos períodos, seco e chuvoso.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O) \cdot (P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}} \quad (35)$$

Onde:

r = coeficiente de correlação;

P_i = valores estimados pelos modelos (mm dia^{-1});

P = média dos valores estimados pelos modelos (mm dia^{-1})

O_i = valores observados pelo modelo de Penman-Monteith (mm dia^{-1});

O = média dos valores observados pelo modelo de Penman-Monteith (mm dia^{-1}).

Os valores de coeficientes de correlação encontrados foram classificados seguindo a metodologia sugerida por Silva e Barros Filho (2003), podendo variar de -1 a +1 (Tabela 4).

Tabela 4 – Classificação das correlações de acordo com o r.

Coeficientes de correlação (r)	Classificação
1	Perfeita positiva
0,70 a 0,99	Muito forte positiva
0,30 a 0,69	Moderada positiva
0,01 a 0,29	Fraca positiva
0	Nenhuma
-0,01 a -0,29	Fraca negativa
-0,30 a -0,69	Moderada negativa
-0,70 a -0,99	Muito forte negativa
-1	Perfeita negativa

Fonte: Silva e Barros Filho (2003).

Para exatidão dos modelos foi realizada a análise para a determinação do índice de concordância (d) de Willmott *et al.* (1981) (Equação 36) com valores variando de zero (nenhuma concordância) a 1 (concordância perfeita), como também a determinação do índice de desempenho (c) (Equação 37), que corresponde ao produto de “r” por “d” e interpretados conforme Camargo e Sentelhas (1997) (Tabela 5).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (36)$$

$$c = r \cdot d \quad (37)$$

Onde:

d = índice de concordância, adimensional, variando de 0 a 1.

P_i = valores estimados pelos modelos (mm dia⁻¹);

O_i = valores observados pelo modelo de Penman-Monteith (mm dia⁻¹);

O = média dos valores observados pelo modelo de Penman-Monteith (mm dia⁻¹);

c = índice de desempenho.

Tabela 5 – Critérios de interpretação do desempenho dos modelos de estimativa da ETo pelo índice “c”.

Índice de desempenho "c"	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 - 0,85	Muito bom
0,66 - 0,75	Bom
0,61 - 0,65	Mediano
0,51 - 0,60	Sofrível
0,41 - 0,50	Mal
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

O erro de estimativa padrão (EEP) mede a dispersão dos valores amostrados ao redor da reta de regressão, definido pela equação:

$$EEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-1}} \quad (38)$$

Onde:

EEP = estimativa do erro padrão (mm dia⁻¹);

Pi = valores estimados pelos modelos (mm dia⁻¹);

Oi = valores observados pelo modelo de Penman-Monteith (mm dia⁻¹);

n = número de observações.

A indicação dos modelos de estimativa da ETo para uso na região do Semiárido de Pernambuco seguiu os critérios da Tabela 5, sendo considerados os melhores modelos com índice de desempenho “c” superiores a 0,65. Os cálculos estatísticos foram realizados com o auxílio do software Microsoft Office Excel®.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar a compreensão, abordaram-se os resultados e discussão pelos seguintes subtópicos: comparação entre os modelos de estimativa da ETo diária e Sensor MODIS.

5.1 Comparação entre os modelos de estimativa da ETo diária

Nesse subtópico, abordaram-se os respectivos resultados comparativos dos modelos de estimativas da ETo diária para os municípios: Floresta, Ibimirim e Serra Talhada.

5.1.1 Município de Floresta

A Tabela 6 apresenta as médias diárias de estimativa da ETo para o município de Floresta, obtidas pelos modelos de Benavides-Lopez (ETo BL), Camargo (ETo C), Hamon (ETo H), Hargreaves-Samani (ETo HS), Kharrufa (ETo K), Jensen-Haise (ETo JH), Makkink (ETo MK), Priestley-Taylor (ETo PT), Radiação solar (ETo RS) e Turc (ETo T), comparados ao modelo padrão de Penman-Monteith (ETo PM) para o período de janeiro de 2015 a dezembro de 2019.

No município de Floresta, observou-se a superestimativa de ETo durante a maioria dos meses do ano para os modelos ETo (BL), ETo (K) e ETo (RS) com os valores percentuais de 5,9%; 6,5% e 17,4%, respectivamente, em relação ao modelo padrão ETo (PM). Em contrapartida, os modelos de ETo (C), ETo (HS), ETo (HA), ETo (PT) e ETo (T) subestimaram a ETo em todos os meses do ano, apresentando os seguintes percentuais absolutos em relação a ETo (PM): 27,5%; 25%; 40,5%; 29,6% e 47,0%, o que pode ser observado na Tabela 5. Dentre os modelos, ETo (MK) e ETo (JH) apresentaram valores mais próximos da estimativa ETo (PM), com valores percentuais de 0,9% e 1,0%, respectivamente.

Os resultados obtidos corroboram com os encontrados por Fanaya Júnior *et al.* (2012), Souza e Souza (2020) e Dias (2017) que evidenciaram tendência de superestimativa da ETo pelos modelos de Benavides-Lopez, Kharrufa e Radiação Solar, respectivamente, em relação ao modelo de Penman-Monteith.

Tabela 6 – Evapotranspiração média (ETo), diferença percentual em relação ao modelo padrão (ETo PM) dos modelos indiretos de ETo no município de Floresta-PE, 2015 a 2019.

MÊS	ETo (PM)	ETo (BL)	ETo (C)	ETo (HS)	ETo (K)	ETo (HA)	ETo (JH)	ETo (MK)	ETo (PT)	ETo (T)	ETo (RS)
mm dia ⁻¹											
JAN	7,34	7,79	5,60	5,62	7,88	4,59	7,49	7,32	5,29	3,83	8,51
FEV	6,94	7,58	5,59	5,65	7,67	4,45	7,44	7,29	5,32	3,79	8,42
MAR	6,86	7,59	5,44	5,41	7,73	4,33	7,58	7,40	5,34	3,81	8,55
ABR	6,27	7,29	4,92	4,75	7,34	4,03	6,60	6,53	4,63	3,40	7,55
MAI	5,66	6,74	4,31	4,26	6,87	3,67	5,67	5,72	3,92	3,00	6,63
JUN	4,81	5,55	3,59	3,68	6,16	3,13	4,74	5,03	3,39	2,66	5,86
JUL	4,87	5,19	3,41	3,66	5,84	2,97	4,61	5,01	3,38	2,64	5,87
AGO	6,27	5,99	4,03	4,53	6,29	3,26	6,02	6,37	4,24	3,28	7,46
SET	7,66	7,24	4,97	5,45	6,99	3,87	7,46	7,52	5,11	3,89	8,82
OUT	8,30	8,04	5,49	5,90	7,66	4,39	8,10	7,94	5,50	4,19	9,30
NOV	8,40	8,58	5,70	6,07	7,94	4,75	8,31	8,00	5,55	4,33	9,33
DEZ	7,75	8,29	5,68	5,81	8,03	4,79	7,96	7,69	5,44	4,15	8,92
MÉDIA	6,76	7,16	4,90	5,07	7,20	4,02	6,83	6,82	4,76	3,58	7,94
Dif. %	-	5,9	-27,5	-25,0	6,5	-40,5	1,0	0,9	-29,6	-47,0	17,4

Fonte: O Autor (2022).

Os menores valores diários de estimativa de erro padrão (EEP) foram obtidos pelos modelos de Makkink e Jensen-Haise 0,79 e 0,83 mm dia⁻¹, respectivamente, confirmando a precisão desse modelo, em relação ao modelo padrão de ETo (PM) (Tabela 7). Na Figura 6, observa-se uma maior proximidade entre os gráficos de evapotranspiração de médias diárias do modelo de Makkink (vermelho) e Jensen-Haise (roxo) em relação ao modelo padrão (azul claro).

Coutinho *et al.* (2020), estudando a evapotranspiração diária para a região do município Teresópolis-RJ, também observaram menor valor de erro padrão no modelo de Jensen-Haise, que chegou a chegou a 0,90 mm dia⁻¹, em relação à Penman-Monteith. Villa *et al.* (2021), também verificaram um valor de EEP menor do modelo de Makkink para a região de Palmeira das Missões-RS, em comparação ao modelo padrão.

Figura 6 – Médias diárias de estimativa de evapotranspiração no município de Floresta-PE.

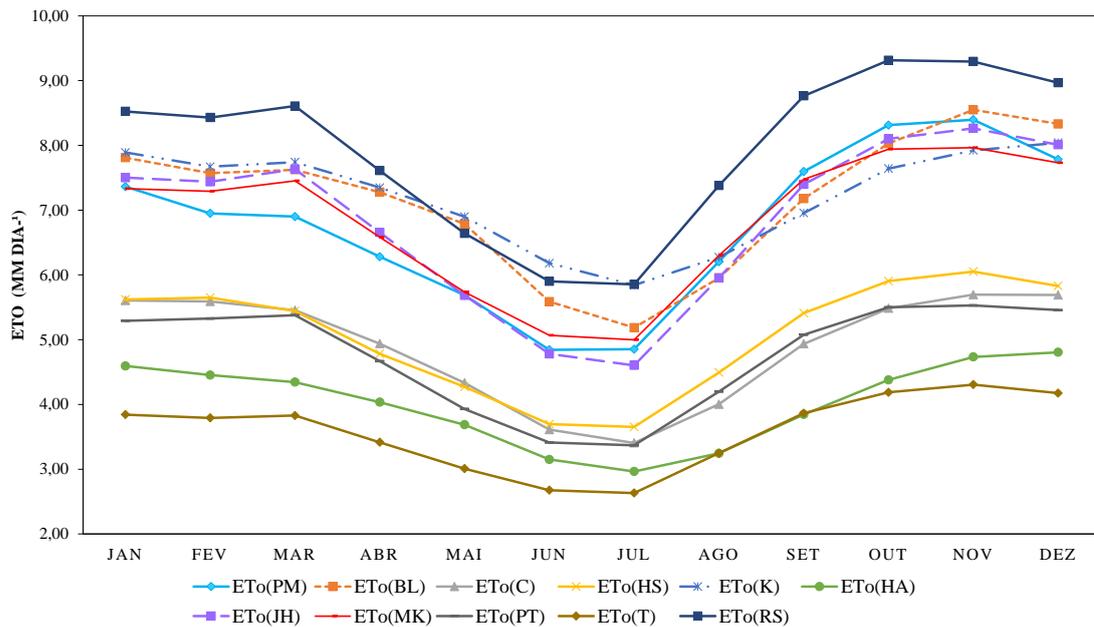


Tabela 7 – Índices e coeficientes de comparação entre os diferentes modelos de determinação da ETo, entre 2015 e 2019 para Floresta-PE.

Modelos Escala diária	EEP (mm dia ⁻¹)	r	d	c	Desempenho c	Correlação
Sem radiação solar						
ETo (BL)	0,978	0,86	0,794	0,68	Bom	Muito forte
ETo (C)	2,140	0,84	0,314	0,27	Péssimo	Muito forte
ETo (HS)	1,899	0,91	0,422	0,38	Péssimo	Muito forte
ETo (K)	1,168	0,81	0,596	0,49	Mau	Muito forte
ETo (HA)	2,958	0,82	0,162	0,13	Péssimo	Muito forte
Com radiação solar						
ETo (JH)	0,832	0,92	0,879	0,81	Muito bom	Muito forte
ETo (MK)	0,789	0,91	0,875	0,80	Muito bom	Muito forte
ETo (PT)	2,176	0,90	0,371	0,34	Péssimo	Muito forte
ETo (T)	3,302	0,91	0,177	0,16	Péssimo	Muito forte
ETo (RS)	1,452	0,92	0,709	0,65	Mediano	Muito forte

Fonte: O Autor (2022).

Na Tabela 7 foram apresentados os resultados dos indicadores estatísticos utilizados na avaliação de desempenho dos modelos de estimativa de ETo. Pela avaliação do coeficiente de correlação (r), todos os modelos foram classificados com correlação “Muito forte”. Os modelos HS (0,91), JH (0,92), MK (0,91), T (0,91) e RS (0,92) obtiveram maiores correlações, o que indica que estes modelos de determinação da ETo estimam com maior

precisão esta variável. Em estudo, Villa *et al.* (2021) obtiveram resultados com classificação “Muito forte” para os modelos MK (0,92), JH (0,94), HS (0,93) e T (0,92), corroborando com este estudo.

Santos *et al.* (2017), em um estudo comparativo de modelos para o Município de Petrolina-PE, obtiveram correlação de 0,79 para MK, 0,81 para JH e 0,73 para HS diferindo em valores menores do observado aqui e com melhor correlação ao modelo Ivanov (0,84), isto se deve a diferença da região geográfica de estudo. Souza e Sousa (2020) acharam correlação de 0,92 para o modelo de Turc em Rio Branco-AC, e baixa correlação nos modelos obtidos como “Muito forte” neste estudo. Essa divergência mostra a necessidade de realizar mais estudos e com uma base de dados maior, bem como considerando a climatologia da região.

Willmott e Wicks (1980) ressaltaram que o coeficiente de correlação não deve ser usado individualmente em uma análise de desempenho, devido ao fato de que esse coeficiente, muitas vezes, não está relacionado com o tamanho da diferença entre um valor padrão e um valor previsto por modelos de estimativa ou outros mecanismos de medida diferente do padrão. Dessa forma, utiliza-se o índice de concordância “d” de Willmott para quantificar a homogeneidade da dispersão em relação à reta 1:1, conforme Equação 36.

Verificou-se na Tabela 7 que os modelos com maiores índices de concordância “d” foram Jensen-Haise (0,879) e Makkink (0,875), compatível com os dados encontrados para por Ongaratto e Bortolin (2021), Jensen-Haise (0,93) e Makkink (0,89). Os demais modelos apontaram valores “d” entre 0,794 e 0,162.

Em relação ao índice de desempenho “c” proposto por Camargo e Sentelhas (1997) apresentado na Tabela 7, na escala diária, os resultados foram de “Muito Bom” a “Péssimo”, em conformidade aos resultados encontrados por Souza e Souza (2020) e diferenciado de Tagliaferre *et al.* (2010) com resultados de “Ótimo” a “Mediano” para o município de Eunápolis-BA.

Ainda com os resultados apresentados na Tabela 7 permitem identificar que, entre os dez modelos analisados, o que apresentou melhor desempenho em relação a Penman-Monteith foi o modelo de Jensen-Haise, com desempenho “Muito bom” na escala diária com índice de concordância “c” igual a 0,81, uma vez que a equação Jesen-Haise foi desenvolvida para regiões áridas e semiáridas, demonstrando seu bom desempenho para a região estudada.

Nas pesquisas realizadas com dados diários da ETo na cidade de Mendes-RJ, Coutinho *et al.* (2020) encontraram resultados que evidenciaram uma melhor eficácia para o modelo de Jensen-Haise, tendo obtido o índice de confiabilidade (c) de 0,83 em comparação

ao modelo de Penman-Monteith. Este resultado corrobora com o presente estudo e potencializa o emprego do modelo na estimativa da evapotranspiração de referência para a localidade analisada.

Santos *et al.* (2017) também verificaram eficácia semelhante para o modelo de Jensen-Haise ($c = 0,71$), no município de Petrolina-PE. Segundo Dias (2017), infere-se que a caracterização da eficiência para o modelo de Jensen-Haise é sua necessidade do elemento radiação solar, que muitos trabalhos têm apontado que o que apresenta maior correlação com a ETo.

O modelo de Makkink, que utiliza como variável de entrada a temperatura do ar e a radiação solar global, também foi classificado com desempenho “Muito bom”, apresentando índice “c” igual a 0,80 na escala diária. A equação de Makkink apresentou alto valor de correlação “r”, resultando em um bom ajuste em relação ao modelo padrão. Villa *et al.* (2021) também encontraram resultados semelhantes, classificando o modelo com desempenho “Muito bom” na escala diária.

Os modelos de Benavides-Lopez e Radiação Solar apresentaram desempenho caracterizado como “Bom” e “Mediano”, com índice “c” de 0,68 e 0,65, respectivamente. Os resultados encontrados neste trabalho corroboram os dados de Villa *et al.* (2021) e Cunha *et al.* (2013) que obtiveram resultados de desempenho “Muito bom” para o modelo de Benavides-Lopez (0,78) e “Mediano” para Radiação Solar (0,64), respectivamente.

Entre os modelos analisados, os que apresentaram os piores resultados foram Camargo, Hargreaves-Samani, Hamon, Priestley-Taylor, Turc e Kharrufa, este classificado como “Mau” e os demais como “Péssimo” na escala diária, todos não devem ser utilizados na região supracitada. Resultados semelhantes para o modelo de Hamon e Hargreaves-Samani foram observados por Santos *et al.* (2017) no município de Petrolina-PE, respectivamente, com desempenho “Péssimo” e “Sofrível”.

Resultados divergentes ao observado nesse estudo foram descritos por Souza e Sousa (2020); e Tagliaferre *et al.* (2010), onde o modelo de Turc foi classificado como “Muito bom” para o coeficiente de desempenho (0,85 e 0,81, respectivamente).

A análise dos dados foi por regressão linear, conforme Figura 6, que mostra as correlações em relação à reta 1:1 (tracejada). A reta da regressão linear expressa a correlação entre os valores por gráficos, correspondendo a melhor resposta dos valores referentes a menor dispersão dos pontos próximos da reta 1:1. Os gráficos e os modelos resultantes da regressão linear também podem ser visualizados na Figura 7, levando em consideração os modelos indiretos de estimativa da ETo utilizados na análise tendo como o modelo Penman-

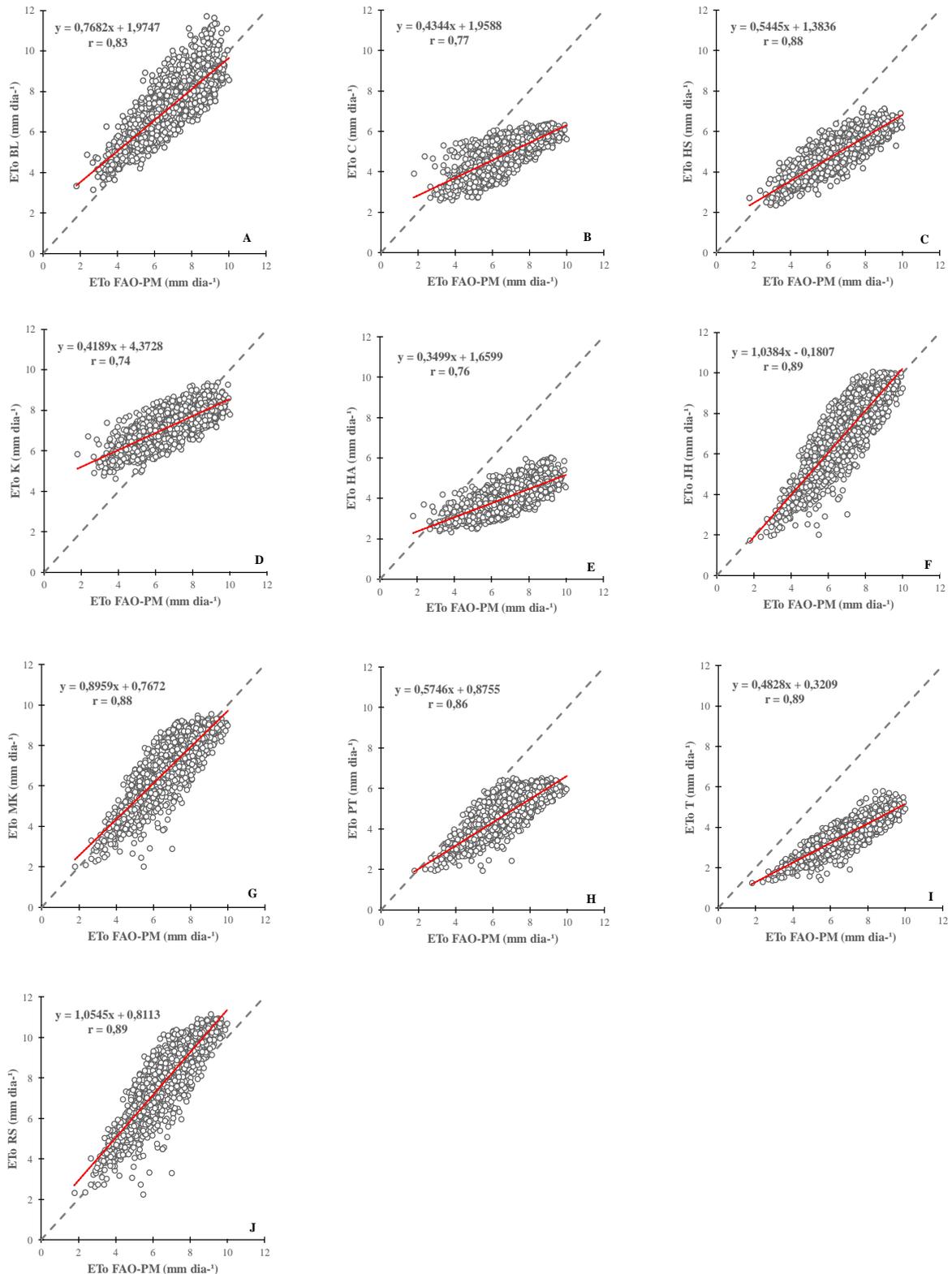
Monteith FAO como padrão na escala diária. Observa-se, com base na reta de regressão (vermelha), o modelo de Benavides-Lopez e Makkink subestimaram, graficamente, a ETo em valores acima de $8,0 \text{ mm dia}^{-1}$, em relação ao modelo PM-FAO.

Os modelos de Camargo, Hargreaves-Samani e Hamon subestimaram a ETo quando os valores de Penman-Monteith FAO acusaram estimativas superiores a $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$, e o modelo de Kharrufa superiores a $7,0 \text{ mm dia}^{-1}$. Os modelos de Priestley-Taylor e Turc subestimaram a ETo padrão na região analisada (Figura 7). Em contrapartida, o modelo de Radiação Solar superestimou a ETo em relação ao modelo padrão, o que pode estar relacionado a aplicabilidade climática de origem dos modelos empregados.

Já o modelo Jensen-Haise se destacou por apresentar altos valores de regressão, ou seja, esse modelo superestimou os valores de ETo em relação ao modelo padrão e demonstrou bom desempenho na região Semiárido, corroborando com Cunha *et al.* (2013) em estudos no município de Chapadão do Sul-MS.

Fanaya Júnior *et al.* (2012) chegaram resultados diferentes ao deste trabalho, observando altos valores de regressão e superestimativa para os modelos de Hamon (0,76) e Turc (0,96) para a região de Aquidauana-MS.

Figura 7 – Regressão linear entre os valores diários de ETo estimados pela comparação dos modelos de Benavides-Lopez (A), Camargo (B), Hamon (C), Hargreaves-Samani (D), Kharrufa (E), Jensen-Haise (F), Makkink (G), Priestley-Taylor (H), Turc (I) e Radiação Solar (J), com padrão Penman-Monteith FAO, entre os anos de 2015 e 2019 em Floresta-PE.



Fonte: O Autor (2022).

5.1.2 Município de Ibimirim

A Tabela 8 mostra as médias diárias de estimativa da ETo para o município de Ibimirim, obtidas pelos modelos de Benavides-Lopez (ETo BL), Camargo (ETo C), Hamon (ETo H), Hargreaves-Samani (ETo HS), Kharrufa (ETo K), Jensen-Haise (ETo JH), Makkink (ETo MK), Priestley-Taylor (ETo PT), Radiação solar (ETo RS) e Turc (ETo T), comparados ao modelo padrão de Penman-Monteith (ETo PM) para o período de janeiro de 2015 a dezembro de 2019.

Tabela 8 – Evapotranspiração média (ETo), diferença percentual em relação ao modelo padrão (ETo PM) dos modelos indiretos de ETo no município de Ibimirim-PE, 2015 a 2019.

MÊS	ETo (PM)	ETo (BL)	ETo (C)	ETo (HS)	ETo (K)	ETo (HA)	ETo (JH)	ETo (MK)	ETo (PT)	ETo (T)	ETo (RS)
mm dia ⁻¹											
JAN	7,14	7,13	5,39	5,75	7,50	4,28	7,42	7,43	5,33	3,81	8,66
FEV	6,77	6,93	5,37	5,70	7,29	4,15	7,36	7,38	5,36	3,77	8,57
MAR	6,47	6,86	5,21	5,43	7,32	4,01	7,08	7,09	5,14	3,64	8,23
ABR	5,85	6,25	4,63	4,75	6,81	3,65	6,44	6,58	4,67	3,38	7,68
MAI	5,34	5,86	4,00	4,19	6,38	3,33	5,44	5,68	3,88	2,96	6,65
JUN	4,74	5,01	3,32	3,71	5,83	2,94	4,52	4,92	3,32	2,60	5,81
JUL	4,80	4,64	3,15	3,63	5,55	2,79	4,48	4,98	3,38	2,61	5,95
AGO	5,99	5,17	3,62	4,50	5,86	2,99	5,70	6,22	4,18	3,19	7,41
SET	7,07	6,15	4,49	5,31	6,40	3,46	6,82	7,15	4,90	3,65	8,46
OUT	7,83	7,16	5,20	5,94	7,15	4,00	7,68	7,77	5,38	4,01	9,13
NOV	7,98	7,62	5,39	6,09	7,41	4,31	8,05	8,00	5,53	4,19	9,35
DEZ	7,53	7,63	5,45	5,92	7,64	4,46	7,78	7,70	5,41	4,05	8,95
MÉDIA	6,46	6,37	4,60	5,08	6,76	3,70	6,56	6,74	4,71	3,49	7,90
Dif. %	-	-1,4	-28,8	-21,4	4,6	-42,7	1,5	4,3	-27,1	-46,0	22,3

Fonte: O Autor (2022).

Em Ibimirim, observou-se a superestimativa de ETo durante todos os meses do ano para o modelo de ETo (RS) em um valor médio de 22,3% em relação ao modelo padrão ETo (PM). Em contrapartida, os modelos de ETo (C), ETo (HS), ETo (HA), ETo (PT) e ETo (T) subestimaram a ETo em todos os meses do ano, apresentando os seguintes percentuais absolutos em relação ao modelo ETo (PM): 28,8%; 21,4%; 42,7%; 27,1% e 46,0%, o que pode ser observado conforme os gráficos na Figura 7. Dentre os modelos, ETo (BL), ETo

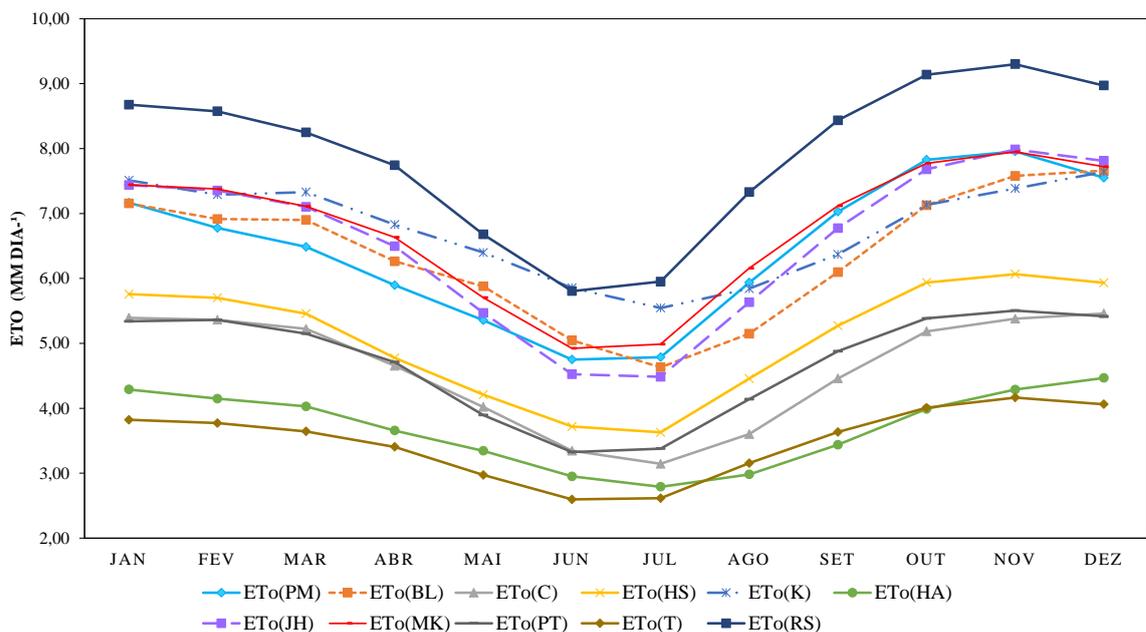
(K), ETo (JH) e ETo (MK) apresentaram valores médios mais próximos da estimativa ETo (PM), com valores percentuais absolutos de 1,4%, 4,6%, 1,5% e 4,3%, respectivamente.

Os resultados obtidos são compatíveis com os valores encontrados por Mendonça e Dantas (2010), que notaram a tendência de superestimativa da ETo pelo modelo de Radiação em relação ao modelo de Penman-Monteith, no município de Capim-PB. Fanaya Júnior *et al.* (2012) também encontraram a tendência de subestimativa em todos os meses do ano para os modelos de Hamon e Turc em relação ao modelo padrão ETo (PM), corroborando com o estudo.

Os menores valores médios diários de estimativa de erro padrão (EEP), em Ibimirim, foram encontrados com Makkink ($0,753 \text{ mm dia}^{-1}$) e Jensen-Haise ($0,762 \text{ mm dia}^{-1}$), demonstrando maior precisão de estimativa em relação ao modelo padrão (Tabela 9), o que corrobora com os dados obtidos neste estudo para o município de Floresta, também inserido no Sertão Pernambucano.

O modelo de Benavides-Lopez apresentou EEP de $0,891 \text{ mm dia}^{-1}$, já os demais modelos apresentaram EEP menos precisas com valores entre $1,095$ a $3,084 \text{ mm dia}^{-1}$. Na Figura 8, observa-se uma maior proximidade entre os gráficos de evapotranspiração de médias diárias do modelo de Makkink (vermelho), Jensen-Haise (roxo) e Benavides-Lopez (laranja) em relação ao modelo padrão ETo PM (azul claro), o que vai de encontro a dispersão da EEP.

Figura 8 – Médias diárias de estimativa de evapotranspiração no município de Ibimirim-PE.



Fonte: O Autor (2022).

Villa *et al.* (2021) também observaram valores próximos de EPP na escala diária para Makink ($0,96 \text{ mm dia}^{-1}$) e Jensen-Haise ($0,81 \text{ mm dia}^{-1}$), compatíveis aos resultados observados em Ibiririm.

Sanches *et al.* (2015) avaliaram na região Norte do Brasil seis modelos para a estimativa da ETo e concluíram que o modelo de Priestley e Taylor obteve bons resultados, com erro próximo de 10%. Já para o modelo de Jensen-Haise, os autores chegaram a resultados de EPP diferentes ao deste estudo com baixa precisão para a metodologia.

Tabela 9 - Índices e coeficientes de comparação entre os diferentes modelos de determinação da ETo, entre 2015 e 2019 para Ibiririm-PE.

Modelos Escala diária	EEP (mm dia^{-1})	r	d	c	Desempenho c	Correlação
Sem radiação solar						
ETo (BL)	0,891	0,85	0,789	0,67	Bom	Muito forte
ETo (C)	2,102	0,83	0,299	0,25	Péssimo	Muito forte
ETo (HS)	1,565	0,90	0,506	0,46	Mau	Muito forte
ETo (K)	1,095	0,79	0,577	0,46	Mau	Muito forte
ETo (HA)	2,957	0,80	0,132	0,11	Péssimo	Muito forte
Com radiação solar						
ETo (JH)	0,762	0,92	0,881	0,81	Muito Bom	Muito forte
ETo (MK)	0,753	0,92	0,872	0,80	Muito Bom	Muito forte
ETo (PT)	1,912	0,91	0,402	0,36	Péssimo	Muito forte
ETo (T)	3,084	0,92	0,170	0,16	Péssimo	Muito forte
ETo (RS)	1,631	0,92	0,627	0,58	Sofrível	Muito forte

Fonte: O Autor (2022).

Na Tabela 9 pode-se verificar os resultados dos indicadores estatísticos aplicados na avaliação de desempenho dos modelos de estimativa de ETo. Pela avaliação do coeficiente de correlação de correlação (r) todo os modelos foram classificados como “Muito forte” segundo classificação Silva e Barros Filho (2003). Os modelos que obtiveram maiores correlações foram os modelos JH (0,92), MK (0,92), T (0,92) e RS (0,92), o que indica que estes modelos de determinação da ETo estimam com maior precisão em relação ao modelo PM. Na análise, observa-se maiores valores de “r” para os modelos com uso da variável radiação solar em sua equação.

Sanches *et al.* (2015) obtiveram os resultados para os modelos MK (0,85) e JH (0,80), sendo classificados como “Muito forte”, em conformidade com este estudo. Oliveira *et al.* (2010) observaram correlação de 0,87 para MK em seu estudo na região norte da Bahia.

Rigoni *et al.* (2013) acharam correlação “Muito forte” para os modelos de JH (0,99), MK (0,98), PT (0,99), RS (0,98) e T (0,98) em Aquidauana-MS, e baixa correlação nos modelos baseados na temperatura do ar, assim como observado neste estudo.

Em relação ao índice de concordância “d”, verifica-se na Tabela 8 que os modelos com maiores valores foram Jensen-Haise (0,881) e Makkink (0,872), e os demais modelos apontaram valores “d” entre 0,789 e 0,132, compatível com os dados encontrados neste estudo para o município de Floresta. Rigoni *et al.* (2013) obtiveram maior índice de concordância “d” para o modelo de Priestley-Taylor (0,899), diferindo da região analisada de Ibimirim.

Na Tabela 9 elencaram-se os resultados de índice de desempenho “c” proposto por Camargo e Sentelhas (1997), na escala diária, com classificação de “Muito Bom” a “Péssimo”, que corroboram com a escala de resultados encontradas por Rigoni *et al.* (2013) e Moura *et al.* (2013), esses observaram tal classificação no Riacho Gameleira, localizado no município de Vitória de Santo Antão-PE.

O modelo que demonstrou melhor desempenho dentre os modelos analisados em relação a ETo PM foi o modelo de Jensen-Haise, com desempenho “Muito bom” na escala diária com índice de concordância “c” igual a 0,81 e EEP inferior a 1.

Ongaratto e Bortolin (2021) também verificaram resultado de desempenho “Muito bom” com índice de confiabilidade de 0,81 na escala diária, para o modelo de Jensen-Heise no município São José dos Ausentes-RS. Jung *et al.* (2016) destacam que o modelo de Jensen-Haise apresenta um desempenho bom no período de secas, porém inferior no período chuvoso.

Os modelos de Makkink e Benavides-Lopez apresentaram desempenho na escala diária considerados como “Muito bom” e “Bom” (Tabela 9), respectivamente, com destaque para o modelo de Makkink que apresentou desempenho de 0,80 e estimativa de erro padrão de 0,75 mm dia⁻¹. Brixner *et al.* (2014) também constatou em estudo na Campanha Gaúcha o desempenho “Muito bom” para o modelo de Makkink, com “c” igual a 0,78.

Na Tabela 9, foi possível verificar que, para escala diária, alguns modelos que utilizam dados de radiação solar global apresentaram maior desempenho do que aqueles que utilizaram apenas a temperatura do ar.

Os modelos de Camargo, Hamon, Priestley-Taylor e Turc apresentaram desempenho “Péssimo” e valores de EEP acima de 1, o que destaca sua não recomendação por baixa precisão para seu uso na região de Ibimirim-PE. O modelo Radiação Solar foi classificado como sofrível (c = 0,58), apresentando EEP de 1,63 mm dia⁻¹. Já os modelos Hargreaves-

Samani ($c = 0,0,46$) e Kharrufa ($c = 0,46$) obtiveram desempenho “Mau”.

Rigoni *et al.* (2013) observaram o mesmo resultado de classificação “Péssimo” para os modelos de Camargo, Hamon e Kharrufa, ainda, destacaram que os modelos de estimativa da evapotranspiração de referência quem empregam apenas a temperatura do ar apresentam menor desempenho quando comparados aos modelos que empregam radiação solar.

Quanto ao índice de confiança “c”, Villa *et al.* (2021) classificaram o modelo de Jensen-Haise como “Ótimo” para estimar a ETo em Palmeiras das Missões-RS, com EEP de $0,81 \text{ mm dia}^{-1}$, estando em concordância com o resultado encontrado em Ibimirim.

Resultados divergentes foram encontrados por Sanches *et al.* (2015), onde os modelos de Jensen-Heise ($c = 0,26$), Makkink ($c = 0,26$) e Hargreaves-Samani ($c = 0,29$) apresentaram menor desempenho quando comparados ao modelo padrão FAO, sendo classificados como “Péssimo” para a região do Norte da Bahia.

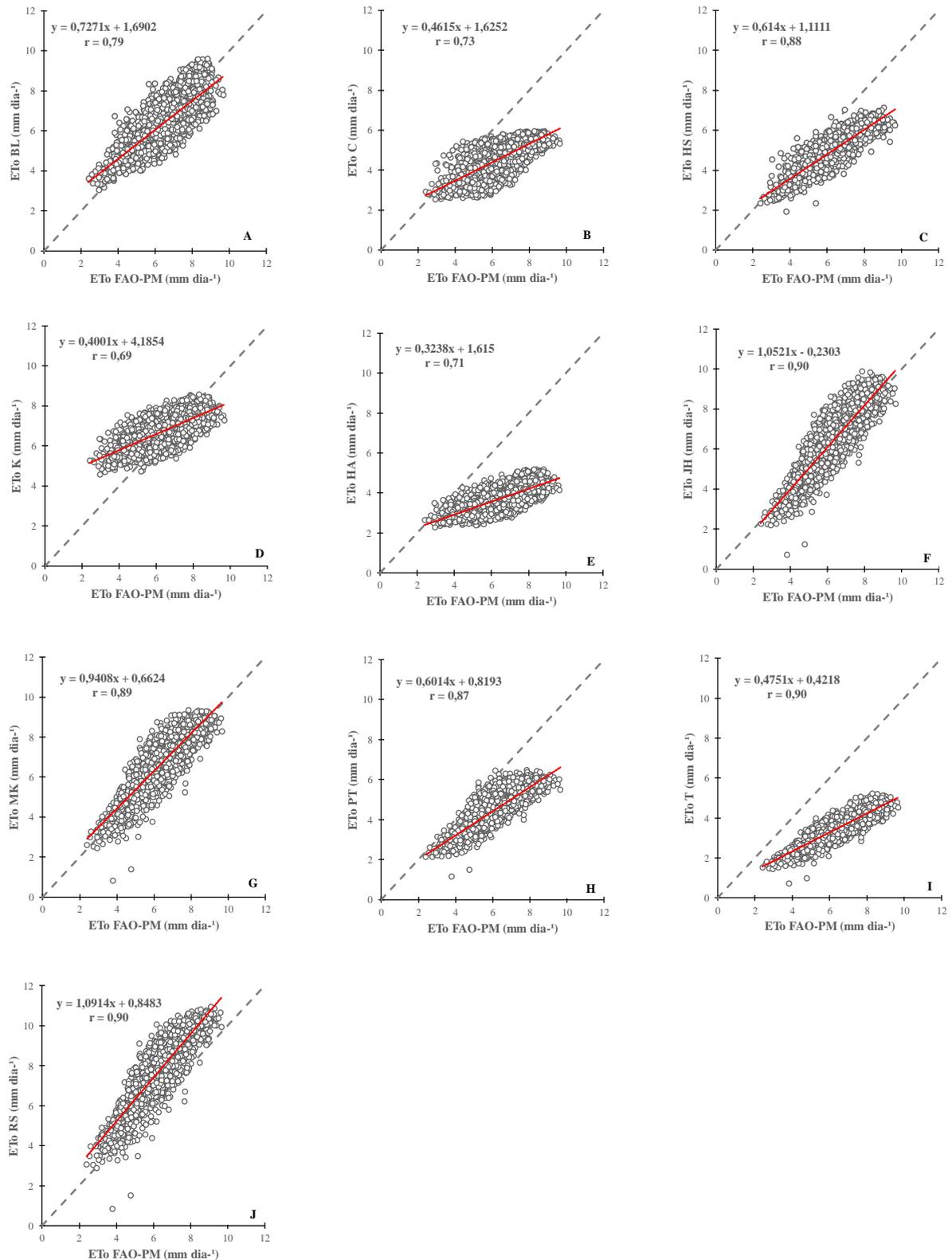
Na Figura 9 encontra-se a comparação por regressão linear entre a ETo obtida por distintos modelos indiretos com o modelo padrão FAO no período diário de 2015 a 2019, para Ibimirim-PE. Observou-se, com base na reta de regressão (vermelha), o modelo de Benavides-Lopez e Kharrufa subestimaram os valores de ETo apenas quando o modelo padrão acusou estimativas acima de $7,0 \text{ mm dia}^{-1}$.

Os modelos de Camargo, Hargreaves-Samani, Hamon, Priestley-Taylor e Turc subestimaram a ETo em todos os valores estimados em relação ao modelo Penman-Monteith-FAO. Já os modelos de Jensen-Haise, Radiação Solar e Makkink se destacaram por apresentar coeficientes angulares de 1,052; 1,091 e 0,941, respectivamente, indicando previamente ótima performance na resposta em estimativas de ETo comparado ao modelo padrão Penman-Monteith, corroborando com Santos *et al.* (2017) em estudos no município de Petrolina-PE, com resultados de coeficiente angular similar para o modelo de Jensen-Haise.

Villa *et al.* (2021) também observaram uma tendência de subestimativa da ETo para os modelos de Camargo, Benavides-Lopez e Turc na regressão linear. Brixner *et al.* (2014) observaram resultados diferentes, com subestimativa para o modelo de Jensen-Haise e melhor aproximação da reta 1:1 para o modelo de Camargo, no município de Campanha-RS, o que mostra a baixa performance do modelo Jensen-Haise para regiões diferentes do semi-árido.

Em estudos de Rigoni *et al.* (2013), foram obtidos para os modelos de Hargreaves-Samani e Kharrufa coeficientes angulares das retas próximo de 1, ou seja, a distribuição da ETo em relação ao modelo padrão apresentou superestimativa em torno de 15%, divergindo dos resultados deste estudo que apresentaram, respectivamente, superestimativa de 40% e 60% para os modelos, o que também pode estar relacionado às diferenças regionais do estudo.

Figura 9 – Regressão linear entre os valores diários de ETo estimados pela comparação dos modelos de Benavides-Lopez (A), Camargo (B), Hamon (C), Hargreaves-Samani (D), Kharrufa (E), Jensen-Haise (F), Makkink (G), Priestley-Taylor (H), Turc (I) e Radiação Solar (J), com padrão Penman-Monteith FAO, entre os anos de 2015 e 2019 em Ibimirim-PE.



Fonte: O Autor (2022).

5.1.3 Município de Serra Talhada

A Tabela 10 mostra as médias diárias de estimativa da ETo para o município de Serra Talhada, obtidas pelos modelos de Benavides-Lopez (ETo BL), Camargo (ETo C), Hamon (ETo H), Hargreaves-Samani (ETo HS), Kharrufa (ETo K), Jensen-Haise (ETo JH), Makkink (ETo MK), Priestley-Taylor (ETo PT), Radiação solar (ETo RS) e Turc (ETo T), comparados ao modelo padrão de Penman-Monteith (ETo PM) para o período de janeiro de 2015 a dezembro de 2019.

Tabela 10 – Evapotranspiração média (ETo), diferença percentual em relação ao modelo padrão (ETo PM) dos modelos indiretos de ETo no município de Serra Talhada-PE, 2015 a 2019.

MÊS	ETo (PM)	ETo (BL)	ETo (C)	ETo (HS)	ETo (K)	ETo (HA)	ETo (JH)	ETo (MK)	ETo (PT)	ETo (T)	ETo (RS)
mm dia ⁻¹											
JAN	6,39	7,30	5,31	5,40	7,39	4,20	6,97	7,00	4,98	3,74	7,99
FEV	6,04	6,81	5,23	5,33	7,10	3,99	6,85	6,96	5,04	3,64	7,95
MAR	5,78	6,62	5,06	5,07	7,07	3,84	6,78	6,89	4,98	3,56	7,88
ABR	5,07	5,94	4,49	4,43	6,57	3,49	6,20	6,43	4,58	3,31	7,36
MAI	4,89	5,93	3,97	4,04	6,32	3,29	5,45	5,72	3,88	2,98	6,56
JUN	4,56	5,31	3,39	3,61	5,90	2,98	4,56	4,94	3,30	2,61	5,71
JUL	4,77	5,03	3,26	3,61	5,66	2,86	4,60	5,07	3,38	2,66	5,93
AGO	6,22	6,01	3,90	4,54	6,12	3,16	6,14	6,57	4,25	3,41	7,63
SET	7,13	7,00	4,72	5,28	6,63	3,62	7,21	7,44	4,93	3,97	8,61
OUT	7,63	7,91	5,30	5,75	7,33	4,12	7,77	7,78	5,25	4,30	8,96
NOV	7,65	8,15	5,43	5,87	7,48	4,34	8,14	8,06	5,43	4,49	9,25
DEZ	6,90	7,74	5,35	5,59	7,49	4,34	7,50	7,47	5,17	4,09	8,53
MÉDIA	6,09	6,65	4,62	4,88	6,75	3,69	6,51	6,69	4,60	3,56	7,70
Dif. %	-	9,2	-24,1	-19,9	11,0	-39,4	7,1	10,0	-24,5	-41,5	26,4

Fonte: O Autor (2022).

No município de Serra Talhada, verificou-se a superestimativa de ETo durante todos os meses do ano para o modelo de ETo (RS) e ETo (MK) em um valor médio de 26,4% e 10%, respectivamente, em relação ao modelo padrão ETo (PM). Já os modelos ETo (BL) e ETo (K) subestimam a ETo (PM) a partir de agosto. Em contrapartida, os modelos de ETo (C), ETo (HS), ETo (HA), ETo (PT) e ETo (T) subestimaram a ETo em todos os meses do ano, apresentando os seguintes percentuais absolutos respectivos em relação ao modelo ETo (PM): 24,1%; 19,9%; 39,4%; 24,5% e 41,5%, o que pode ser observado nos gráficos situados

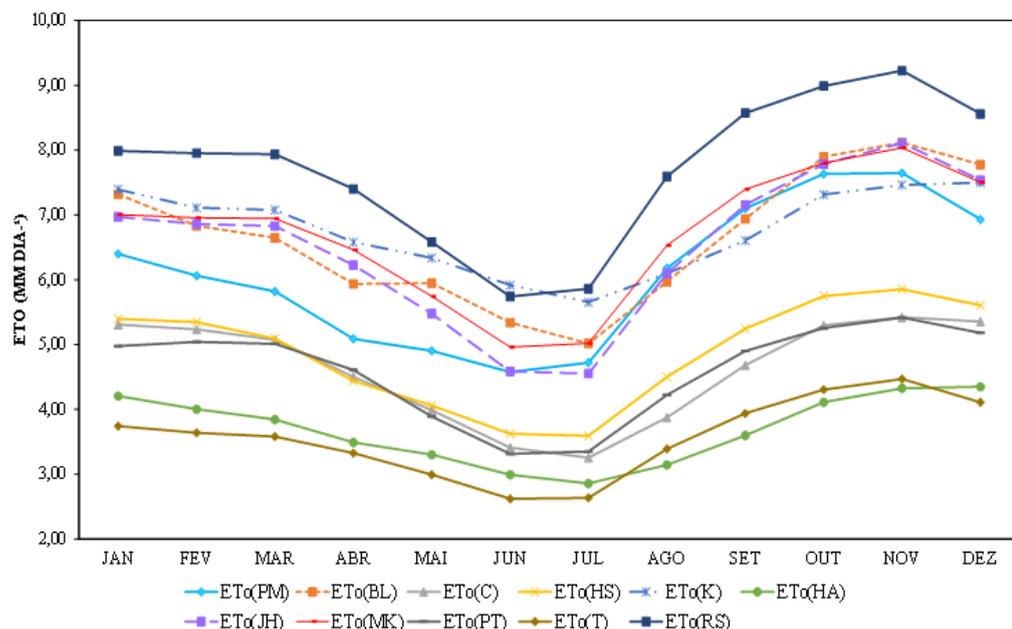
abaixo do gráfico da ETo (PM) na Figura 9. Dentre os modelos, a ETo (JH) apresentou valor médio mais próximos da estimativa ETo (PM), com valor percentual absoluto de 7,1%, corroborando com os resultados encontrados para Floresta e Ibimirim.

Alencar *et al.* (2011) verificaram comportamento compatível a este estudo, em que houve a superestimativa da ETo pelo modelo de Radiação em relação à ETo (PM), na região de Uberaba-MG. Adicionalmente, outro trabalho como o de Jung *et al.* (2016) também chegou a resultados de subestimativa em todos os meses do ano para os modelos de Turc e Hamon em relação ao modelo padrão na região do Alto Pantanal, mas obtiveram média da ETo do modelo de Priestley-Taylor bastante próxima do modelo de Penman-Monteith, diferente do comportamento deste estudo.

Em Serra Talhada, observou-se menor valor médio diário de estimativa de erro padrão (EEP) para o modelo de Jensen-Haise ($0,924 \text{ mm dia}^{-1}$), ressaltando maior precisão de estimativa em relação ao modelo Penman-Monteith (Tabela 11), o que corrobora com os dados obtidos para os municípios de Floresta e Ibimirim, também avaliados neste estudo.

Os modelos de Makkink e Benavides-Lopez apresentaram, respectivamente, EEP de $0,989$ e $0,990 \text{ mm dia}^{-1}$, já os demais modelos apresentaram EEP menos precisas com valores entre $1,251$ a $2,628 \text{ mm dia}^{-1}$ (Tabela 10). Procurou-se mostrar, na Figura 10, o comportamento temporal da ETo, onde observou-se uma maior proximidade entre os gráficos de evapotranspiração de médias diárias do modelo de Jensen-Haise (roxo) e Makkink (vermelho) em relação ao modelo padrão ETo PM (azul claro), reforçado os valores de dispersão da EEP.

Figura 10 – Médias diárias de estimativa de evapotranspiração no município de Serra Talhada-PE.



Fonte: O Autor (2022).

Rigoni *et al.* (2013) acharam menores valores de EEP para os modelos de Hargreaves-Samani (0,917 mm dia⁻¹) e Priestley-Taylor (0,918 mm dia⁻¹), verificando para os modelos que utilizam a radiação solar, com exceção do Priestley-Taylor, altos valores de EEP em Aquidauana-MS, divergindo dos resultados deste estudo. Já Brixner *et al.* (2014) obtiveram valor de EEP compatível a este estudo para o modelo de Makkink (0,94 mm dia⁻¹), em Campanha-RS.

Na Tabela 11 encontram-se o coeficiente de correlação (r), o índice de concordância (d) e o desempenho (c) e a classificação de desempenho segundo Camargo e Sentelhas (1997) e classificação de correlação segundo Silva e Barros Filho (2003).

Tabela 11 - Índices e coeficientes de comparação entre os diferentes modelos de determinação da ETo, entre 2015 e 2019 para Serra Talhada-PE.

Modelos Escala diária	EEP (mm dia ⁻¹)	r	d	c	Desempenho c	Correlação
Sem radiação solar						
ETo (BL)	0,990	0,88	0,755	0,67	Bom	Muito forte
ETo (C)	1,797	0,85	0,329	0,28	Péssimo	Muito forte
ETo (HS)	1,458	0,89	0,501	0,44	Mau	Muito forte
ETo (K)	1,251	0,83	0,474	0,40	Péssimo	Muito forte
ETo (HA)	2,628	0,84	0,141	0,12	Péssimo	Muito forte
Com radiação solar						
ETo (JH)	0,924	0,88	0,830	0,73	Bom	Muito forte
ETo (MK)	0,989	0,87	0,795	0,69	Bom	Muito forte
ETo (PT)	1,703	0,87	0,433	0,38	Péssimo	Muito forte
ETo (T)	2,624	0,88	0,241	0,21	Péssimo	Muito forte
ETo (RS)	1,821	0,86	0,569	0,49	Mau	Muito forte

Fonte: O Autor (2022).

Pela avaliação do coeficiente de correlação (r), todos os modelos foram classificados com correlação “Muito forte. Os modelos que obtiveram maiores correlações foram os modelos BL (0,88), HS (0,89), JH (0,88), MK (0,87), T (0,88) e RS (0,86), representando uma melhor precisão de estimativa para esses modelos em relação ao modelo PM.

Com importante destaque, em Chapadão do Sul-MS, Cunha *et al.* (2013) observaram correlação para os modelos MK (0,87) e JH (0,90), sendo classificados como “Muito forte”, corroborando com este estudo. Brixner *et al.* (2014) verificaram correlação de 0,83 para MK em seu estudo em Campanha-RS. Ongaratto e Bortolin (2021) obtiveram correlações com classificação “Muito forte”, mas com valores menores ao deste estudo para os modelos de JH

(0,78) e MK (0,72) em São José dos Ausentes-RS, além de valores menores de correlação para os modelos com uso de temperatura do ar, na escala diária.

Para o município de Serra Talhada, verificou-se que os modelos com maiores valores de índice de concordância (d) foram Jensen-Haise (0,830) e Makkink (0,795) (Tabela 9), e os demais modelos apresentaram valores “d” entre 0,755 e 0,141, o que corrobora com os dados obtidos para Floresta e Ibimirim. Tagliaferre *et al.* (2010) chegaram a resultados diferentes deste estudo, com maiores índices “d” para os modelo de Radiação (0,939) e Priestley-Taylor (0,931), em Eunápolis-BA.

Na Tabela 11, elencaram-se as classificações de índice de desempenho “c” segundo Camargo e Sentelhas (1997) na escala diária, com classificação de “Bom” a “Péssimo”, diferindo do intervalo observado neste estudo para os municípios de Floresta e Ibimirim. Em Petrolina-PE, Santos *et al.* (2017) também observaram tal intervalo de classificação de índice de desempenho.

O modelo de Jensen-Haise apresentou o melhor desempenho na escala diária entre os modelos, com menor valor de estimativa do erro padrão de $0,924 \text{ mm dia}^{-1}$. O modelo apresenta índice de concordância de 0,83, comprovando boa concordância com o modelo padrão, sendo que, pelo “índice c”, o modelo pode ser considerado como “Bom” ($c = 0,73$). Ribeiro *et al.* (2016) também encontraram melhor desempenho para o modelo Jensen-Haise em períodos seco ($c = 0,89$) e chuvoso ($c = 0,90$), no Semiárido do Piauí, em Piriipiri.

Pode-se observar na Tabela 11, que os modelos de Makkink e Benavides-Lopez apresentaram desempenho como “Bom”, com maior desempenho para o modelo de Makkink com $c = 0,69$ e estimativa de erro padrão de $0,989 \text{ mm dia}^{-1}$. Ongaratto e Bortolin (2021) tiveram dados compatíveis para o modelo de Makkink com classificação de desempenho “Bom” para a escala diária ($c = 0,75$).

Na estimativa da ETo na escala diária em Serra Talhada, verificou-se baixo desempenho em 4 modelos que utilizam a temperatura do ar em suas equações e melhor desempenho em 2 modelos com usos de dados de radiação solar global.

A classificação de desempenho “Péssimo” foi obtida pelos modelos de Camargo, Kharrufa, Hamon, Priestley-Taylor e Turc, apresentando valores de EEP acima de 1, o que evidencia a não recomendação do uso desses modelos para estimativa da ETo em Serra Talhada por baixa precisão. Os modelo de Radiação Solar ($c = 0,49$) e Hargreaves-Samani ($c = 0,44$) foram classificados com desempenho “Mau”, também não recomendados para a região de estudo.

Alencar *et al.* (2011) observaram para o modelo de Radiação solar elevado valor de

índice de concordância, sendo classificado como “muito bom”, além de possuir erros menores que os encontrados pelo modelo de Hargreaves-Samani, em seu estudo no município de Uberaba-MG. Moura *et al.* (2013) também encontraram resultados não satisfatórios de desempenho para o modelo de Camargo ($c = 0,58$) na escala diária, corroborando com este estudo, em bacia experimental no estado de Pernambuco. Em contrapartida, em estudos na Bahia, Tagliaferre *et al.* (2010) obtiveram resultados diferentes deste trabalho para o desempenho dos modelos de Turc e Priestley-Taylor, classificados como “Muito bom” e possuindo valores de EEP menores que 1, quando comparados ao modelo padrão.

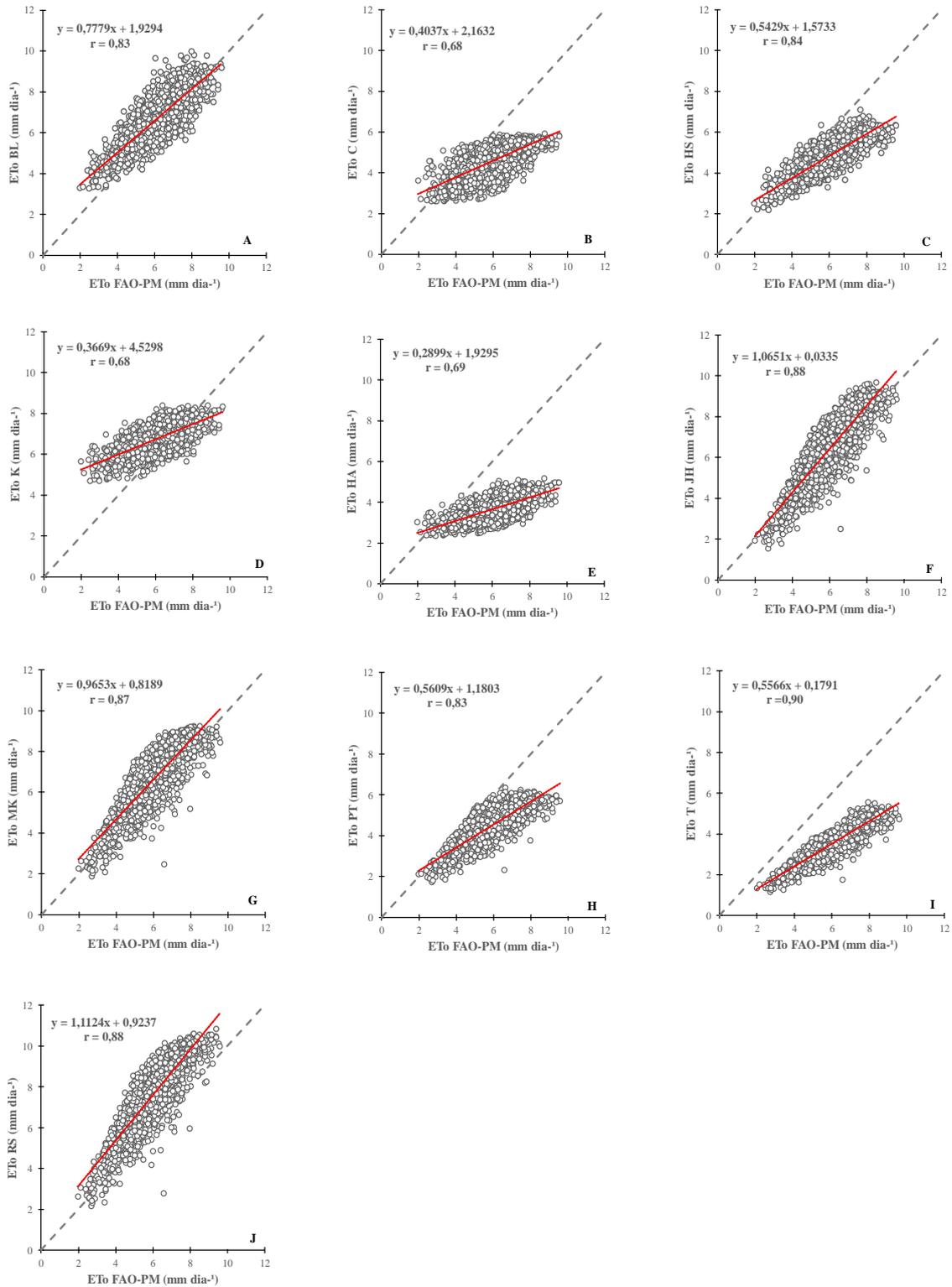
Na Figura 11 apresentaram-se a visualização gráfica da regressão linear considerando os modelos de estimativa da ETo utilizados na análise tendo o modelo Penman-Monteith padronizado pela FAO como padrão, no período diário de 2015 a 2019, para Serra Talhada-PE. A partir da reta de regressão (vermelha), observou-se que os modelos de Benavides-Lopez Kharrufa subestimaram os valores de ETo apenas quando o modelo padrão acusou estimativas acima de $7,0 \text{ mm dia}^{-1}$. Já os modelos de Camargo, Hargreaves-Samani, Hamon, Priestley-Taylor e Turc subestimaram a ETo em sua totalidade de valores em relação a Penman-Monteith FAO, o que indica a não recomendação de uso dos modelos para a região.

Observou-se a partir do coeficiente angular dos modelos de regressão (Figura 11) para a estimativa de ETo com Benavides-Lopez, Camargo, Hargreaves-Samani, Kharrufa, Hamon, Priestley-Taylor, Turc e Makkink estão superestimando a ETo em 22,2%, 59,6%, 45,7%, 63,3%, 71,0%, 43,9%, 44,3% e 3,5% respectivamente, com destaque de precisão para o modelo de Makkink. Já os modelos de Jensen-Haise e Radiação Solar para esse mesmo período subestimaram em 6,5% e 11,2% o modelo de Penman-Monteith, sendo que o modelo de Jensen-Haise foi mais preciso que Radiação Solar, com menor dispersão dos dados.

Na região do Alto Pantanal, Jung *et al.* (2016) verificaram que as equações de Benavides-Lopez e Jensen-Haise estão superestimando a ETo em 41,7% e 38,8%. Os autores destacaram, ainda, que os modelos de Hamon e Turc subestimaram em 24,6% e 33,2% o modelo PM FAO, chegando a resultados diferentes devido a região analisada no estudo.

A partir da regressão linear, Santos *et al.* (2017) observaram a superestimativa do modelo de Jensen-Haise em 6,3% para o município de Petrolina-PE, verificando também uma boa precisão de dados no Sertão de Pernambuco.

Figura 11 – Regressão linear entre os valores diários de ETo estimados pela comparação dos modelos de Benavides-Lopez (A), Camargo (B), Hamon (C), Hargreaves-Samani (D), Kharrufa (E), Jensen-Haise (F), Makkink (G), Priestley-Taylor (H), Turc (I) e Radiação Solar (J), com padrão Penman-Monteith FAO, entre os anos de 2015 e 2019 em Serra Talhada-PE.



Fonte: O Autor (2022).

5.2 Sensor MODIS

Nesse subtópico, abordaram-se os respectivos resultados de estimativas da ETo por produtos do Sensor MODIS para os municípios: Floresta, Ibimirim e Serra Talhada.

5.2.1 Município de Floresta

Utilizando a metodologia do produto MOD16A3 descrita no item 4.3, foi possível calcular a evapotranspiração durante o período dos anos de 2015 a 2019. Inicialmente, a escala de observação das séries de evapotranspiração para as imagens obtidas pelo sensor MODIS foi anual. Para efeito de análise e comparação, serão apresentados os resultados em formas de mapas e tabelas.

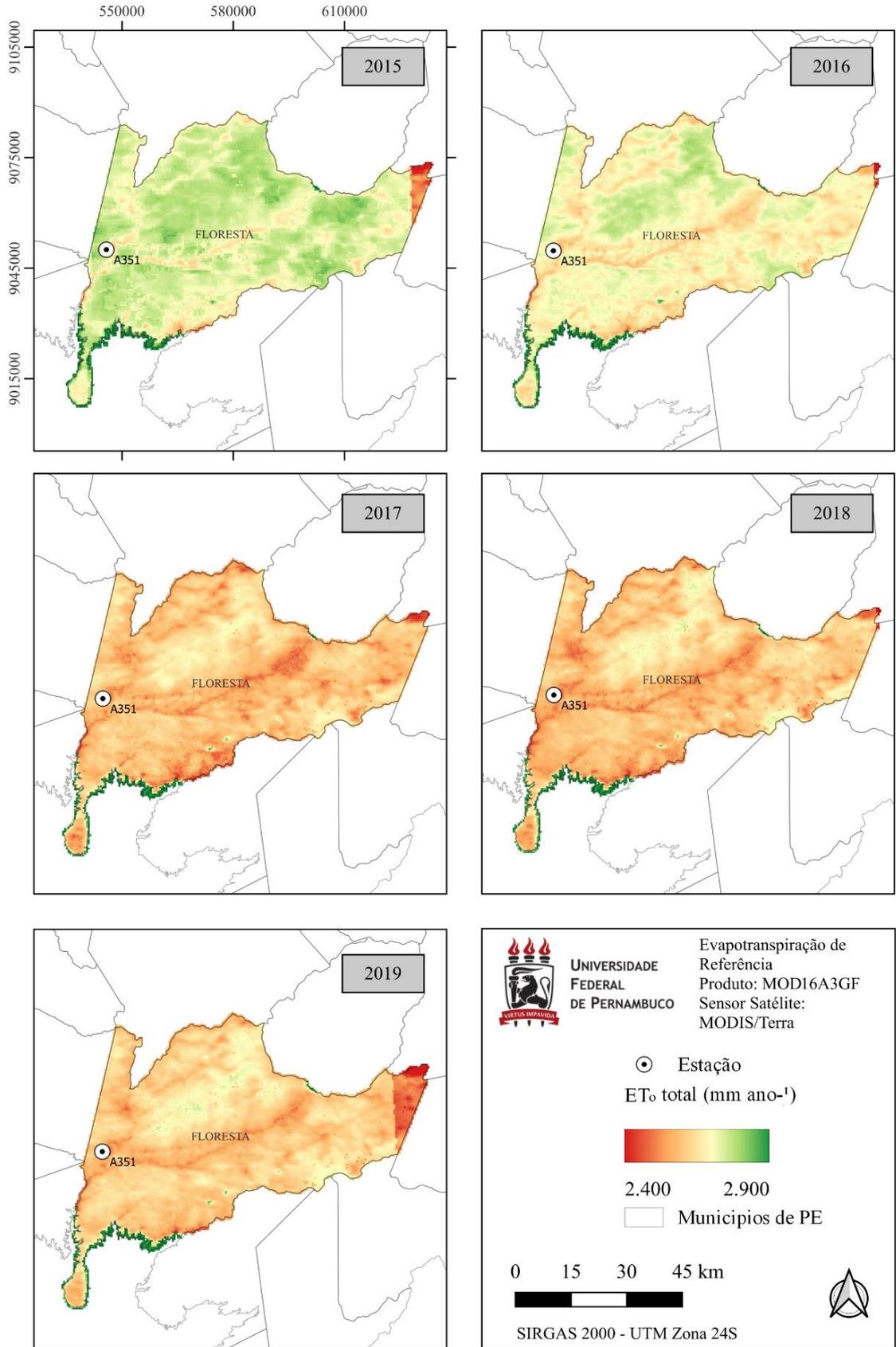
Foram apresentados 5 mapas com as ETo durante os cinco anos de análise, no qual fornecem a distribuição espacial da ETo MOD16 no município de Floresta-PE (Figura 10), como também apresenta-se na Tabela 12 as estimativa de ETo para as coordenadas do ponto da estação meteorológica do INMET no município.

A Figura 12 apresentou a ETo acumulada em valores anuais. De modo geral, as tonalidades verdes representam valores superiores a $2.750 \text{ mm ano}^{-1}$. As regiões em amarelo e laranja representam valores entre $2.740 \text{ mm ano}^{-1}$ e $2.600 \text{ mm ano}^{-1}$, já as regiões em vermelho apresentam valores abaixo de $2.600 \text{ mm ano}^{-1}$, esta representa a menor distribuição anual de ETo para o município. As regiões em verde escuro no mapa, podem ser consideradas como sendo de área de corpo hídrico ou perímetros irrigados.

A Figura 12 exibiu a ETo acumulada em valores anuais com comportamento de mudança das regiões verdes (alta ETo) para tonalidades amarelas ou laranja claro ao longo dos anos, e a conseqüente mudança de áreas de cor alaranjadas para vermelho, com diminuição da ETo nessas regiões. No transcorrer da figura é possível verificar o movimento da diminuição da ETo estimada pelo MOD16A3 à medida que os anos passam, com destaque para o ano de 2018 que apresentou tonalidades mais fortes de vermelho, caracterizando o ano de diminuição significativa da ETo, em Floresta-PE.

Andrade *et al.* (2020), ao realizar uma análise da ETo utilizando imagens do sensor MODIS para a bacia do rio Paraíba, conseguiram evidenciar o mesmo movimento de diminuição da ETo por mapas. Os autores ressaltaram que além dos fatores da sazonalidade da precipitação, os valores espaço-temporais da ETo também podem ser influenciados pelo tipo e abrangência das classes de uso e cobertura da terra.

Figura 12 - Evapotranspiração anual de Floresta-PE obtidas com produto MODIS, de 2015 a 2019.



Fonte: O Autor (2022).

Pode-se relacionar esta diminuição da ETo com o clima predominante desta região, do tipo BSw'h', muito quente e semiárido, apresentando alta temperatura média anual de 26,5 °C. Com isso, as regiões que apresentam maior temperatura possuem maiores valores de ETo.

Tabela 12 - Acumulados anuais de estimativa da ETo pelo sensor MODIS e modelo de Penman-Monteith, em Floresta-PE.

Ano (Floresta)	ETo (PM)	ETo (MOD16A3)	Diferença (%)
	mm ano ⁻¹		
2015	2543,5	2775,7	9,13
2016	2514,1	2670,0	6,20
2017	2475,9	2603,9	5,17
2018	2390,4	2574,9	7,72
2019	2428,4	2572,7	5,94

Fonte: O Autor (2022).

Analisando a Tabela 12, verificou-se que os valores encontrados pelo sensor MODIS para as coordenadas da estação meteorológica do INMET superestimaram a evapotranspiração em todos os anos analisados, variando de 9,13% em 2015 a 5,94 % em 2019. Dessa forma, observa-se boa proximidade dos valores da estimativa do produto MOD16A3 em escala anual em relação ao modelo padrão, em Floresta-PE.

Brito *et al.* (2018) aplicaram o produto de evapotranspiração do MODIS para uma área de pastagem na Amazônia ocidental, e obtiveram uma maior diferença média com valores entre 1,97% e -16,26%, na comparação da ETo MOD16 com a ETo Eddy (gerada pela covariância de vórtices turbulentos), através de valores ajustados na mesma resolução temporal da série de ETo MOD16.

Posteriormente, realizou-se o cálculo das médias diárias do município de Floresta-PE através do ajuste dos valores calculados pelo modelo de Penman-Monteith para a mesma resolução temporal da evapotranspiração obtidas a partir do produto MOD16A2 (8 dias) para o ano de 2018, a fim de observar o desempenho do sensor em períodos distintos (Figura 13). A comparação do sensor foi realizada apenas com o modelo de Penman-Monteith, pois o algoritmo utilizado para a coleta de dados MOD16 é baseado nesta equação.

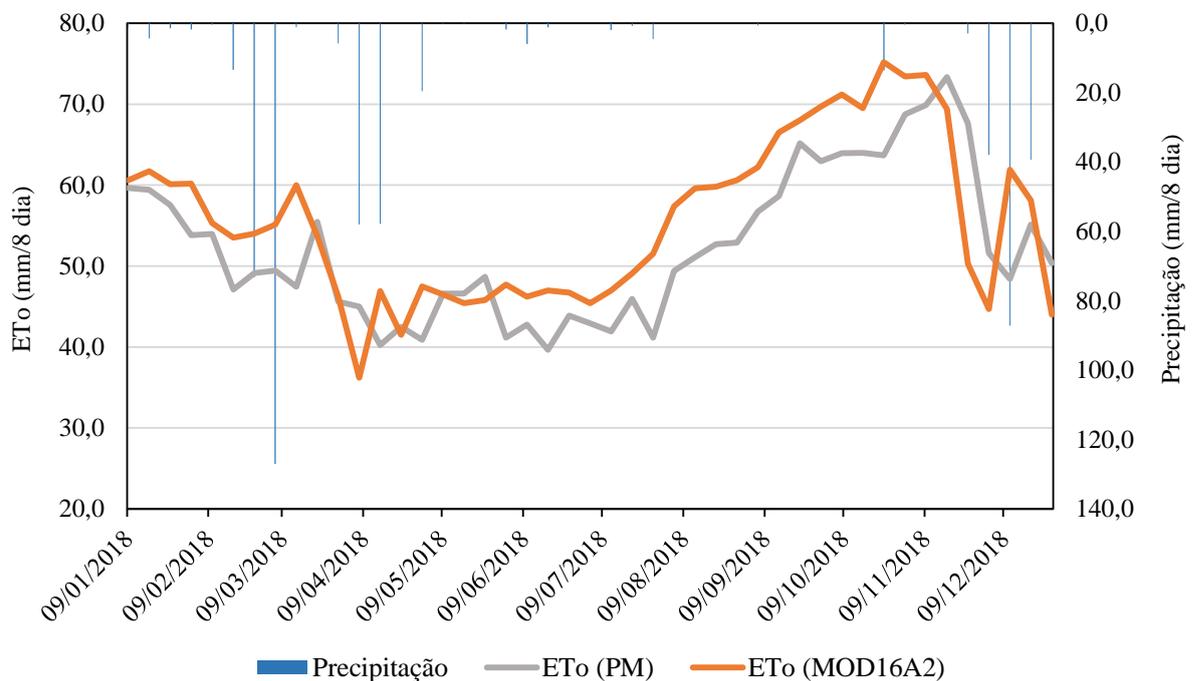
Na Figura 13, percebe-se que o período chuvoso apresentou os valores de ETo MOD16A2 variando de 60,60 mm/8 dia (janeiro) a 41,50 mm/8 dia (abril) e de 73,60 mm/8 dia (novembro) a 44,00 mm/8 dia (dezembro). Em 2018, Floresta apresentou precipitação acumulada anual de 628,20 mm. Os valores de evapotranspiração acompanharam

inversamente a precipitação no período chuvoso, caracterizando um movimento de diminuição observado pelo modelo padrão e sensor MODIS. Para o período chuvoso, houve um maior afastamento entre as retas dos modelos comparados.

No período seco, verifica-se valores de ETo MOD16A2 variando de 46,50 mm/8 dia (maio) a 75,20 mm/8 dia (outubro), na escala de 8 dias. Neste período, observa-se um crescimento da evapotranspiração para o município de Floresta-PE e maior proximidade entre os valores de reta do modelo padrão e do sensor MODIS. Silva *et al.* (2018) em seus estudos com SR em Floresta-PE, também observaram a abrangência do período chuvoso entre os meses de dezembro a abril, e período de estiagem de maio a novembro.

De acordo com as médias da ETo PM e ETo MOD16A2 (Figura 13), o valor mínimo para ETo MOD16A2 foi de 36,20 mm/8 dia (período chuvoso) e máximo de 75,20 mm/8 dia (período seco). Já para ETo PM, o valor mínimo de evapotranspiração foi de 39,64 mm/8 dia (período chuvoso) e máximo de 73,33 mm/8 dia (período seco).

Figura 13 – Estimativa da ETo pelo sensor MODIS e modelo de Penman-Monteith (8 dias) e precipitação acumulada, em Floresta-PE para o ano de 2018.



Fonte: O Autor (2022).

A comparação estatística entre os pares de dados de evapotranspiração gerados pela ETo PM e pelo produto do MOD16A2 em diferentes períodos pode ser observada na Tabela 13, a fim de compreender a melhor correlação entre os modelos. Os valores de ETo na

composição 8 dias para o ano de estudo, encontram-se no Apêndice A.

O período seco apresentou melhor correlação “r” com a aplicação do sensor MOD16, obtendo a classificação “Muito forte” ($r = 0,90$). Já o período chuvoso obteve a mesma classificação, mas com $r = 0,79$, segundo classificação de Silva e Barros Filho (2003).

Tabela 13 – Correlação entre ETo MOD16A2 e ETo PM, em 2018 para Floresta-PE.

Período	Dias	r	Classificação
Seco	152	0,90	Muito forte
Chuvoso	208	0,79	Muito forte

Fonte: O Autor (2022).

Kim *et al.* (2012) obtiveram resultados diferentes ao deste estudo, analisando séries de dados na Ásia nos anos de 2000 a 2006, das 17 localidades estudadas, duas foram descritas com cobertura vegetal por pastagem, cujos dados não apresentaram correlação significativa, com r de 0,12 e 0,18 para aplicação do sensor MODIS.

Brito *et al.* (2018) verificaram superestimativa dos dados obtidos pela ETo MOD16 com uma maior amplitude para as localidades dos sítios situados na região sudoeste da Amazônia. Os autores atrelaram tal resultados à resolução temporal do sensor MODIS (8 dias), que não permite a captura das oscilações menores (horárias, diárias) dos processos evapotranspirativos. Segundo Andrade (2013), pode-se implicar como possível fator para a superestimativa do modelo o número de falhas nos dados, ressaltando sua sensibilidade a situações extremas do tempo, por exemplo, na época chuvosa. Assim, a boa proximidade dos valores entre os modelos propostos neste estudo mostram pouca presença de falhas nos dados.

Em estudo realizado por Ferreira e Dantas (2014), em Minas Gerais, a ETo foi estimada por produtos do MODIS, como também fizeram o uso de dados das estações meteorológicas do INMET. Os autores citaram que os valores estimados através dos produtos MODIS foram muito semelhantes, no entanto os valores calculados a partir de dados das estações meteorológicas apresentaram as melhores correlações, possibilitando os melhores ajustes. Dessa forma, verificou-se que a aplicação de modelos para estimativa da ETo a partir de imagens ou produtos de satélites são recomendados para o monitoramento da evapotranspiração de referência em larga escala.

Através dos resultados de ETo encontrados pelo sensor MODIS para Floresta-PE, verificou-se a superestimativa da ET MOD16 em relação a ETo PM e melhor correlação para o período seco, uma vez que a presença de nuvens em período chuvoso limita a

disponibilidade de dados e imagens em frequência adequada. Entretanto, o uso de imagens obtidas por meio do sensor fornece a distribuição espacial da ETo em todo o município, o que não ocorre apenas com o uso de modelos indiretos.

5.2.2 Município de Ibimirim

Através de imagens obtidas pelo produto MOD16A3, foi possível calcular a ETo MOD16A3 para os anos de 2015 a 2019, no município de Ibimirim-PE. De início, utilizou-se a escala anual na obtenção de séries de evapotranspiração processadas a partir das imagens do sensor MODIS.

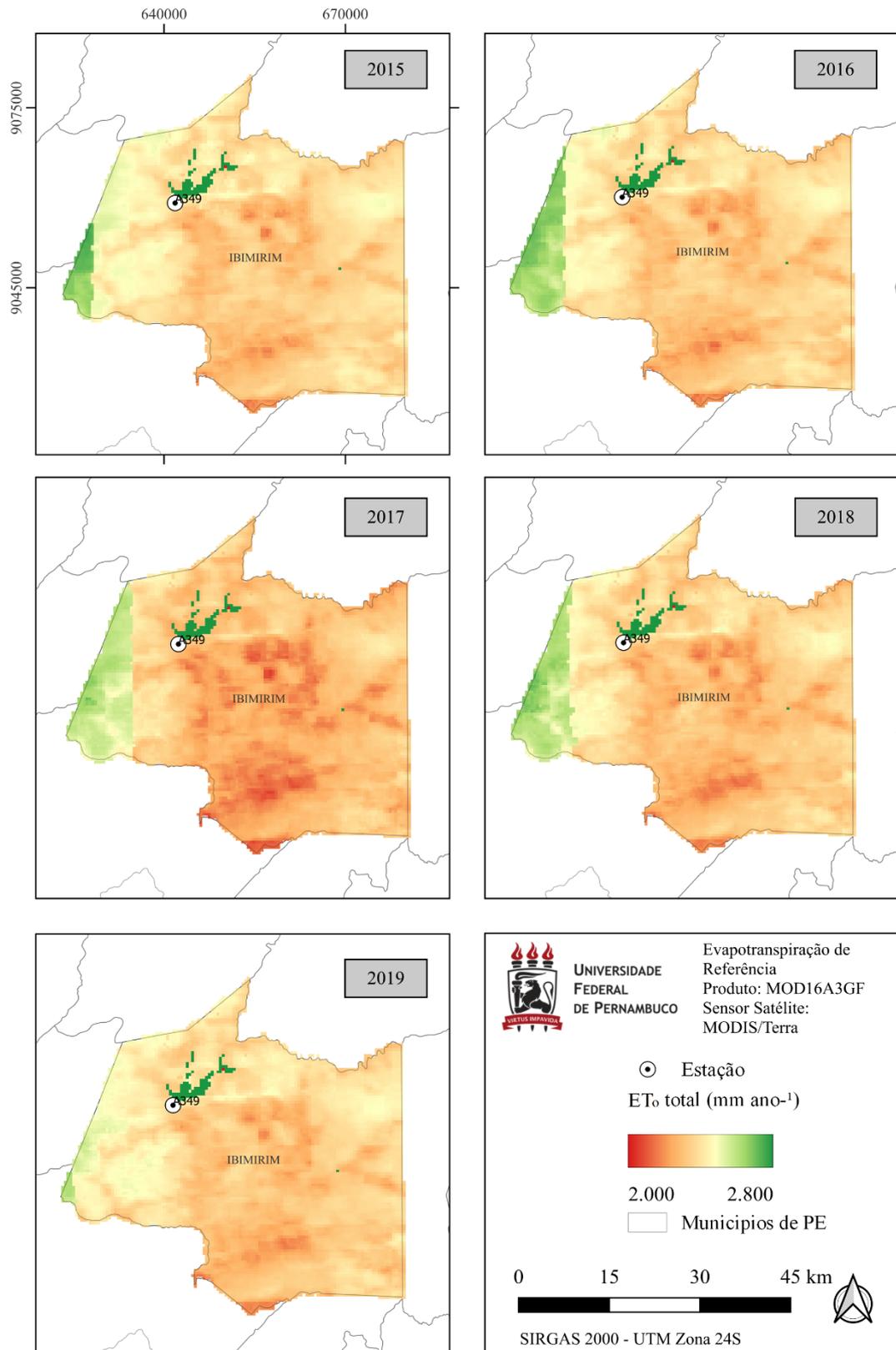
Na Figura 14 estão elecados os 5 mapas com a ETo anual dada pelo sensor MODIS nos cinco anos de estudo, no qual fornecem a distribuição espacial da evapotranspiração para todo o município. Na Tabela 14, encontram-se as estimativas de ETo para as coordenadas do ponto da estação meteorológica do INMET, em Ibimirim.

O valor acumulado anual da ETo no município pode ser observado na Figura 14. Valores superiores a 2.500,00 mm ano⁻¹ na tonalidade verde representam áreas de alta evapotranspiração de referência. As regiões em amarelo e laranja representam valores entre 2.490,00 mm ano⁻¹ e 2.250,00 mm ano⁻¹, já as regiões em vermelho apresentam valores abaixo de 2.240,00 mm ano⁻¹, esta representa a menor distribuição anual de ETo MOD16A3 para o município.

No mapa temático, verificou-se a existência de uma região em verde escuro, podendo ser considerada área de corpo hídrico. Ainda, observa-se maior ETo a oeste do município com diminuição ao longo dos anos, já no centro de Ibimirim encontram-se os menores valores de evapotranspiração pelo MOD16A3, com destaque para o ano de 2017 por sua maior distribuição de áreas em vermelho no mapa, representando o ano de queda significativa nos valores da ETo na localidade estudada.

Lima *et al.* (2014) estimaram a ETo em sub-bacias do Rio Paracatu utilizando imagens do sensor MODIS, e ressaltaram a relação entre os baixos valores da ETo encontrados com os elevados valores do fluxo de calor sensível. Os autores destacaram através de mapas temáticos que com a baixa umidade do solo, a ETo é menor, e que em superfícies líquidas, a ETo é maior. É válido lembrar que, sobre superfícies líquidas, o processo predominante é a evaporação.

Figura 14 – Evapotranspiração anual de Ibimirim-PE obtidas com produto MODIS, de 2015 a 2019.



Fonte: O Autor (2022).

Na Figura 14 verificou-se uma grande concentração de áreas alaranjadas e vermelhas presentes em todos os anos de estudo, caracterizando uma diminuição do acumulado anual de ETo entre 2015 e 2017, e logo após um crescimento de áreas amareladas representando um crescimento de ETo de 2018 a 2019. As maiores taxas de ETo MOD16A3 podem ser encontradas nas regiões onde predominam as vegetações em Ibimirim. Ainda, observa-se uma área verde à esquerda, caracterizando um ruído de captura do sensor MODIS, ou seja, uma sobreposição de cenas ocorrida no processamento de imagens.

Tito *et al.* (2021), em estudos no Rio de Janeiro, também verificaram concentrações de evapotranspiração por áreas através de mapas advindos de produtos do MOD16, com uma maior evapotranspiração principalmente nas bordas das imagens, na parte central das imagens existe a maior predominância dos campos de altitude e afloramento rochoso, possuindo as menores taxas de evapotranspiração com valores próximos. As maiores taxas de evapotranspiração foram encontradas nas regiões onde predominam as florestas. Dessa forma, evidenciaram que estas áreas são caracterizadas por uma alta densidade de biomassa, além da presença de água no solo.

Tabela 14 - Acumulados anuais de estimativa da ETo pelo sensor MODIS e modelo de Penman-Monteith, em Ibimirim-PE.

Ano (Ibimirim)	ETo (PM)	ETo (MOD16A3)	Diferença (%)
	mm ano ⁻¹		
2015	2398,3	2374,5	-0,99
2016	2356,7	2352,6	-0,17
2017	2335,8	2285,2	-2,17
2018	2339,3	2332,2	-0,30
2019	2371,2	2346,4	-1,05

Fonte: O Autor (2022).

A partir das coordenadas da estação meteorológica do INMET no município de Ibimirim foram extraídos os valores de ETo MOD16A3. Na Tabela 14, observa-se a subestimativa da evapotranspiração em todos os anos analisados para o ponto, variando em valores absolutos de 0,99% a 2,17% de 2015 a 2016, e de 2,17% a 1,05% de 2017 a 2019. Verifica-se uma alta proximidade dos valores estimados no ponto pelo produto MOD16A3 (Tabela 13) na escala anual quando comparado ao acumulado calculado pelo modelo padrão de Penman-Monteith.

Tito *et al.* (2020) também obtiveram em seus estudos no Estado do Rio de Janeiro a subestimativa dos dados de SR quando comparado ao modelo padrão Penman-Monteith FAO 56. O produto orbital do MODIS foi inferior aos modelos que usaram dados de estação meteorológica de superfície, corroborando com a subestimativa deste estudo.

Com o intuito de verificar a eficácia do sensor em períodos distintos, realizou-se o cálculo das médias em composição de 8 dias no município de Ibimirim-PE através do ajuste dos valores calculados pelo modelo de Penman-Monteith para a mesma resolução temporal da evapotranspiração obtidas a partir do produto MOD16A2 (8 dias) (Figura 15).

Na Figura 15, observa-se que o período chuvoso apresentou os valores de ETo MOD16A2 variando de 59,94 mm/8 dia (janeiro) a 42,53 mm/8 dia (abril). Em 2018, Ibimirim apresentou precipitação acumulada anual de 344,00 mm. Os valores de evapotranspiração acompanharam inversamente a precipitação no período chuvoso, caracterizando um movimento de diminuição da ETo, também verificado para Floresta-PE no mesmo período. Para o período chuvoso, nota-se um maior distanciamento entre os gráficos da ETo MOD16A2 e do modelo padrão.

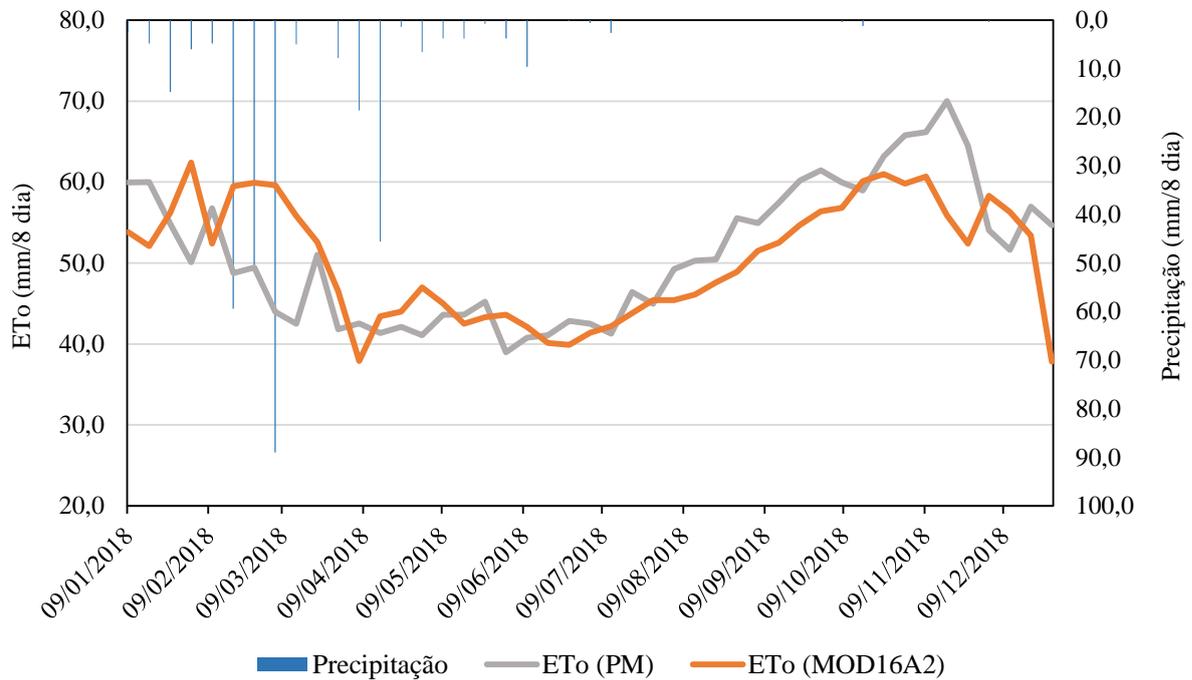
No período seco, encontram-se valores de ETo MOD16A2 entre 40,50 mm/8 dia (maio) a 70,71 mm/8 dia (dezembro). Para este período, verificou-se um crescimento da evapotranspiração para Ibimirim e maior proximidade entre os valores dos gráficos do modelo padrão e do sensor MODIS. O mesmo comportamento foi observado para Floresta no período seco, demonstrando melhor comportamento da estimativa.

De acordo com as médias da ETo PM e ETo MOD16A2 (Figura 15), o valor mínimo para ETo MOD16A2 foi de 37,80 mm/8 dia (período seco) e máximo de 62,40 mm/8 dia (período chuvoso). Já para ETo PM, o valor mínimo de evapotranspiração foi de 38,98 mm/8 dia (período seco) e máximo de 70,02 mm/8 dia (período seco).

Tito *et al.* (2021) evidenciaram comportamentos destacados por estações do ano, em que a evapotranspiração de referência estimada pelo produto MOD16A2 teve o seu máximo registrado no verão e mínima registrada no inverno com valor. Para os dados do padrão FAO, os autores observaram que as amplitudes máximas e mínimas de evapotranspiração também seguiram a mesma sazonalidade do modelo por SR.

Na Tabela 15, elenca-se a comparação estatística entre os pares de dados de evapotranspiração gerados pela ETo PM e pelo produto do MOD16 em diferentes períodos para o entendimento de melhor correlação para os modelos. Os valores de ETo na composição 8 dias para o ano de estudo, encontram-se no Apêndice B.

Figura 15 – Estimativa da ETo pelo sensor MODIS e modelo de Penman-Monteith (8 dias) e precipitação acumulada, em Ibimirim-PE para o ano de 2018.



Fonte: O Autor (2022).

Tabela 15 – Correlação entre ETo MOD16A2 e ETo PM, em 2018 para Ibimirim-PE.

Período	Dias	r	Correlação
Seco	248	0,86	Muito forte
Chuvoso	112	0,58	Moderada

Fonte: O Autor (2022).

O período seco obteve a classificação “Muito forte” ($r = 0,85$), apresentando melhor correlação entre ETo PM e ETo MOD16A2, segundo classificação proposta por Silva e Barros Filho (2003). Já o período chuvoso obteve uma menor correlação, com uma classificação “Moderada” ($r = 0,58$). A mesma diminuição de “r” também pode ser observada neste estudo para o período chuvoso em Floresta, inserido no Semiárido de Pernambuco.

No Parque Nacional de Itatiaia, localizado entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, Tito *et al.* (2021) obtiveram resultados diferentes ao deste estudo para o modelo proposto pelo produto MOD16A2, apresentando uma menor correlação ($r = 0,3$) e com EEP = $0,81 \text{ mm dia}^{-1}$.

Dentro desse contexto, os estudos Ruhoff (2011) apontam como justificativa para esses resultados a maior cobertura de nuvens da superfície no período de alta pluviosidade associado ao fato de que os produtos do sensor MODIS usam fundamentalmente como dados

de entrada parâmetros da cobertura da terra.

Por meio dos resultados de evapotranspiração encontrados pelo sensor MODIS para Ibimirim-PE, observa-se a subestimativa da ETo MOD16 em relação a ETo PM e melhor correlação para o período seco. No entanto, o uso de imagens obtidas por meio do sensor e de técnicas de SR forneceram melhor distribuição espacial da evapotranspiração em Ibimirim, fundamentais a tomada de decisões sobre demandas hídricas em diferentes períodos.

5.2.3 Município de Serra Talhada

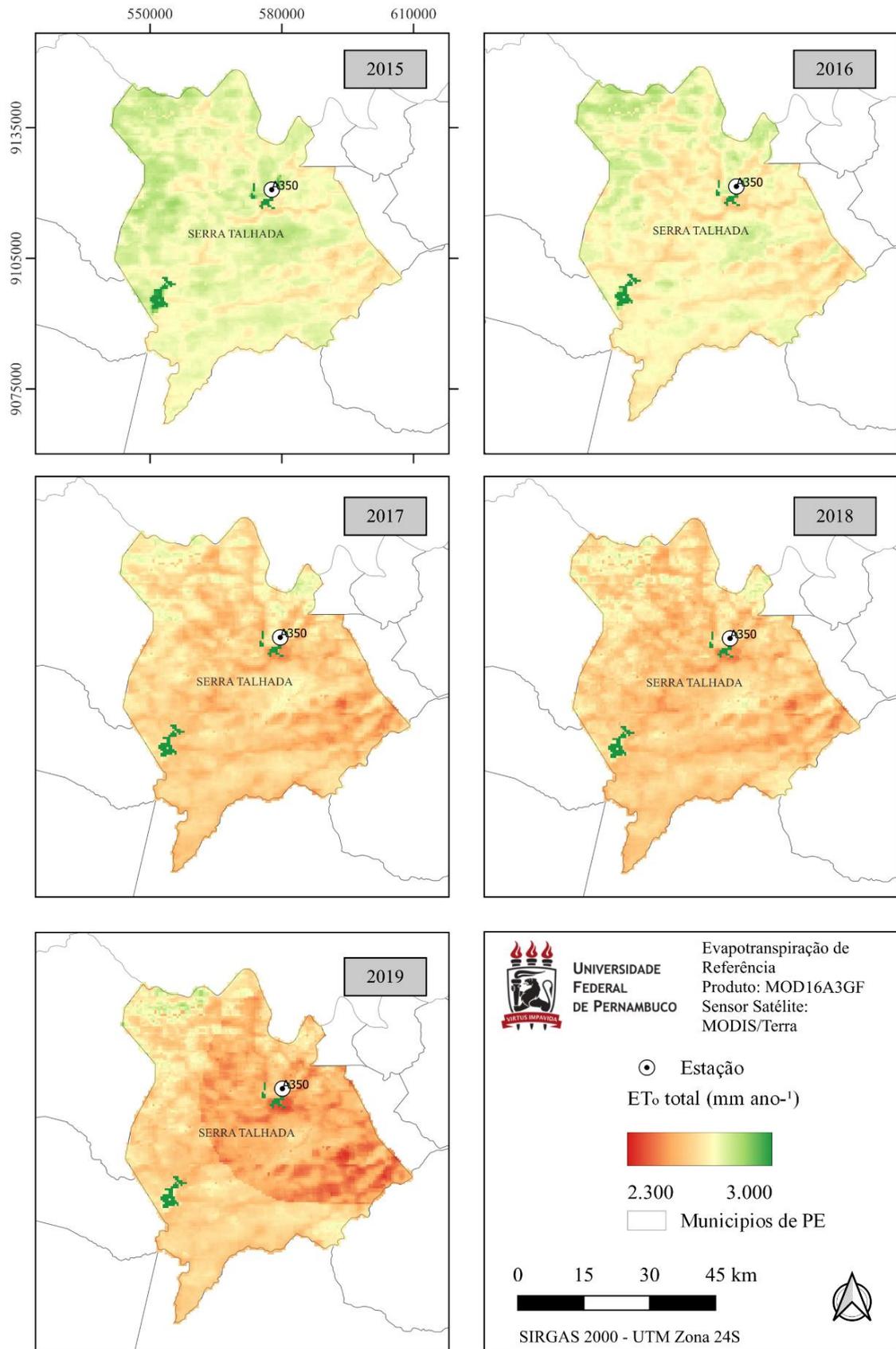
A partir das imagens obtidas pelo produto MOD16A3, calculou-se a ET MOD16 para os anos de 2015 a 2019, no município de Serra Talhada-PE. Primeiramente, a escala anual foi adotada para obtenção de séries de evapotranspiração processadas a partir das imagens do sensor MODIS.

Na Figura 16 encontram-se os mapas com a evapotranspiração de referência anual acumulada para cada um dos cinco anos de estudo, no qual fornecem a distribuição espacial da ETo MOD16A2 para a área de estudo. Na Tabela 16, estão as estimativas de ETo MOD16A3 para as coordenadas do ponto da estação meteorológica do INMET em Serra Talhada.

No mapa temático, observaram-se valores superiores a 2.750,00 mm ano⁻¹ na tonalidade verde para áreas de elevada ETo MOD16A3, concentrada a noroeste do município. As regiões amarelas e laranjas representam valores entre 2.740,00 mm ano⁻¹ e 2.510,00 mm ano⁻¹, já as regiões em vermelho apresentam valores abaixo de 2.500,00 mm ano⁻¹, esta representa a menor distribuição anual de ETo em Serra Talhada. É válido pontuar, que o município apresentou maiores valores de ETo MOD16A2 em comparação aos municípios de Floresta e Ibimirim.

Verificou-se na Figura 16, um comportamento em representatividade de tonalidades no mapa semelhante aos municípios de Floresta e Ibimirim, com áreas verdes de alta ETo MOD16A3 no ano de 2015 e com queda nos anos seguintes, em Serra Talhada. Ainda, observou-se menores valores da ETo no ano de 2018. Já em 2019, notou-se a retomada de maiores valores de ET MOD16A3 a noroeste do município, o que pode ser caracterizado por maior representatividade de vegetação.

Figura 16 – Evapotranspiração anual de Serra Talhada-PE obtidas com produto MODIS, de 2015 a 2019.



Fonte: O Autor (2022).

Tito (2019) conseguiu caracterizar a evapotranspiração por unidade de uso da terra no Rio de Janeiro, onde constatou também que em áreas de vegetação observam-se maiores valores médios de evapotranspiração devido à densidade de biomassa, enquanto que em áreas rochosas e refúgio vegetacional verificaram-se os menores valores médios devido à ausência de vegetação e elevada altitude.

Na Tabela 16 é possível observar os valores encontrados pelo sensor MODIS para as coordenadas da estação meteorológica do INMET de Serra Talhada, apresentando valores de superestimativa anual da ETo MOD16A3 em todos os anos analisados, variando de 19,35% em 2015 a 13,04% em 2019, com maiores valores para o ano de 2018, mais chuvoso na região.

A diferença dos valores de estimativa de ETo MOD16A3 e ETo PM em Serra Talhada foram superiores aos resultados obtidos para Floresta e Ibimirim, o que pode estar relacionado com a distribuição da vegetação, maior presença de chuva ao longo do ano e temperatura do ar no município.

Tabela 16 – Acumulados anuais de estimativa da ETo pelo sensor MODIS e modelo de Penman-Monteith, em Serra Talhada-PE.

Ano (Serra Talhada)	ETo (PM)	ETo (MOD16A3)	Diferença (%)
	mm ano ⁻¹		
2015	2290,5	2733,7	19,35
2016	2318,4	2679,0	15,56
2017	2160,4	2578,8	19,37
2018	2139,1	2564,3	19,88
2019	2200,8	2487,8	13,04

Fonte: O Autor (2022).

Medina *et al.* (2019), ao realizarem uma comparação com os valores anuais de ETo obtidos do produto satélite MOD16A3 no estado de Quintana Roo, México, também observaram uma superestimativa pelo produto do satélite em todos os pontos de estações meteorológicas estudadas. Ainda, perceberam que, em termos gerais, os valores de ETo possuem uma diferença de 1,1% ao comparar os resultados do evapotranspiração de referência com estimativas do produto de satélite MOD16A3, valores abaixo do encontrado nesse estudo.

Como verificação seguinte, realizou-se o cálculo das médias diárias do município de

Serra Talhada-PE através do ajuste dos valores calculados pelo modelo de Penman-Monteith para a mesma resolução temporal da evapotranspiração obtidas a partir do produto MOD16A2 (8 dias) (Figura 17), com o objetivo de entender o comportamento do sensor em períodos distintos.

Na Figura 17, verificou-se que os períodos chuvosos apresentaram valores de ETo MOD16A2 variando de 43,76 mm/8 dia (fevereiro) a 35,63 mm/8 dia (abril) e 37,72 mm/8 dia (junho) a 40,38 mm/8 dia (julho). Em 2018, Serra Talhada evidenciou a precipitação acumulada anual de 639,40 mm. Os valores de evapotranspiração acompanharam inversamente a precipitação no período chuvoso, exibindo um movimento de diminuição da ETo MOD16A2 também verificado para Floresta e Ibimirim no mesmo período. Para o período chuvoso, observa-se um maior distanciamento entre os gráficos do sensor MODIS e do modelo padrão.

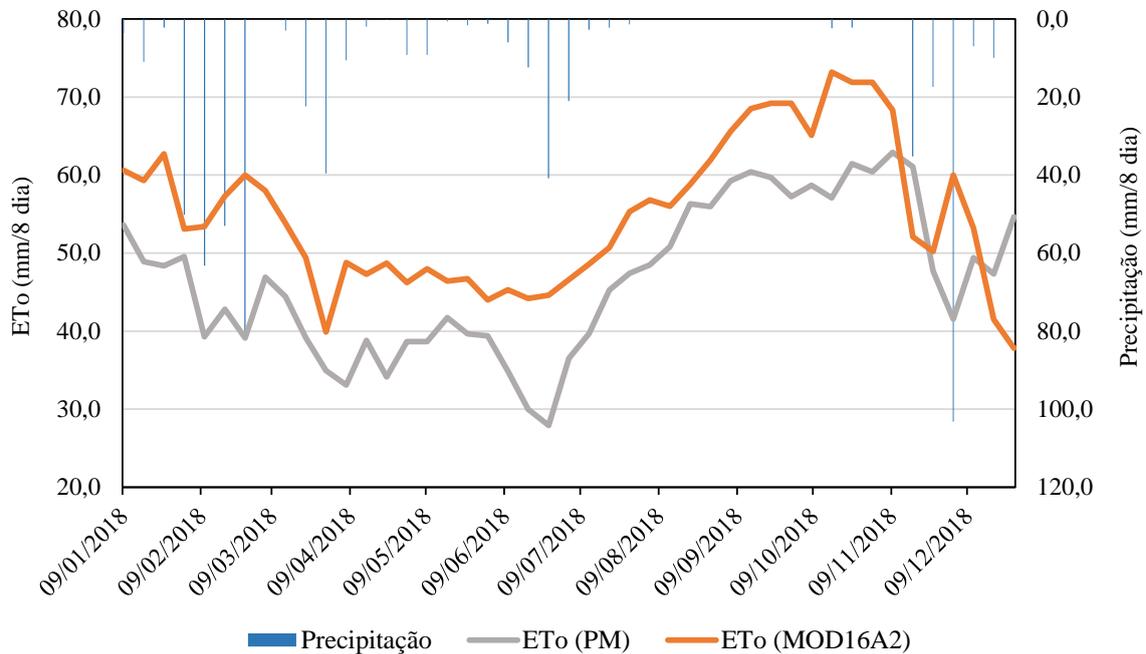
No período seco, encontram-se valores de ETo MOD16A2 entre 35,63 mm/8 dia (maio) a 59,43 mm/8 dia (novembro). Para este período, verifica-se um crescimento da evapotranspiração para Serra Talhada e maior proximidade entre os valores dos gráficos do modelo padrão e do sensor MODIS. O mesmo comportamento foi observado para Floresta e Ibimirim no período seco, porém nos outros municípios houve maior proximidade dos gráficos, elencado pelo percentual de diferença média.

De acordo com as médias da ETo PM e ETo MOD16A2 (Figura 17), o valor mínimo para ETo MOD16A2 foi de 39,90 mm/8 dia (período chuvoso) e máximo de 73,20 mm/8 dia (período seco). Já para ETo PM, o valor mínimo de evapotranspiração foi de 27,91 mm/8 dia (período seco) e máximo de 62,89 mm/8 dia (período seco).

ShaoDan *et al.* (2019) perceberam com base nos dados de estações meteorológicas de 1961 a 2013, na bacia do rio Yangtz (China) que o valor anual da ETo pelo MOD16 teve tendência decrescente antes de 2002, enquanto teve tendência de aumento de 2002 a 2013. A variação anual do ETo MOD16 sazonal foi expressiva, com a seguinte comparação de valores: verão > primavera > outono > inverno, o que corroboram com os valores encontrados neste estudo para o período chuvoso.

Na Tabela 17, encontra-se a comparação entre os pares de dados de evapotranspiração gerados pela ETo PM e pelo produto do MOD16 em dois períodos para o entendimento de melhor correlação para os modelos. Os valores de ETo na composição 8 dias para o ano de estudo, encontram-se no Apêndice C.

Figura 17 – Estimativa da ETo pelo sensor MODIS e modelo de Penman-Monteith (8 dias) e precipitação acumulada, em Serra Talhada-PE para o ano de 2018.



Fonte: O Autor (2022).

Tabela 17 – Correlação entre ETo MOD16A2 e ETo PM, em 2018 para Serra Talhada-PE.

Período	Dias	r	Correlação
Seco	176	0,91	Muito forte
Chuvoso	184	0,59	Moderada

Fonte: O Autor (2022).

No período seco, a correlação obtida foi 0,91 com classificação “Muito forte” entre o modelo ETo PM e ETo MOD16A2, segundo classificação proposta por Silva e Barros Filho (2003). Para o período chuvoso, observa-se menor correlação, com uma classificação “Moderada” ($r = 0,59$). A correlação “Muito forte” também foi obtida para os outros dois municípios deste estudo no período seco, mostrando um melhor comportamento de estimativa para o período no Semiárido de Pernambuco.

Dias *et al.* (2021) realizaram um estudo com dados de 265 estações meteorológicas do INMET espalhadas pelo território brasileiro de 2000 a 2014 com valores mensais de ETo do produto MOD16, e apresentaram uma superestimativa dos valores em relação a ETo para diferentes períodos e regiões climáticas do Brasil. No entanto, o produto MOD16A2 apresentou boa correlação com ETo ($r = 0,95$), indicando que pode ser usado em sua estimativa.

ShaoDan *et al.* (2019) obtiveram valores de correlação de 0,67 entre o valor da ETo calculado pelo modelo PM e o produto MOD16 na China, sugerindo que o produto MOD16A2 poderia demonstrar melhor as características de distribuição espaço-temporal da evapotranspiração de referência.

Os resultados obtidos por Mu *et al.* (2011) para as estimativas realizadas pelo MOD16 em 46 locais, situados principalmente na América do Norte, utilizando dados de entrada meteorológicos de torres apresentaram comportamentos similares aos aqui obtidos, em relação à diferença entre as estatísticas calculadas para as evapotranspirações estimadas pelo modelo padrão e por SR.

Por meio dos resultados de ETo encontrados pelo sensor MODIS para Serra Talhada, ressalta-se a superestimativa da ETo MOD16 em relação a ETo PM e melhor correlação para o período seco.

6 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos entende-se que para todos os municípios analisados, o modelo Jensen-Haise obteve o melhor desempenho na estimativa de ETo em relação ao modelo padrão de Penman-Monteith FAO, com classificação “Muito bom” para Floresta e Ibimirim, e “Bom” para Serra Talhada.

Dentre os modelos que usam radiação solar na base de entrada da equação, além de Jensen-Haise, o modelo Makkink também obteve resultados satisfatórios, podendo ser utilizado em todos os municípios avaliados. Ambos modelos empregam radiação solar e obtiveram melhor performance que os modelos que utilizam apenas a temperatura do ar.

O modelo Benavides-Lopez obteve classificação de desempenho “Bom” para Floresta e “Mediano” para Ibimirim e Serra Talhada. Esse modelo é de grande utilidade para produtores rurais que não possuem dados de radiação solar.

Por meio dos resultados da ETo encontrados pelo sensor MODIS (MOD16A3) para os municípios de Pernambuco, observou-se superestimativa para Floresta e Serra Talhada, e subestimativa para Ibimirim, na escala anual.

Em todos os municípios verificou-se melhor correlação do produto MOD16A2 (composição de 8 dias) para o período seco, devido ao fato do produto representar um dado agregado de 8 dias com baixa presença de nuvens. Entretanto, o uso de imagens e de técnicas de SR permitiram melhor distribuição espacial da ETo na região analisada, o que não foi possibilitado pelos modelos indiretos.

Notou-se, portanto, que estudos de diferentes modelos indiretos de ETo são imprescindíveis para demonstrar qual é o mais preciso e eficiente em temáticas dos recursos hídricos, proporcionando aos pesquisadores, produtores e técnicos informações científicas em diferentes localidades.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Engenharia Agrícola**, v.35, p.39 - 50, 2015.
- ALENCAR, L. P.; DELGADO, R. C.; ALMEIDA, T. S.; WANDERLEY, H. S. Comparação de diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife-PE, v.6, n.2, p.337-343, 2011.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, Rome, v. 56, p. 300, 1998.
- ANDRADE, N. L. R. **Fluxo de calor latente em uma floresta tropical da Amazônia: análise de séries temporais com wavelets e do produto MOD16**. Tese (Doutorado em Física Ambiental). Cuiabá: Instituto de Física/UFMT. 37 p., 2013.
- ANDRADE, N. L. R.; CORILAÇO, L. P. F.; SANCHES, L.; AGUIAR, R. G.; ROCHA, D. R.S.; BARBOSA, H. A. Aplicabilidade do produto de evapotranspiração do Land-SAF em uma área de floresta na Amazônia Ocidental. **In: Anais do 8º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (Internet)**; 2015, abril 25-29; João Pessoa, Brasil, 2015.
- ANDRADE, R. G.; HOTT, M. C.; MAGALHAES JUNIOR, W. C. P.; RIBEIRO, C. B. M. **Análise da evapotranspiração em bacia hidrográfica usando SIG e dados MODIS**. Geotecnologias: aplicações na cadeia produtiva do leite. Ponta Grossa, PR, Editora Atena, p. 68-72, 2022.
- ANDRADE, R. G.; HOTT, M. C.; MAGALHAES JUNIOR, W. C. P.; RIBEIRO, C. B. M. Análise espaço-temporal da evapotranspiração na bacia do rio Paraibuna usando o produto MOD16. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v. 3, n. 4, p. 3406-3416, 2020.
- BENAVIDES, J. G., LOPEZ, Y. J. Formula para el calculo de la evapotranspiracion potencial adaptada al tropico (15° N - 15° S). **Agronomia Tropical**, Maracay, 20(5), p. 335-345, 1970.
- BENTEMULLER, L. A. A.; GOMES, A. C. A. A importância do geoprocessamento para análise do uso e ocupação da área de proteção ambiental (APA) de Sabiaguaba em Fortaleza-CE. **Revista CC&T/UECE do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará**. Fortaleza/CE, v. 1, n.3, p.150-167, 2019.
- BORGES JÚNIOR, J. C.; ANJOS, R. J.; SILVA, T. J.; LIMA, J. R.; ANDRADE, C. L. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.16, n.4, p. 380-390, 2012.
- BRITO, A. C. C.; ANDRADE, N. L. R.; FAMBRI, L. S.; RUEZZENE, C. B.; AGUIAR, R. G. Aplicação do produto de evapotranspiração do MODIS para uma área de pastagem

na Amazônia ocidental. **Ciência e Natura**, v.40, Edição Especial: X Workshop Brasileiro de Micrometeorologia 2018, p. 162-167, Santa Maria, Santa Catarina, 2018.

BRIXNER, G. F.; SCHÖFFEL, E. R.; TONIETTO, J. Determinação da evapotranspiração por diferentes métodos e sua aplicação no índice de seca na Campanha Gaúcha, BR. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal - SP, v. 36, n. 4, p. 780-793, 2014.

CAMARGO, A. P. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo**. Instituto Agrônomo, 1971.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 5(1), p. 89-97, 1997.

CARVALHO, L. C.; EVANGELISTA, A. W. P.; OLIVEIRA, K. M. G.; SILVA, B. M.; ALVES, M. D. C.; JÚNIOR, A. D. S.; MIRANDO, W. L. FAO Penman-Monteith equation for reference evapotranspiration from missing data. **Idesia**, v.31, p.39 - 47, 2013.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.

CLEUGH, H. A., LEUNING, R.; MU, Q.; RUNNING, S. W. Regional Evaporation Estimates from Flux Tower and MODIS Satellite Data. **Remote Sensing of Environment**, 106, p. 285-304, 2006.

COUTINHO, E.; MADEIRA, J.; SILVA, R.; OLIVEIRA, E.; DELGADO, A. 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, n. 4, pp. 649-657, 2020.

CUNHA, F. F.; MAGALHAES, F. F.; CASTRO, M. A. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul-MS. **Revista Engenharia na agricultura**, Viçosa-MG, v.21, n.2, p. 159-172, 2013.

DIAS, J. S. **Determinação e desempenho de modelos de evapotranspiração de referência no sul de Mato Grosso do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, MS. 42f, 2017.

DIAS, S. H. B.; FILGUEIRAS, R.; FERNANDES FILHO, E. I.; ARCANJO, G. S.; SILVA, G. H.; MANTOVANI, E. C.; et al. **Reference evapotranspiration of Brazil modeled with machine learning techniques and remote sensing**. PLoS ONE 16(2): e0245834, 2021.

DJAMAN, K., & Irmak, S. Actual crop Evapotranspiration and alfalfa- and Grass-Reference Crop coefficients of Maize under full and LIMITED irrigation And Rainfed Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 139(6), 433–44, 2013.

FANAYA JUNIOR, E.; LOPES, A.; OLIVEIRA, G.; JUNG, L. Métodos empíricos para estimativa de evapotranspiração de referência de Aquidauana, MS. **Irriga, Botucatu**,

v.17. pp. 418-434, 2012.

FERREIRA, P. F.; PICCILLI, D. G. A.; CECONI, D. E.; FONTOURA, J. R.; BASSO, R. E. Análise comparativa dos métodos de estimativa da taxa de evapotranspiração de referência para a região sul do Brasil. **In Anais: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH, Brasília-DF, 2015.

FRANÇA, L. M. A.; PEREIRA, J. A. S.; LINS, T. M. P.; DIAZ, C. C. F.; GALVINCIO, J. D. A influência da agricultura irrigada para o aumento da umidade em áreas semiáridas. **Anais I Workshop Internacional Sobre Água no Semiárido Brasileiro**, Campina Grande: Realize Editora, 2013.

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

GOERGEN, G. **Utilização do índice de área foliar obtido por sensoriamento remoto para a estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Prata**. 89f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

GOTARDO, R.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V.; PIAZZA, G. A.; TORRES, E. Evapotranspiração potencial (ETp) e real (ETr) para diferentes usos da terra em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil. **Revista IberoAmericana de Ciências Ambientais**, v.9, n.8, p.109-126, 2018.

GRASSI, M. T. **As águas do planeta Terra**. Cadernos Temáticos do Químico Nova na Escola. Ed. Especial, Campinas, p. 31-40, 2011.

IRMAK, S.; & HAMAN, D. Z. **Evapotranspiration: Potential or Reference?** ABE 343/AE256, 6/2003. EDIS, 2003. <https://doi.org/10.32473/edis-ae256-2003>.

HAMON, W. R. Estimating Potential Evapotranspiration. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 87, n. 1, p. 107-120, 1961.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. **American Society of Agricultural Engineering**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. **Manuals and reports on engineering practice**, n. 70. New York: ASCE, 1990.

JENSEN, M.E.; HAISE, H.R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of Irrigation Drainage Division**, ASCE, New York, v. 89, n. 1, p. 15-41, 1963.

JUNH, L. H.; BISCARO, G. A.; OLIVEIRA, G. Q.; ALVES, M. A.; GIACON, G. M. Estimativa da evapotranspiração de referência em uma região do Alto Pantanal. **Magistra**, Cruz das Almas – BA, v. 28, n.2, p.168-177, 2016.

KIM, H. W.; HWANG, K.; MU, Q.; LEE, S. O.; CHOI, M. Validation of MODIS 16 Global Terrestrial Evapotranspiration. Products in Various Climates and Land Cover Types in Asia. **KSCE Journal of Civil Engineering**. 16(2), p. 229-238, 2012.

KHARRUFA, N. S. Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. **Beiträge zur Hydrologie**, Kirchzarten, Sonderheft, v. 5, n. 1, pp. 39-47, 1985.

LEMOS FILHO, L. C. A.; CARVALHO, L. G.; EVANGELISTA, A. W. P.; ALVES JÚNIOR, J. 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.

LENCASTRE, A.; FRANCO, F. M. **Lições de hidrologia**. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, p. 77-121, 1992.

LIAQAT U. W., CHOI M. **Accuracy comparison of remotely sensed evapotranspiration products and their associated water stress footprints under different land cover types in Korean peninsula**. J. Clean. Prod.; 155: p. 93-104, 2017.

LIMA, E. P.; SEDIYAMA, G. C.; ANDRADE, R. G.; LOPES, V. D.; SILVA, B. B. Evapotranspiração Real Diária em Sub-bacias do Paracatu, Utilizando Produtos do Sensor Modis. **Revista Ceres**. 61(1);17-27, 2014.

LUZ, E. L. P.; MEDEIROS, M. C.; KOZMHINSKY, M.; SANTOS, T. C. G.; MEDEIROS, R. M. Eventos climáticos e oscilação pluviométrica no município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil. **Anais I Congresso internacional da diversidade do semiárido**. Campina Grande: Realize Editora, 2016.

MAKKINK, G.F. Ekzameno de la formula de Penman. **Netherlands Journal Agricultural Science**, Amsterdam, v.5, n.1, p. 290-305, 1957.

MANZIONE, R. L.; TANIKAWA, D. H.; SOLDERA, B. C. Relação entre a resposta espectral da vegetação em diferentes cultivos agrícolas e níveis freáticos em área de recarga do sistema aquífero Guarani. **Águas Subterrâneas**, v. 28, p. 1 - 13, 2014.

MEDINA, I. O.; BARRIENTOS, M. S. A.; CRUZ, J. L.; OROZCO, A. I. R. **Evaluación del efecto de distintas aproximaciones de la radiación en la estimación de la evapotranspiración usando el modelo FAO Penman-Monteith**. Acta Universitaria 29, e 2481, 2019.

MENDONÇA, E. A.; DANTAS, R. T. Estimativa da Evapotranspiração de Referência no município de Capim, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 196-202, 2010.

MIN, Ministério da Integração Nacional. **Resolução nº 115, de 23 de novembro de 2017**: Conselho Deliberativo da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. 2017. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/739568/do1-2017-12-05-resolucao-n-115-de-23-de-novembro-de-2017-739564>. Acesso em 10 de novembro de 2022.

MORAIS, J. E. F.; Silva, T. G .F.; Souza, L .S. B.; Moura, M. S. B.; Diniz, W. J. S.; Souza, C. A. A. Avaliação do método de Penman Monteith FAO 56 com dados faltosos e de métodos alternativos na estimativa da evapotranspiração de referência no Submédio Vale do São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n.6, 1644-1660. 2015.

MOREIRA, A. A.; ADAMATTI, D. S.; RUHOFF, A. L.; Avaliação dos produtos de evapotranspiração baseados em sensoriamento remoto MOD16 e GLEAM em sítios de fluxos turbulentos do Programa LBA. **Ciência e Natura**, Santa Maria, PR, v. 40, Edição Especial: X Workshop Brasileiro de Micrometeorologia 2018, p. 112-118, 2018.

MOURA, A. R. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; AZEVEDO, J. R. G.; SILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M. M. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em Bacia experimental no estado de Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.2, 181 - 191, 2013.

MU, Q., HEINSH, F. A., ZHAO, M., RUNNING, S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing Environment**, 111, p. 519-53, 2007.

MU, Q., HEINSH, F. A., ZHAO, M., RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm. **Remote Sensing of Environment**, 115, p. 1781-1800, 2011.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4ª edição. Editora Blucher, p. 388, 2010.

OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; BISPO, R. C.; SANTOS, I. M. S.; ALMEIDA, A. C. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na região Norte da Bahia. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.4, n.2, p.104-109, 2010.

OLIVEIRA, L.M.M.; OLIVEIRA, I.A.; LIMA, J.R.; ANTONINO, A.C.; MONTENEGRO, S.M.; MOURA, A.E.; CABRAL, J.J; LIRA, C.A.; ALMEIDA, C.A.; SILVA, A.M. Evapotranspiração Real e de Referência em área urbana no Município de Recife – PE. **In Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Campo Grande, MS, 2009.

OLIVEIRA, T. M.; FERREIRA, R. R. Transpiração das plantas e sua relação com a temperatura, **In Anais: III CIPEEX - Ciência para a redução das desigualdades/IX Simpósio Nacional de Ciência e Meio Ambiente – SNCMA**, v. 2, p. 290-297, 2018.

ONGARATTO, J. M. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração para a Bacia Hidrográfica Taquari, Antas-RS**. Trabalho de Conclusão (Engenharia Ambiental) – Universidade de Caxias do Sul. Rio Grande do Sul. p. 13, 2019.

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

PENMAN, H. L. Evaporation: an introductory survey. **Netherland Journal of Agriculture Science**, Wageningen, v.4, p. 9-29, 1956.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 100, n. 1, p. 81-92, 1972.

RIBEIRO, A. A.; SIMEÃO, M.; SANTOS, A. R. B. Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso e seco em Piri-piri (PI). **Revista Agrogeambiental**, Pouso Alegre, v. 8, n. 3, p. 89-100, 2016.

RIGONI, E. R.; OLIVEIRA, G. Q.; BISCARO, G. A.; QUEIROZ, M. V. B. M.; LOPES, A. S. Desempenho sazonal da evapotranspiração de referência em Aquidauana, MS. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 21, n.6, p. 547-562, 2013.

RUHOFF, A. L. **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). UFRGS, Porto Alegre-RS, 2011.

RUHOFF, A. L.; ARAGÃO, L. E. O. C.; COLLISCHONN, W.; ROCHA, H. R.; MU, Q.; RUNNING, S. MOD16: Desafios e limitações para a estimativa global de evapotranspiração. **In Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, INPE, p.5124, 2011.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; ARAGAO, L. E. O. C.; MU, Q.; MALHI, Y.; COLLISCHONN, W.; ROCHA, H. R.; RUNNING, S. W. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. **Hydrological Sciences Journal**, 58 (8), p. 1-19, 2013.

RUNNING, S.; MU, Q.; ZAO, M.; MORENO, A. MODIS **Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm**. n. July, 2017.

RUNNING, S. W., MU, Q., ZHAO, M., MORENO, A. User's Guide. **MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm**. For Collection 6.1. v. 1.1. 2021.

SANCHES, F. M.; XIMENES, A. R.; CORADI, P. C.; ROQUE, C. G.; CUNHA, F. F. Estimativa da evapotranspiração de referência na região norte do Brasil. **Revista de Ciências Agroambientais**, v.13, n.2, p.19-31, 2015.

SANTOS, R. D. S.; SOUZA, M. H. C.; VENTURA, K. M.; BASSOI, L. H. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Petrolina, PE. Irriga, Botucatu, Edição Especial, **IRRIGA & INOVAGRI**, pp. 31-39, 2017.

SHAODAN, C.; LIPING, Z.; XIANGYONG, T.; ROUXIN, T.; XIN, L. Comparative analysis of potential evapotranspiration estimation between Penman-Monteith model and

MOD16 data in Middle and Lower Yangtze River Basin. **Engineering Journal of Wuhan University**, v. 52, n.4, p.283-289, 2019.

SILVA, E. A. **Mapeamento do uso e cobertura vegetal do município de Floresta-PE**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciência Florestal, 56 f., Recife, 2011.

SILVA, B. C.; CALHEIROS, H. C. **Águas Superficiais**. In Ciências Ambientais para Engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 85–122, 2015.

SILVA, D.; BARROS FILHO, J. **Estatística (Apostila)**. São Paulo, USP. 2003.

SILVA, G. H.; DIAS, S. H. B.; FERREIRA, L. B.; SANTOS, J. E. O.; CUNHA, F. F. Performance of different methods for reference evapotranspiration estimation in Jaíba, Brazil. **Revista brasileira de Engenharia. Agrícola e Ambiental**. v.22, n.2, p.83-89, 2018.

SILVA, J. C.; FERREIRA, L. F.; SILVA, T. R. G.; SILVA, C. B.; SANTOS, L. A.; SANTOS, M. A. Métodos empíricos para determinação da evapotranspiração de referência em Arapiraca. **Revista Ambientale. Revista da Universidade Estadual de Alagoas/UNEAL**. Ano 12, Vol. 12(1), 2020.

SILVA, J. G.; OLIVEIRA, L. M. M.; SILVEIRA, M. M. V. Identificação do uso do solo por índices de vegetação no sul da bacia hidrográfica do rio Pajeú. In **Anais: VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife-PE, p. 1029-1037, 2018.

SOUZA, V. A. **Utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto para a estimativa da evapotranspiração em uma cultura de arroz irrigado**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, 2013.

SOUZA, V. A. ROBERTI, D. R.; ALVES, R. C. M.; DIAZ, M. B.; TATSCH, J. D. Validação do Produto de Evapotranspiração MOD16 para uma cultura de Arroz Irrigado em Cachoeira do Sul - RS. **Ciência e Natura**, Santa Maria, PR, v.38, Ed. Especial - IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, p. 270 – 276, 2016.

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

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

TEIXEIRA, A. H. C.; VICTORIA, D. C.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; BOLFE, E. L.; CRUZ, C. R. Coupling MODIS images and agrometeorological data for agricultural water productivity analyses in the Mato Grosso state, Brazil. **Proceedings of SPIE - International Society for Optical Engineering**, v. 9239, p. 92390W-1-92390W-14, 2014.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; HERNANDEZ, F. B. T. Determinação da evapotranspiração através de imagens de satélites de diferentes resoluções com e sem a banda termal. **In Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa, PB, p. 5423-5430, 2015.

TITO, T. M. **Estimativas de evapotranspiração através de sensoriamento remoto e métodos empíricos para o estado do Rio de Janeiro e Parque Nacional do Itatiaia**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 48p, 2019.

TITO, T. M.; DELGADO, R. C.; DE CARVALHO, D. C.; TEODORO, P. E.; DE ALMEIDA, C. T.; DA SILVA JUNIOR, C. A.; DA SILVA JÚNIOR, L. A. S. 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**, 192(7), p. 1-15, 2020.

TITO, T. M.; DELGADO, R. C.; DE CARVALHO, D. C.; PEREIRA, M. G.; SOUZA, L. P. Estimativa da evapotranspiração baseada em elementos meteorológicos e Sensoriamento Remoto no Parque Nacional De Itatiaia, Brasil. **Recursos Naturais: energia de biomassa florestal**, v. 2, p. 38-55, 2021.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4ª edição. 4ª reimp. Editora da UFRGS/ABRH, Porto Alegre-RS, 2012.

TURC, L. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. **Annals of Agronomy**, v.12, pp.13 49, 1961.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**, Recife: v. 2, 463p., 2006.

VERBESSELT, J.; HYNDMAN, R.; NEWNHAM, G.; CULVENOR, D. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. **Remote Sensing of Environment**, n. 114, p. 106-115, 2012.

VICENTE, M. R.; LEITE, C. V.; SANTOS, R. M.; LEITE, C. V.; SANTOS, R. M.; LUCAS, P. O.; DIAS, S. H. B.; SANTOS, J. A. Evapotranspiração de referência utilizando o método FAO Penman-Monteith com dados faltantes. **Global Science Technology**, Rio Verde, v.11, n.03, p.217-228, 2018.

VILLA, B. de; TONETTO, F.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D.; TOKURA, L. K.; STEFANELLO, A.; SCHUDIKIN, M.; MELO, G. L.; LONDERO, D. D.; FAGAN, A. L.; HÜNEMEIER, G. A.; LIMA, E. F.; COPETTI, L. H. M. Validation of reference evapotranspiration estimation methods for Palmeira das Missões, RS, Brazil. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 17, 2021.

WILLMOTT, C. J.; WICKS, D. E. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. **Physical Geography**, Los Angeles, v. 1, p. 59-73, 1980.

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

ZHAO, M.; HEINSCH, F. A; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. **Remote Sensing of Environment**, 95(2): 164–176, 2005.

**APÊNDICE A – SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETo)
PELOS MODELOS PENMAN MONTEITH E MOD16 E SOMA DE PRECIPITAÇÃO
NA COMPOSIÇÃO DE 8 DIAS EM FLORESTA-PE**

Data	ETo (PM)	ETo (MOD16A2) mm/8 dia	Precipitação
09/01/2018	59,66	60,60	1,20
17/01/2018	59,40	61,70	4,40
25/01/2018	57,55	60,10	1,40
02/02/2018	53,82	60,20	1,80
10/02/2018	53,97	55,30	0,40
18/02/2018	47,12	53,50	13,40
26/02/2018	49,14	54,00	73,20
06/03/2018	49,43	55,10	127,00
14/03/2018	47,45	60,00	1,20
22/03/2018	55,48	53,70	0,00
30/03/2018	45,61	46,20	5,80
07/04/2018	44,99	36,20	58,00
15/04/2018	40,24	46,90	57,80
23/04/2018	42,49	41,50	0,00
01/05/2018	40,88	47,50	19,60
09/05/2018	46,61	46,50	0,20
17/05/2018	46,61	45,40	0,20
25/05/2018	48,68	45,80	0,00
02/06/2018	41,16	47,70	1,80
10/06/2018	42,77	46,20	6,00
18/06/2018	39,64	47,00	1,20
26/06/2018	43,88	46,70	0,00
04/07/2018	42,92	45,40	0,00
12/07/2018	41,91	47,00	2,00
20/07/2018	45,96	49,10	0,80
28/07/2018	41,16	51,50	4,60
05/08/2018	49,39	57,40	0,00
13/08/2018	51,08	59,60	0,00
21/08/2018	52,71	59,80	0,00
29/08/2018	52,89	60,60	0,00
06/09/2018	56,75	62,20	0,60
14/09/2018	58,66	66,50	0,00
22/09/2018	65,17	68,00	0,00
30/09/2018	62,95	69,70	0,00
08/10/2018	63,95	71,20	0,00
16/10/2018	63,98	69,50	0,00
24/10/2018	63,67	75,20	13,60
01/11/2018	68,72	73,40	0,40
09/11/2018	69,90	73,60	0,00
17/11/2018	73,34	69,40	0,00
25/11/2018	67,62	50,30	3,00
03/12/2018	51,57	44,70	38,00
11/12/2018	48,41	61,90	87,20
19/12/2018	55,11	58,10	39,40
27/12/2018	50,36	44,00	0,60

**APÊNDICE B – SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o)
PELOS MODELOS PENMAN MONTEITH E MOD16 E SOMA DE PRECIPITAÇÃO
NA COMPOSIÇÃO DE 8 DIAS EM IBIMIRIM-PE**

Data	ET _o (PM)	ET _o (MOD16A2)	Precipitação
	mm/8 dia		
09/01/2018	59,94	53,80	2,40
17/01/2018	60,00	52,10	4,80
25/01/2018	54,85	56,20	14,80
02/02/2018	50,10	62,40	6,00
10/02/2018	56,79	52,40	4,80
18/02/2018	48,75	59,50	59,40
26/02/2018	49,42	59,90	50,60
06/03/2018	43,95	59,60	89,00
14/03/2018	42,50	55,80	5,00
22/03/2018	51,00	52,60	0,00
30/03/2018	41,82	46,50	7,80
07/04/2018	42,53	37,90	18,60
15/04/2018	41,35	43,40	45,60
23/04/2018	42,10	44,00	1,40
01/05/2018	41,09	47,00	6,60
09/05/2018	43,62	45,00	3,80
17/05/2018	43,62	42,50	3,80
25/05/2018	45,22	43,30	0,80
02/06/2018	38,98	43,60	3,80
10/06/2018	40,77	42,10	9,60
18/06/2018	41,06	40,10	0,00
26/06/2018	42,86	39,90	0,20
04/07/2018	42,50	41,40	0,60
12/07/2018	41,28	42,20	2,60
20/07/2018	46,40	43,80	0,00
28/07/2018	44,94	45,40	0,00
05/08/2018	49,24	45,40	0,00
13/08/2018	50,30	46,10	0,00
21/08/2018	50,42	47,60	0,00
29/08/2018	55,53	48,90	0,00
06/09/2018	54,91	51,50	0,00
14/09/2018	57,47	52,50	0,00
22/09/2018	60,18	54,70	0,00
30/09/2018	61,45	56,40	0,00
08/10/2018	59,96	56,80	0,40
16/10/2018	58,97	60,10	1,20
24/10/2018	63,16	61,00	0,00
01/11/2018	65,77	59,80	0,00
09/11/2018	66,17	60,70	0,00
17/11/2018	70,02	55,90	0,00
25/11/2018	64,46	52,40	0,00
03/12/2018	54,04	58,30	0,40
11/12/2018	51,61	56,30	0,00
19/12/2018	56,96	53,40	0,00
27/12/2018	54,68	37,80	0,00

**APÊNDICE C – SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETo)
PELOS MODELOS PENMAN MONTEITH E MOD16 E SOMA DE PRECIPITAÇÃO
NA COMPOSIÇÃO DE 8 DIAS EM SERRA TALHADA-PE**

Data	ETo (PM)	ETo (MOD16A2)	Precipitação
	mm/8 dia		
09/01/2018	54,48	60,60	11,20
17/01/2018	53,59	60,60	3,60
25/01/2018	48,90	59,30	11,00
02/02/2018	48,36	62,70	2,20
10/02/2018	49,57	53,10	50,20
18/02/2018	39,27	53,40	63,20
26/02/2018	42,82	57,30	53,00
06/03/2018	39,12	60,00	81,40
14/03/2018	46,89	58,00	0,00
22/03/2018	44,43	53,80	3,00
30/03/2018	39,15	49,40	22,40
07/04/2018	34,93	39,90	39,60
15/04/2018	33,09	48,80	10,60
23/04/2018	38,83	47,30	2,00
01/05/2018	34,15	48,70	0,20
09/05/2018	38,68	46,20	9,20
17/05/2018	38,68	48,00	9,20
25/05/2018	41,74	46,40	0,60
02/06/2018	39,68	46,70	1,60
10/06/2018	39,40	44,00	1,20
18/06/2018	34,85	45,30	6,00
26/06/2018	29,97	44,20	12,40
04/07/2018	27,92	44,60	40,80
12/07/2018	36,52	46,60	21,00
20/07/2018	39,70	48,60	2,80
28/07/2018	45,28	50,70	2,20
05/08/2018	47,42	55,30	1,40
13/08/2018	48,50	56,80	0,00
21/08/2018	50,83	56,00	0,00
29/08/2018	56,30	58,80	0,00
06/09/2018	55,98	61,90	0,00
14/09/2018	59,28	65,60	0,00
22/09/2018	60,40	68,50	0,00
30/09/2018	59,68	69,20	0,00
08/10/2018	57,25	69,20	0,00
16/10/2018	58,68	65,10	0,00
24/10/2018	57,08	73,20	2,40
01/11/2018	61,43	71,90	2,20
09/11/2018	60,43	71,90	0,00
17/11/2018	62,90	68,30	0,00
25/11/2018	61,07	52,10	35,20
03/12/2018	47,72	50,20	17,40
11/12/2018	41,53	60,00	103,20
19/12/2018	49,42	53,20	7,00
27/12/2018	47,32	41,50	10,00