



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

ANA PATRÍCIA GOMES SILVA

**DESEMPENHO DE MODELOS INDIRETOS E PRODUTOS DE SENSORIAMENTO  
REMOTO NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM PERNAMBUCO**

Recife  
2025

ANA PATRÍCIA GOMES SILVA

**DESEMPENHO DE MODELOS INDIRETOS E PRODUTOS DE SENSORIAMENTO  
REMOTO NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leijdane Maria Maciel de Oliveira

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Silva, Ana Patrícia Gomes.

Desempenho de modelos indiretos e produtos de sensoriamento remoto na estimativa da evapotranspiração em Pernambuco / Ana Patrícia Gomes Silva. - Recife, 2025.

93 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Orientação: Leidjane Maria Maciel de Oliveira.

Inclui referências.

1. Penman-Monteith; 2. MODIS; 3. Bases climáticas; 4. Validação de dados climáticos. I. Oliveira, Leidjane Maria Maciel de. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

**ANA PATRÍCIA GOMES DA SILVA**

**DESEMPENHO DE MODELOS INDIRETOS E PRODUTOS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO NA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO 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 obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil, Área de Recursos Hídricos

Aprovada em 28/08/2025

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leidjane Maria Maciel de Oliveira, UFPE

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (examinador interno)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Vanine Elane Menezes de Farias (examinadora externa)

Universidade de São Paulo

participação por videoconferência

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rochele Sheila Vasconcelos (examinadora externa)

Universidade Estadual de Santa Cruz

Dedico este trabalho aos meus pais, exemplos de amor, esforço e coragem, que sempre me incentivaram a seguir em frente e nunca deixaram de acreditar em mim.

Às minhas irmãs, por serem meu porto seguro, minhas amigas e companheiras em todos os momentos.

Tudo o que conquistei até aqui é reflexo do amor e do apoio de vocês.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me sustentar em cada etapa desta jornada e por me conceder força, sabedoria e perseverança mesmo nos momentos mais desafiadores.

Aos meus pais e às minhas irmãs, meu amor incondicional e minha eterna gratidão. Obrigada pelo apoio constante, pelas palavras de incentivo e por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidei.

Ao meu namorado Matheus, agradeço o amor, paciência e incentivo em todos os momentos — especialmente nos mais difíceis. Sua presença foi meu alívio e minha fortaleza. À sua mãe, Suzana, e à sua tia Maria, meu carinho e gratidão por todo o acolhimento, apoio e palavras generosas ao longo dessa jornada. Ter o afeto de vocês foi um presente que tornou tudo mais leve e especial.

Às minhas amigas Larissa e Regilani, que a vida me presenteou ao chegar em Recife, meu sincero agradecimento pela amizade, companheirismo e por todos os momentos compartilhados. Em meio a uma nova cidade e tantos desafios, ter vocês por perto trouxe acolhimento, leveza e muitos sorrisos que tornaram essa caminhada inesquecível.

Aos amigos do GRH, especialmente das salas 14 e 15, meu sincero agradecimento por cada troca, risada, desabafo e aprendizado compartilhado. Ter vocês por perto tornou essa caminhada mais leve e significativa.

À minha orientadora, professora Leidjane, agradeço profundamente pela orientação dedicada, paciência e confiança ao longo de todo o processo. Sua contribuição foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho e para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Por fim, agradeço à CAPES pelo apoio financeiro, viabilizado pela concessão da bolsa de mestrado, que permitiu a dedicação necessária à realização desta pesquisa.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte deste percurso, o meu muito obrigada.

## RESUMO

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) é uma variável-chave para a gestão dos recursos hídricos, sobretudo em regiões com variabilidade climática como o estado de Pernambuco. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho de modelos indiretos, produtos de Sensoriamento Remoto (SR) e bases climáticas em grade, como MOD16A2, GLEAM, TerraClimate e BR-DWGD, na estimativa da ET<sub>o</sub>, utilizando como referência o modelo padrão de Penman-Monteith (FAO-56). A análise foi conduzida para onze municípios distribuídos nas cinco mesorregiões do Estado, que possuem dados diários disponíveis na base de dados do INMET. Foram aplicados seis modelos indiretos (Penman-Monteith, Hargreaves-Samani, Radiação Solar, Makkink, Jensen-Haise, Hamon) e os resultados foram avaliados a partir de métricas estatísticas como RMSE, EMA, PBIAS, R<sup>2</sup>, r, d e índice de desempenho (c). Os resultados indicaram forte variação espacial da ET<sub>o</sub>, com maiores valores nas regiões do Sertão Pernambucano (SP) e São Francisco Pernambucano (SFP). Entre os modelos indiretos, o de Radiação Solar destacou-se com desempenho "ótimo" em diversas localidades, enquanto o modelo de Hamon apresentou desempenho inferior em todas as regiões. Os dados orbitais e em grade apresentaram resultados variados: a base BR-DWGD mostrou melhor concordância com o modelo padrão em todo o Estado, especialmente no SP, Agreste Pernambucano (AP) e na Mata Pernambucana (MP). O GLEAM apresentou limitações no AP, o TerraClimate no AP, no SP e no SFP, já o MOD16A2 na Metropolitana do Recife (MR) e MP. O estudo mostra que, além do modelo padrão, o modelo de Radiação Solar, a base BR-DWGD e o GLEAM apresentaram bom desempenho na estimativa da ET<sub>o</sub> em Pernambuco, sendo alternativas confiáveis para o monitoramento climático e a gestão hídrica regional.

**Palavras-chave:** Penman-Monteith; MODIS; GLEAM; bases climáticas; validação de dados climáticos.

## ABSTRACT

Reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) is a key variable for water resources management, especially in regions with climate variability such as the state of Pernambuco. This research aimed to evaluate the performance of indirect models, Remote Sensing (SR) products and grid climate bases, such as MOD16A2, GLEAM, TerraClimate and BR-DWGD, in the ET<sub>o</sub> estimation, using the Penman-Monteith standard model (FAO-56) as a reference. The analysis was conducted for eleven municipalities distributed in the five mesoregions of the state, which have daily data available in the INMET database. Six indirect models were applied (Penman-Monteith, Hargreaves-Samani, Solar Radiation, Makkink, Jensen-Haise, Hamon) and the results were evaluated based on statistical metrics such as RMSE, EMA, PBIAS, R<sup>2</sup>, r, d and performance index (c). The results indicated a strong spatial variation of ET<sub>o</sub>, with higher values in the regions of Sertão Pernambucano (SP) and São Francisco Pernambucano (SFP). Among the indirect models, the Solar Radiation model stood out with "excellent" performance in several locations, while the Hamon model showed lower performance in all regions. The orbital and grid data showed varied results: the BR-DWGD database showed better agreement with the standard model throughout the state, especially in SP, Agreste Pernambucano (AP) and Mata Pernambucana (MP). GLEAM had limitations in AP, TerraClimate in AP, SP and SFP, and MOD16A2 in Metropolitana do Recife (MR) and MP. The study shows that, in addition to the standard model, the Solar Radiation model, the BR-DWGD base and the GLEAM showed good performance in estimating ET<sub>o</sub> in Pernambuco, being reliable alternatives for climate monitoring and regional water management.

**Keywords:** Penman-Monteith; MODIS; GLEAM; climate bases; climate data validation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo de evapotranspiração, com ênfase para suas variáveis de influência. ....	19
Figura 2 - GLEAM   Global Land Evaporation Amsterdam Model. ....	27
Figura 3 - Metodologia adotada na pesquisa. ....	29
Figura 4 - Localização da área de estudo ....	30
Figura 5 - Evapotranspiração de Referência por mesorregiões no estado do Pernambuco (a = Metropolitana do Recife (MR) e Mata Pernambucana (MP), b = Agreste Pernambucano (AP), c = São Francisco Pernambucano (SFP), d = Sertão Pernambucano (SP)). ....	44
Figura 6 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município do Recife, obtida para os modelos em estudo, para o período de 2004 a 2021. ....	46
Figura 7 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Palmares (MP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2008 a 2024. ...	48
Figura 8 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Garanhuns (AP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2007 a 2024. ....	50
Figura 9 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Caruaru (AP), obtidas pelos diferentes modelos, para o período de 2007 a 2024. ....	52
Figura 10 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Surubim (AP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2008 a 2024. ....	53
Figura 11 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Petrolina (SFP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2003 a 2024. ....	55
Figura 12 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Cabrobó, obtida pelos diferentes modelos, do período de 2007 a 2024. ....	57
Figura 13 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Floresta (SFP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2008 a 2024. ....	58
Figura 14 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Arcoverde (SP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2004 a 2024. ....	60
Figura 15 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Ibimirim (SP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2008 a 2024. ....	62
Figura 16 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Serra Talhada (SP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2008 a 2024. ....	63
Figura 17 – Distribuição espacial da ETo anual do produto MOD16A2 v6 em Pernambuco. ....	65
Figura 18 - Distribuição espacial da ETo anual do produto MOD16A2 v105 em Pernambuco. ....	69
Figura 19 - Distribuição espacial da ETo anual do produto TerraClimate em Pernambuco. ....	71
Figura 20 - Distribuição espacial da ETo anual do modelo GLEAM em Pernambuco. ....	74
Figura 21 - Distribuição espacial da ETo anual da base em grade BR-DWGD em Pernambuco. ....	76
Figura 22 - Resultados do índice de aridez para a estação de Cabrobó. ....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estações meteorológicas utilizadas. ....	32
Tabela 2 - Base de dados orbitais e em grade utilizados .....	33
Tabela 3 - Valores para o parâmetro Cv do modelo Radiação Solar .....	39
Tabela 4 - Fatores de conversão para a radiação solar. ....	39
Tabela 5 - Classificação dos valores do índice de correlação de Pearson (r). ....	42
Tabela 6 - Critério de interpretação do índice de desempenho (c).....	42
Tabela 7 - Classificação do índice de aridez (IA) quanto a suscetibilidade a desertificação. ....	43
Tabela 8 - Classificação do índice de aridez (IA) quanto a classificação climática. ..	43
Tabela 9 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Recife (MR). ....	46
Tabela 10 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Palmares (MP). ....	49
Tabela 11 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Garanhuns (AP). ....	51
Tabela 12 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Caruaru (AP). ....	52
Tabela 13 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Surubim (AP). ....	54
Tabela 14 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Petrolina (SFP). ....	56
Tabela 15 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Cabrobó (AFP). ....	57
Tabela 16 - Desempenho dos modelos indiretos para Floresta (SFP). ....	59
Tabela 17 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Arcoverde (SP). ....	60
Tabela 18 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Ibimirim (SP). ....	62
Tabela 19 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Serra Talhada (SP). ....	64
Tabela 20 - Desempenho do produto MOD16A2 versão 6. ....	67
Tabela 21 - Desempenho do produto MOD16A2 versão 105. ....	70
Tabela 22 - Desempenho do produto TerraClimate. ....	72
Tabela 23 - Desempenho do produto GLEAM. ....	75
Tabela 24 - Desempenho da base BR-DWGD. ....	77
Tabela 25 - Classificação do Índice de Aridez através da ETo(PM). ....	79

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>19</b>
3.1	EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....	19
3.2	ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO) .....	20
3.3	SENSORIAMENTO REMOTO E BASES CLIMÁTICAS EM GRADE PARA ESTUDO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....	23
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
4.1	ÁREA DE ESTUDO .....	29
4.2	OBTENÇÃO DE DADOS.....	31
<b>4.2.1</b>	<b>Dados de estações meteorológicas.....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Dados orbitais e em grade.....</b>	<b>32</b>
4.3	ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO) .....	35
4.4	ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS MODELOS DE ETO .....	40
4.5	ÍNDICE DE ARIDEZ (IA).....	42
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>44</b>
5.1	DESEMPENHO DOS MODELOS INDIRETOS DE ETO.....	45
<b>5.1.1</b>	<b>Mesorregião Metropolitana do Recife (MR).....</b>	<b>45</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Mesorregião Mata Pernambucana (MP).....</b>	<b>48</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Mesorregião Agreste Pernambucano (AP).....</b>	<b>50</b>
5.1.3.1	Garanhuns.....	50
5.1.3.2	Caruaru.....	51
5.1.3.3	Surubim .....	53
<b>5.1.4</b>	<b>Mesorregião São Francisco Pernambucano (SFP).....</b>	<b>55</b>

5.1.4.1	Petrolina .....	55
5.1.4.2	Cabrobó .....	56
5.1.4.3	Floresta .....	58
<b>5.1.5</b>	<b>Mesorregião Sertão Pernambucano (SP) .....</b>	<b>60</b>
5.1.5.1	Arcoverde .....	60
5.1.5.2	Ibimirim .....	61
5.1.5.3	Serra talhada .....	63
5.2	PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO .....	64
<b>5.2.1</b>	<b>MOD16A2 .....</b>	<b>64</b>
5.2.1.1	Versão 6 .....	64
5.2.1.2	Versão 105 .....	68
<b>5.2.2</b>	<b>TERRACLIMATE .....</b>	<b>70</b>
<b>5.2.3</b>	<b>GLEAM .....</b>	<b>73</b>
<b>5.2.4</b>	<b>BR-DWGD .....</b>	<b>76</b>
5.3	ÍNDICE DE ARIDEZ (IA) .....	78
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) é uma variável fundamental para o balanço hídrico e energético da superfície terrestre, pois está relacionada às perdas de água por evaporação do solo e pela transpiração das plantas. Por esse motivo, a ET é uma variável-chave para a gestão da agricultura irrigada, influenciando diretamente o planejamento e o manejo da irrigação (Allen et al., 1998). A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), que representa a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência, é utilizada como base para estimar a demanda hídrica de culturas agrícolas, subsidiando o planejamento e a gestão racional da água.

A região Nordeste do Brasil, especialmente o Semiárido, é caracterizada por elevada variabilidade espacial e temporal das chuvas, altas taxas de evaporação e altas temperaturas que contribuem para a ocorrência frequente de secas (Marengo et al., 2017). Pernambuco, inserido nesse contexto, apresenta grande diversidade climática, abarcando desde áreas litorâneas, com altas taxas de umidade relativa, até regiões interiores com clima semiárido (Seinfra, 2022). Nessas condições, a quantificação da evapotranspiração torna-se ainda mais relevante, pois a eficiência do uso da água depende da compreensão precisa das perdas por ET, especialmente para localidades em que a agricultura é dependente de irrigação.

O modelo padrão recomendado pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) para estimar a ET<sub>o</sub> é o modelo de Penman-Monteith da FAO-56 também referido como PM-FAO, por apresentar desempenho satisfatório em diversas condições climáticas e basear-se em fundamentos físicos (Allen et al., 1998). No entanto, a aplicação desse modelo requer a disponibilidade de diversas variáveis meteorológicas, como temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento. A escassez ou ausência de dados eficazes, sobretudo em regiões remotas ou com rede de monitoramento deficiente, impõem desafios à sua aplicação.

Diante dessas limitações, o uso de modelos indiretos, que estimam a ET<sub>o</sub> a partir de um número reduzido de variáveis meteorológicas, tem sido adotado em diferentes regiões do Brasil (Brixner; Schöffel; Tonietto, 2014; Silva, 2022; Meinhardt, 2023; Rosa; Fuzzo; Fischer Filho, 2023). Os modelos indiretos, como os de Hargreaves e Samani (1985), Jensen e Haise (1963), Makink (1957) e Hamon (1961), geralmente se baseiam na temperatura e radiação solar e, embora

apresentem menor complexidade, demandam validação local devido à sua sensibilidade às condições climáticas específicas.

Arraes et al. (2016) realizaram uma parametrização do modelo de Hargreaves e Samani (1985) para o estado de Pernambuco utilizando dados meteorológicos de oito cidades e implementou como base o modelo padrão de Penman-Monteith. Os autores concluíram que a calibração do modelo de Hargreaves e Samani permite sua aplicação em cidades com dados limitados, inclusive nos municípios que apresentaram resultados insatisfatórios com a versão original do modelo. De forma análoga, Macêdo et al. (2018) aplicaram o modelo de PM-FAO com dados limitados, bem como o modelo de Hargreaves e Samani (1985) e calibraram a equação para as regiões Litoral, Sertão e Agreste. Além disso, os autores elaboraram equações empíricas para cada estação por meio da análise de agrupamento para definição de regiões climáticas homogêneas. Lopes Sobrino et al. (2024) aplicaram os modelos de Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle e Priestley-Taylor em Codó-MA, para o período de 2009 a 2013, e observaram que Blaney-Criddle é o modelo que melhor se ajusta à região independente das estações do ano.

Ongaratto e Bortolin (2021) aplicaram os 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, e compararam com o modelo de Penman-Monteith. Os resultados mostraram que o melhor desempenho foi obtido pelo modelo de Blaney-Criddle, nas escalas diária e mensal, seguido pelo modelo de Jensen-Haise, que obteve melhor ajuste na escala mensal. Já Thornthwaite e Camargo apresentaram os piores desempenhos classificados como “sofrível”, “péssimo” e “mau”, a depender da escala analisada.

Oliveira et al. (2008) aplicaram diferentes modelos indiretos em uma bacia experimental do riacho Gameleira-PE e adotou o lisímetro como dado padrão de comparação. Os autores identificaram que o modelo da Radiação Solar foi o que melhor se ajustou aos dados do lisímetro e os modelos de Jensen-Haise e Tanque Classe A realizaram superestimativas da ETo. Portanto, o estudo de Oliveira et al. (2008), assim como os demais apresentados, evidencia a necessidade de uma criteriosa avaliação de cada modelo indireto de estimativa da evapotranspiração, considerando as particularidades climáticas e fisiográficas de cada região. A variabilidade nos resultados reforça que não há um modelo universalmente aplicável, sendo fundamental validar os modelos com dados observacionais locais para garantir

maior precisão nas estimativas e melhor embasamento na gestão dos recursos hídricos.

Além dos modelos empíricos, o avanço das tecnologias de Sensoriamento Remoto com utilização de modelos e bases climáticas em grade tem proporcionado novas possibilidades de estimativas contínuas e espacialmente distribuídas da evapotranspiração. Produtos como os derivados do sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*), como o MOD16A2, o modelo europeu *Global Land Surface Evaporation: The Amsterdam Methodology* (GLEAM) e a base em grade TerraClimate integram informações de satélites, modelos de reanálise e algoritmos para fornecer estimativas da evapotranspiração em diferentes escalas temporais e espaciais (Abatzoglou et al., 2018; Running et al., 2021a; Miralles et al. 2025).

Silva (2022) avaliou os produtos MOD16A2 e MOD16A3 para três municípios localizados no estado de Pernambuco e observou que eles tenderam a subestimar ou superestimar a ETo do modelo padrão, mas no caso do MOD16A2, verificaram-se melhores correlações para o período seco. Andrade et al. (2020) utilizaram o produto MOD16A2 em uma análise espaço-temporal da evapotranspiração sobre a bacia do rio Paraibuna, localizado entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, e identificaram que o produto se mostrou consistente na estimativa da evapotranspiração.

Romão (2023) utilizou os dados de precipitação e de evapotranspiração extraídos da base TerraClimate para avaliar a seca e os extremos de chuvas nas capitais do Nordeste do Brasil, através dos índices SPI (*Standardized Precipitation Index*) e RDI (*Reconnaissance Drought Index*). Por outro lado, Minuzzi e Turcato (2024) avaliaram a evapotranspiração de referência (ETo) disponibilizada pela base TerraClimate para 19 municípios localizados na região sul do Brasil e determinaram que a base é uma opção confiável de estimava de ETo com tendência a subestimação dos dados na faixa entre 0,44 mm/mês e 1,31 mm/mês.

Khan et al. (2018) avaliaram a evapotranspiração real dos produtos GLEAM, MOD16 e GLDAS em toda a extensão territorial da Ásia ao longo de 10 anos (2000 – 2010). Dentre os resultados obtidos, o GLEAM obteve o melhor desempenho, seguido pelo GLDAS, apresentando menores incertezas quanto aos diferentes tipos de vegetação existente no continente, diferente do MOD16, que apresentou altas incertezas sobre as condições de vegetação.

Xavier et al. (2022) desenvolveram uma base climática a partir da interpolação de dados oriundos de estações meteorológicas e pluviométricas existentes em todo o Brasil. A base foi utilizada no desenvolvimento da Climaterna, um novo conjunto de dados que permite analisar a relação entre variáveis de saúde e ambientais, apoiando pesquisas relacionadas a demografia, estudos populacionais, saúde públicas e ciências ambientais (Torezzan et al., 2025).

No entanto, percebe-se que o desempenho desses produtos depende da sua representatividade frente às condições locais. A diversidade de clima, relevo e vegetação no estado de Pernambuco, por exemplo, implica que diferentes modelos e produtos possam ter desempenhos distintos em cada mesorregião do Estado. Sendo assim, a presente pesquisa visa avaliar a evapotranspiração obtida por diferentes bases de dados e modelos empíricos em diferentes regiões climáticas do estado de Pernambuco.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar o desempenho de modelos indiretos e de produtos de Sensoriamento Remoto na estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), tendo como referência o modelo padrão Penman-Monteith, em diferentes contextos climáticos do estado de Pernambuco.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar o desempenho de modelos indiretos na estimativa da ET<sub>o</sub> para cada mesorregião do estado;
- Avaliar o desempenho pontual e o comportamento espacial de dados orbitais e em grade na estimativa da ET<sub>o</sub>;
- Aplicar o índice de aridez em uma das estações utilizadas para avaliar como os modelos indiretos impactam na classificação do índice.

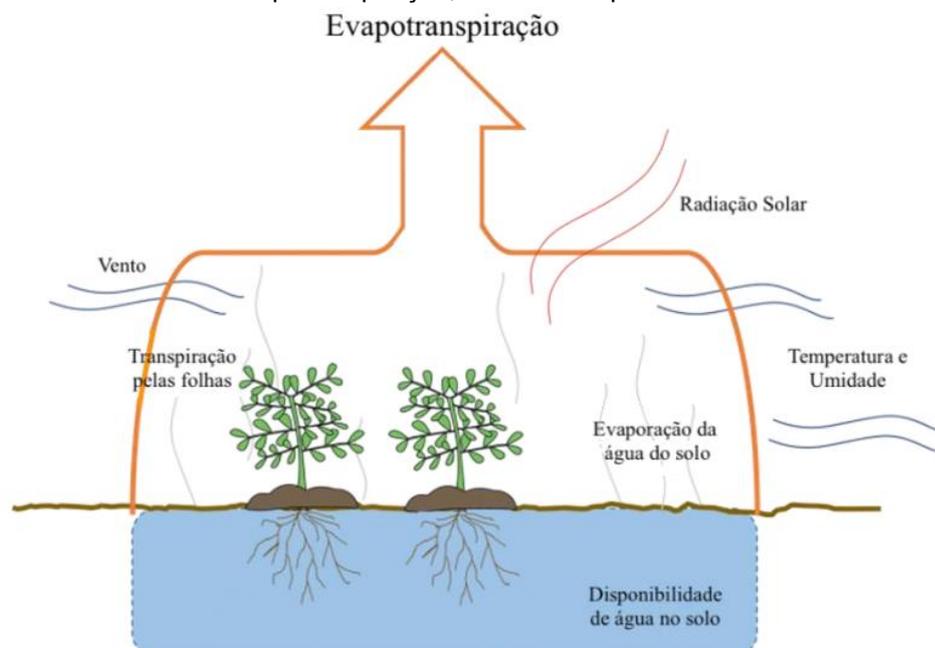
### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração é a união dos processos de perda de água por evaporação e transpiração, em que a evaporação é a transferência da água líquida, presente na superfície do solo ou outras superfícies, para vapor; e a transpiração é o processo de absorção de água pelas raízes das plantas e liberação para a atmosfera através dos estômatos presentes nas folhas (Allen et al., 1998).

Fatores atmosféricos como radiação solar, temperatura, umidade do ar e velocidade do vento influenciam no processo de evapotranspiração. A radiação solar é a fonte de energia necessária para as perdas de água por evaporação e transpiração, cujo calor emitido aumenta a temperatura do ar, influenciando na evapotranspiração, assim como a umidade relativa do ar, onde quanto mais alto seu valor, menos água será evaporada em decorrência do ar já estar saturado de vapor de água, dessa forma, o vento atua removendo o vapor da superfície, contribuindo para o aumento das taxas de evapotranspiração (Collischonn; Dornelles, 2013). A Figura 1 apresenta o processo de evapotranspiração e os fatores que o influenciam.

Figura 1 - Processo de evapotranspiração, com ênfase para suas variáveis de influência.



Fonte: Adaptado de Carleton College (2020).

A disponibilidade de água no solo é outro fator que influencia na evapotranspiração, conforme representado na Figura 1, pois quanto menor a umidade

do solo, menor será a taxa de transferência de água para a atmosfera (Tucci, 2012). Dessa forma, o sistema passa a depender das condições climáticas, do tipo de solo, do estado fisiológico das plantas e do seu sistema radicular (profundidade e eficiência das raízes conseguirem absorver água). Com base nisso, o autor cita que é possível diferenciar a evapotranspiração potencial da real.

A evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>) é a taxa de evaporação e transpiração, por unidade de tempo, que ocorreria sobre uma superfície coberta de vegetação de porte baixo se houvesse água suficiente no solo, ou seja, é limitada apenas pelo clima (Penman, 1956). Por sua vez, a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) é a taxa de evaporação e transpiração que ocorre levando em contas as condições atmosféricas reais existentes, considerando as restrições de água no solo, sendo menor ou igual a ET<sub>p</sub> (Gangopadhyaya, 1966).

O conceito de evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi introduzido por Doorenbos e Pruitt (1977) para substituir o termo ET<sub>p</sub> após Monteith propor um modelo de estimativa de evapotranspiração de cultura (ET<sub>c</sub>), baseado no modelo de Penman, e nomeá-lo como Penman-Monteith. Após a *Food and Agriculture Organization* (FAO) promover uma reunião com especialistas da área para discutir sobre conceitos e procedimentos de cálculo de evapotranspiração, o novo conceito de ET<sub>p</sub> passou a ser de ET<sub>o</sub>, cujo modelo recomendado para estimativa passou a ser chamado de Penman-Monteith FAO (PM-FAO) (Carvalho et al., 2011). Portanto, a ET<sub>o</sub> é definida como a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética, sem déficit de água, com altura de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência de superfície fixa de 70 m/s (Allen et al., 1998).

### 3.2 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET<sub>o</sub>)

A determinação da evapotranspiração é difícil e necessita de dispositivos específicos para obter medições precisas de diferentes parâmetros físicos. No entanto, os equipamentos utilizados são caros e precisam de mão de obra qualificada para operá-los (Allen et al., 1998). Dessa forma, é comumente utilizado dados meteorológicos para estimar a evapotranspiração de referência a partir de modelos empíricos ou semiempíricos.

Diversos modelos para estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) têm sido propostos na literatura, baseando-se tanto em fundamentos físicos quanto em equações empíricas. Frequentemente, esses modelos apresentam variações

entre si, resultantes de ajustes e calibrações realizadas para atender às particularidades climáticas de regiões específicas.

O modelo de Penman-Monteith para estimativa de ETo foi recomendado pela FAO para ser o modelo padrão por utilizar uma cultura hipotética que se aproxima da evapotranspiração da grama, além de ser baseado em princípios da física e incorporar parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos (Allen et al., 1998). Carvalho et al. (2011) ressaltaram que o modelo de PM-FAO é reconhecido internacionalmente como o mais apropriado para estimar a ETo por considerar muitas variáveis meteorológicas, como temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar.

Devido a boa consistência e ótimo desempenho do modelo PM-FAO, conforme contestado por Jensen et al. (1990), o modelo é utilizado como padrão de comparação com outros modelos indiretos, inclusive com variações do mesmo modelo com limitações de dados. Carvalho et al. (2013) observaram que as variações do modelo padrão com limitações de dados tendem a superestimar a ETo, mas permite obter a evapotranspiração necessária para irrigação em locais onde existe escassez de dados que impossibilite utilizar o modelo padrão. Vieira et al. (2023) analisaram quatro variações da equação de PM-FAO com dados faltantes, a versão com ausência de radiação solar e umidade relativa apresentou bom desempenho para o município de Luís Eduardo Magalhães-BA, já em Piracicaba-SP, todos os modelos apresentaram desempenho classificado como bom, muito bom ou excelente. De acordo com Silva (2016), a utilização da equação padrão limitada com velocidade do vento fixa de 2 m/s é a variação da equação que tem maior efeito na redução da precisão da estimativa de ETo.

O modelo de PM-FAO ou de Penman (1948) são considerados modelos combinados por utilizar muitas variáveis meteorológicas para estimar a ETo. Contudo, são utilizadas como alternativas os modelos baseados em temperatura, como os modelos de Thornthwaite (1948), Camargo (1971), Hamon (1961), Kharrufa (1985), Benavides e Lopes (1970) e Hargreaves e Samani (1985); e modelos baseados em radiação solar como Makkink (1957), Jensen e Haise (1963), Turc (1961), Priestley e Taylor (1972) e radiação solar ou radiação da FAO-24 (Doorenbos; Pruitt, 1977).

Moura et al. (2013) estimaram a evapotranspiração de referência (ETo) para a bacia experimental do riacho Gameleira em Vitória de Santo Antão, Pernambuco, através dos modelos de Thornthwaite, Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Thornthwaite modificado, Makkink, Jensen-Haise, radiação solar, entre outros. Dentre

os modelos baseados em temperatura do ar, os autores identificaram que o modelo de Hargreaves-Samani apresentou melhor desempenho, seguido de Blaney-Criddle. Entre os modelos baseados na radiação solar, o melhor desempenho foi o modelo da Radiação Solar, seguido de Makkink e Jensen-Haise.

Souza, Eichenberger e Nascimento (2019) avaliaram os modelos Blaney Criddle, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Linacre, e Thornthwaite com base na metodologia de referência PM-FAO para estimar a ETo no município de Feira de Santana-BA para o período de 2010 a 2014. Os resultados destacaram os modelos de Camargo e Hargreaves-Samani, que apresentaram desempenho classificado como “bom”, índice de concordância  $d$  com valores acima de 0.7 e correlação de Pearson  $r$  entre 0,96 e 0.83, respectivamente.

Rosa, Fuzzo e Fischer Filho (2023) utilizaram diferentes modelos indiretos para estimar a ETo para os municípios de Frutal, Conceição das Alagoas e Uberaba, em Minas Gerais. Os autores identificaram que os modelos Hargreaves e Samani e o de Turc tiveram os melhores desempenhos para a estação localizada em Frutal. O modelo de Thornthwaite se destacou em Uberaba pela subestimação da ETo. Em Conceição das Alagoas, Hargreaves e Samani foi o que mais se aproximou do modelo padrão. Portanto, os autores concluíram que o melhor desempenho para o Triângulo Mineiro foi obtido pelo modelo de Hargreaves e Samani e recomendaram ele para utilização na região.

Cabral Júnior, Silva e Almeida (2017) compararam a ETo estimada por diferentes modelos indiretos com o modelo padrão PM-FAO para as cidades de Petrolina-PE e Juazeiro da Bahia-BA. Os resultados identificaram que o modelo da Radiação Solar se aproximou mais do modelo padrão, apresentando desempenho muito bom para as duas cidades, seguindo pelo modelo de Linacre que teve desempenho mediano em Petrolina e bom em Juazeiro. O modelo de Hargreaves-Samani obteve o pior desempenho para as duas cidades, sendo classificado como péssimo.

Araújo et al. (2011) avaliaram os modelos Radiação da FAO 24, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Camargo e Irrigâmetro para as condições climáticas do sul do Espírito Santo. O modelo do Irrigâmetro (aparelho evapopluiométrico que estima a ETo) apresentou as melhores estimativas da ETo, os modelos de Camargo e Blaney-Criddle realizaram subestimações sobre os valores da ETo e os modelos da Radiação

da FAO 24 e Hargreaves e Samani realizaram superestimacões da ETo em relação ao modelo padrão.

Moraes et al. (2023) aplicaram os modelos de Hargreaves-Samani, Makkink, Budyko, Turc, Jensen-Haise, Linacre, Kharrufa, Radiação FAO24 e compararam com o modelo padrão PM-FAO para o período seco e chuvoso, na cidade de Imperatriz, MA. Os resultados apontaram que o modelo da Radiação Solar da FAO24 apresentou o melhor desempenho para os dois períodos analisados.

Os estudos revisados evidenciam o desempenho dos modelos indiretos variam de acordo com as condições climáticas e regionais. Em algumas áreas, como no Agreste Pernambucano e no Triângulo Mineiro, o modelo de Hargreaves-Samani apresentou resultados consistentes e próximos ao padrão (Moura et al., 2013; Souza; Eichenberger; Nascimento, 2019; Rosa; Fuzzo; Fischer Filho, 2023), enquanto em outras localidades, como no Vale do São Francisco e em Imperatriz-MA, os modelos baseados em radiação solar demonstraram melhor ajuste ao PM-FAO (Cabral Júnior; Silva; Almeida, 2017; Moraes et al., 2023). Além disso, casos como o do Espírito Santo destacam o bom desempenho de instrumentos como o Irrigâmetro, em contraste com a tendência de sub ou superestimacão de modelos clássicos (Araújo et al., 2011). Dessa forma, constata-se que a escolha do método deve ser orientada pelas características climáticas e pela disponibilidade de dados locais, reforçando a importância da avaliação regional para selecionar o modelo mais adequado à estimativa da ETo.

### 3.3 SENSORIAMENTO REMOTO E BASES CLIMÁTICAS EM GRADE PARA ESTUDO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

O Sensoriamento Remoto é a técnica que permite adquirir informações sobre a superfície terrestre sem contato direto, através da detecção da energia refletida ou emitida pelos alvos, permitindo o monitoramento ambiental em diferentes resoluções espaciais e temporais (Guedes; Silva, 2018). Segundo Jensen (2007), refere-se à aquisição, processamento e análise de informações da superfície terrestre obtidas por sensores que captam a energia eletromagnética. Essa técnica tem se tornado essencial para estudos ambientais, agrícolas e hidrológicos.

Devido à escassez ou a inexistência de dados climáticos necessários para estimar a ETo, seja através do modelo padrão ou demais modelos indiretos, a utilização do sensoriamento remoto para estudo da evapotranspiração se torna uma

alternativa viável para obter informações necessárias para análise ou estimativa dessa variável essencial para o manejo dos recursos hídricos, principalmente em áreas agrícolas (Oliveira, 2022).

Modelos baseados em balanço de energia da superfície (SEB) utilizam técnicas de sensoriamento remoto para estimar a evapotranspiração, como o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), o *Mapping ET at high Resolution with Internalized Calibration* (METRIC), *Simplified Surface Energy Balance Index* (S-SEBI), *Surface Energy Balance System* (SEBS) e *Operational Simplified Surface Energy Balance* (SSEBop) (Bhattarai et al., 2016). Vale et al. (2022) estimaram a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) por meio dos modelos SEBAL e SSEBop em áreas de pivô central no município de Cristalina-GO, com o objetivo de avaliar a demanda hídrica do cultivo de trigo irrigado no Cerrado. Os resultados indicam que, embora o SEBAL tenha apresentado desempenho satisfatório, o modelo SSEBop mostrou maior precisão na estimativa da ET<sub>r</sub>, destacando-se como uma alternativa mais adequada para apoiar o planejamento hídrico em áreas do Cerrado.

Dentre outras ferramentas existentes que permitem calcular ou obter dados de evapotranspiração, destaca-se o sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*), que está a bordo dos satélites Terra e Aqua da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e fornece gratuitamente séries globais sobre observações realizadas da superfície, oceano e atmosfera, com resolução radiométrica de 12 *bits*, compostas por 36 bandas espectrais que apresentam resoluções espaciais entre 250 m e 1 km (Manziona; Tanikawa; Soldera, 2014).

Dentre os produtos disponibilizados, o MODIS *Global Terrestrial Evapotranspiration Product* (MOD16A2) estima a evapotranspiração baseado na equação de Penman-Monteith, possui resolução espacial de 500 m e temporal de 8 dias (Running et al., 2017). O produto MOD16A2 integra o projeto NASA-EOS (*Earth Observing System*) e combina dados de reanálise, dados de satélite e de outros produtos do sensor MODIS (Mu et al., 2007).

O produto MOD16A2 possui as camadas de evapotranspiração de referência (ET) composta, fluxo de calor latente (LE), evapotranspiração potencial (PET) e fluxo de calor latente potencial (PLE), disponíveis juntamente com uma camada para o controle de qualidade (Running et al., 2017a). Os pixels das camadas ET e PET se referem a soma de oito dias, na qual no final de cada ano, a soma pode ser composta por 5 ou 6 dias (Running et al., 2021a).

A versão mais recente do produto é a 6.1, que teve como principais melhorias em relação a versão 6, correções para ajustar a diafonia ótica das bandas de infravermelho (IR) do sensor Terra MODIS, correção da polarização das bandas solares reflexivas L1B e alterações na abordagem de ângulo de reposta versus varredura (RVS) (Running et al., 2021a). A versão 6.1 possui dados de 2021 até o presente e a versão 6 possui dados de janeiro de 2001 até fevereiro de 2023.

Além dessas versões, existe a versão 105 do produto MOD16A2 desenvolvido pelo *Numerical Terradynamic Simulation Group* (NTSG) da Universidade de Montana (UMT) em parceria com o Sistema de Observações da Terra da NASA (*NASA Earth Observing System*) que possui dados disponíveis do período de janeiro de 2000 a dezembro de 2014, com resolução espacial de 1 km e temporal de 8 dias (Mu et al., 2014).

Além das versões citadas, o produto *Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) MOD16A2GF apresenta um conjunto de dados de evapotranspiração produzido ao final de cada ano com resolução temporal de 8 dias e espacial de 500 m, considerado uma versão aprimora do MOD16 e possui dados desde janeiro de 2000 até o presente (Running et al., 2021b).

A diversidade e a qualidade dos produtos MODIS existentes permitiram sua aplicação em pesquisas para verificar o desempenho e a aplicabilidade dos dados em diferentes regiões do Brasil e do mundo. Tito et al. (2021) compararam a estimativa de evapotranspiração obtida pelo produto MOD16A2 com o modelo de referência de Penman-Monteith da FAO-56 usando dados da estação de fluxo instalada no PNI (Parque Nacional de Itatiaia, Brasil) em 2018. De maneira análoga, Silva (2022) avaliou os dados evapotranspiração do MOD16, sensor Terra, para as cidades de Floresta, Ibimirim e Serra Talhada, em Pernambuco, estimada pelos produtos MOD16A2 e MOD16A3.

Degano et al. (2021) avaliaram a versão 6 do produto MOD16A2, nas bandas de evapotranspiração real (ET<sub>a</sub>) e evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>), para a Região dos Pampas Argentinos (APR), no período de 2009 a 2018. Teixeira et al. (2015) combinaram as imagens de evapotranspiração do produto MODIS com dados meteorológicos para monitorar parâmetros de vegetação e água no estado do Mato Grosso, Brasil.

Outra alternativa para obtenção de dados climáticas é a partir do TerraClimate, base climática global de dados mensais com resolução espacial de 1/24°

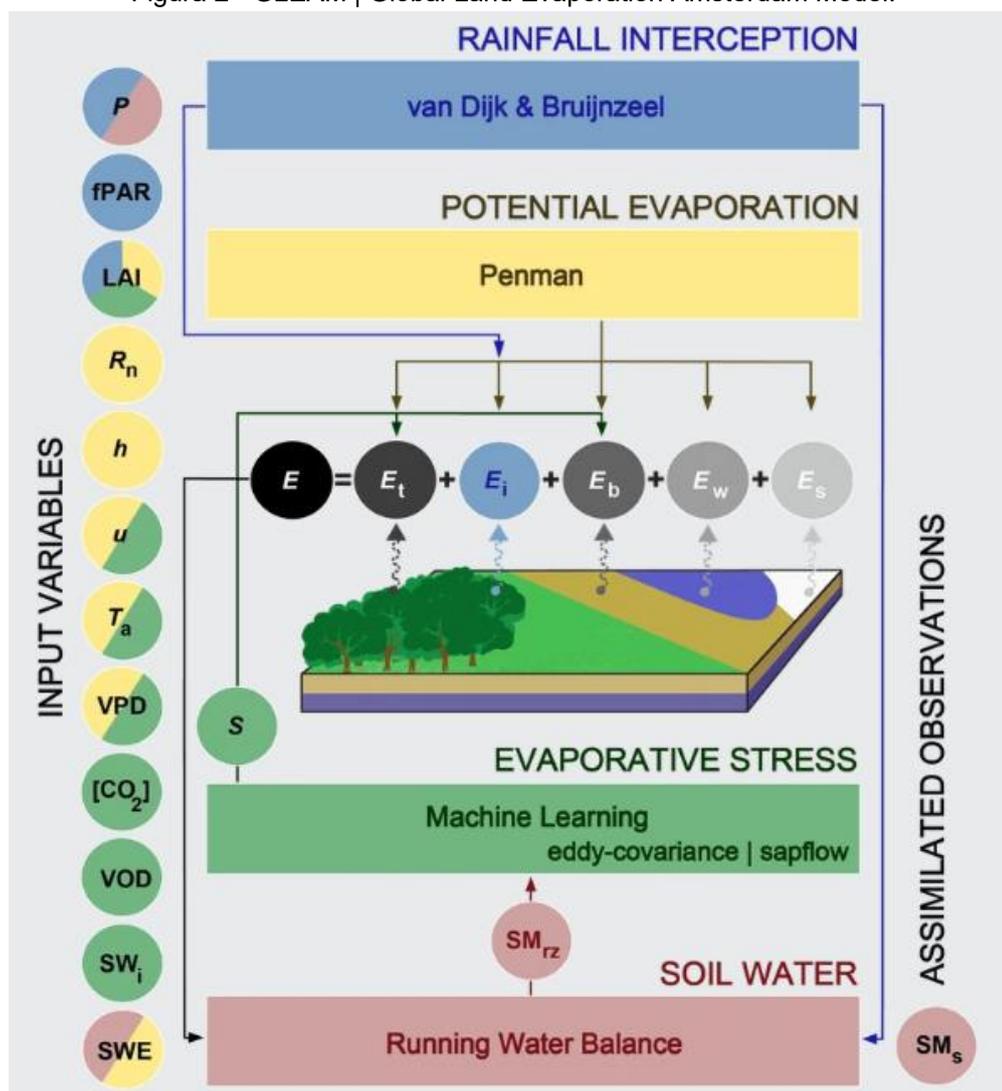
(aproximadamente 4 km), obtida a partir de interpolação das normais climatológicas do conjunto de dados de alta resolução da base WorldClim (resolução de  $0,01^\circ \times 0,01^\circ$ ) com dados de outras fontes com resoluções mais grosseiras como CRU TS (*Climatic Research Unit Gridded Time Series*) e a reanálise japonesa de 55 anos (JRA55) (Abatzoglou et al., 2018).

O produto fornece como variáveis primárias a precipitação, temperatura do ar máxima e mínima, velocidade do vento, pressão de vapor e radiação solar. Como variáveis derivadas, o produto disponibiliza a evapotranspiração de referência, baseada no modelo de Penman-Monteith da ASCE (*American Society of Civil Engineers*), evapotranspiração real, escoamento, entre outras variáveis (Abatzoglou et al., 2018). Devido a diversidade de variáveis disponíveis, o produto vem sendo utilizado em diversas pesquisas, pois é uma opção para realizar monitoramento climático e hidrológicos em diferentes regiões (Lemenkova, 2022a; Lemenkova, 2022b; Shamir et al., 2024; Araghi; Daccache, 2025).

Araghi, Martinez e Adamowski (2023) avaliaram os dados em grade do TerraClimate comparando-os com dados climáticos mensais coletados de 40 estações meteorológicas, de modo que conseguisse avaliar o desempenho da base de acordo com a diversidade climática existente no Irã. Filgueiras et al. (2022) utilizaram os dados da base TerraClimate para analisar o desempenho e calibrar suas variáveis climáticas a partir de dados de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) presentes em todo o estado do Brasil.

Outra fonte de dados necessários para monitoramento ambiental e climático está no uso do modelo europeu GLEAM (*Global Land Surface Evaporation: The Amsterdam Methodology*), que consiste em um conjunto de algoritmos baseados em sensoriamento remoto com a finalidade de estimar a evaporação e a umidade do solo em escala global (Miralles et al., 2011). A versão atual do GLEAM (versão 4 – GLEAM4) possui resolução espacial de  $0.1^\circ$  e apresenta conjunto de dados diários que cobre o período de 1980 a 2023. Os dados se encontram na versão “a”, onde os dados são baseados em dados de satélite e reanálise, e na versão “b”, onde o conjunto de dados é baseado somente em dados de satélite (Miralles et al., 2025). A Figura 2 mostra como são obtidas as variáveis do modelo GLEAM.

Figura 2 - GLEAM | Global Land Evaporation Amsterdam Model.



Fonte: Miralles et al. (2025).

O GLEAM4 possui as variáveis de evaporação real ( $E$ ), transpiração ( $E_t$ ), perda de interceptação ( $E_i$ ), evaporação do solo ( $E_b$ ), sublimação de neve ( $E_s$ ), condensação superficial ( $E_c$ ), evaporação em águas abertas ( $E_w$ ), evaporação potencial ( $E_p$ ), tensão evaporativa ( $S$ ), umidade do solo na zona radicular ( $SM_{rz}$ ) e umidade superficial do solo ( $SM_s$ ), conforme representado na Figura 2. A evapotranspiração ou evaporação potencial ( $E_p$ ) na versão atual é obtida por meio da equação de Penman a partir de dados observacionais de radiação líquida de superfície ( $R_n$ ), temperatura do ar próximo à superfície ( $T_a$ ), velocidade do vento ( $u$ ), índice de área foliar (IAF) e déficit de pressão de vapor (VPD), diferente das versões anteriores que eram baseadas na equação de Priestley e Taylor (1972) (Miralles et al., 2025).

Moreira, Adamatti e Ruhoff (2018) utilizaram a evapotranspiração baseada em Sensoriamento Remoto do modelo GLEAM em sítios de fluxos turbulentos do

Programa LBA, utilizando aversão baseada na equação de Priestley e Taylor (1972) com resolução espacial de  $0,25^\circ$ . Rossi (2020) utilizou a evapotranspiração da base GLEAM e outros produtos para realizar a representação dos eventos de seca no Brasil através do uso de produtos de sensoriamento remoto. Tavares et al. (2024) utilizaram a evapotranspiração real da base GLEAM para validar a evapotranspiração real do produto ERA5\_Land na América do Sul. Esses estudos demonstram a confiabilidade e aplicabilidade do GLEAM na análise de processos hidrológicos em diferentes escalas, reforçando seu papel como fonte robusta de dados para monitoramento climático, validação de modelos e análise de eventos extremos como as secas.

No Brasil tem-se a *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD), desenvolvida por Xavier et al. (2022), trata-se de uma base climática em grade com resolução espacial de  $0,1^\circ$  com cobertura temporal diária de janeiro de 1961 a março de 2024. A base engloba as variáveis de precipitação, evapotranspiração potencial, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento a 2 m de altura, obtidas por meio da interpolação de dados de 11.473 pluviômetros e 1.252 estações meteorológicas.

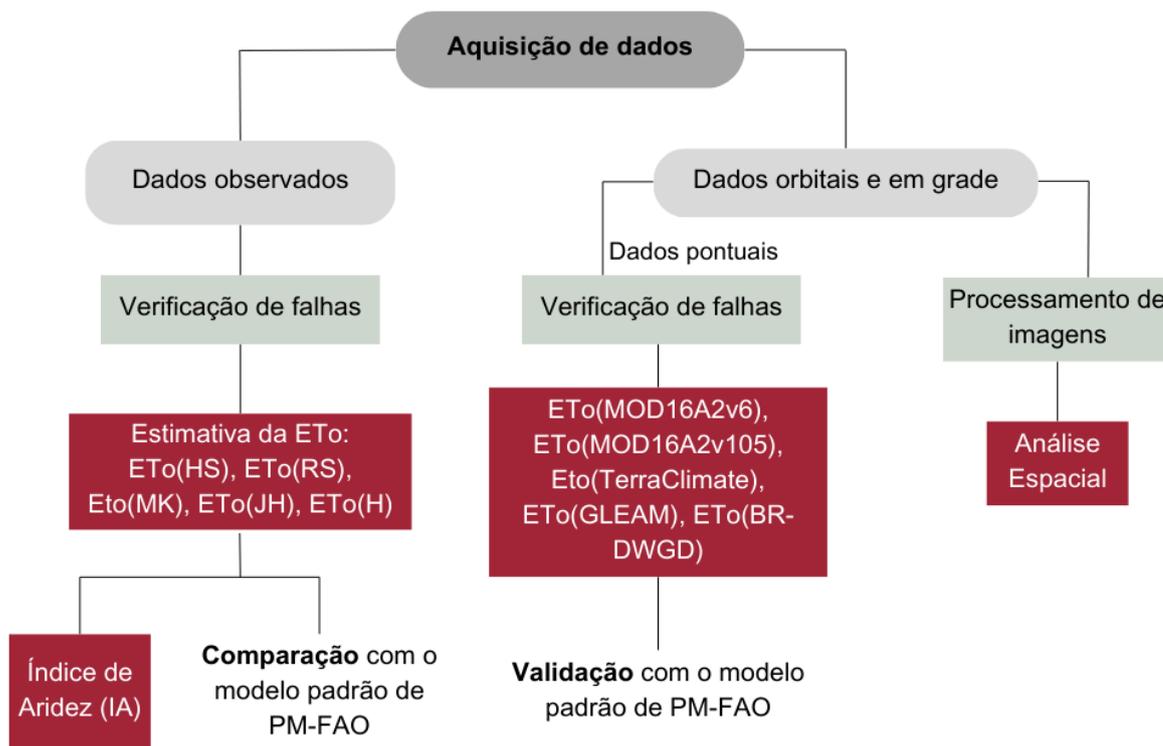
As variáveis disponíveis na base BR-DWGD permitem analisar a evapotranspiração em todo o Brasil e estimar a ETo através de outros modelos para diferentes regiões e identificar qual modelo indireto se ajusta melhor. Devido a boa resolução, a base tem sido utilizada como fonte para validação de outras bases climáticas. Tavares et al. (2024) utilizaram o DWGD para validar a evapotranspiração potencial da base climática global ERA5\_Land. Gomes et al. (2024) utilizaram os dados de precipitação da base para analisar as chuvas extremas no estado de Pernambuco a partir da utilização de índices climáticos de precipitação. Lima (2025) analisou a evolução temporal da região semiárida brasileira a partir dos dados da base BR-DWGD.

Dessa forma, a base BR-DWGD se consolida como uma importante ferramenta para estudos climáticos e hidrológicos no Brasil, permitindo análises com maior precisão espacial e temporal, além de contribuir significativamente para a validação de produtos globais e o aprimoramento de modelos regionais de estimativa de variáveis hidrometeorológicas, especialmente em contextos de monitoramento de secas e gestão de recursos hídricos.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia adotada na pesquisa está representada pelo fluxograma da Figura 3. O esquema resume as principais etapas do estudo, desde a seleção das bases de dados, processamento das variáveis climáticas, aplicação dos modelos de estimativa da ETo, até a validação dos resultados por meio de métodos estatísticos.

Figura 3 - Metodologia adotada na pesquisa.



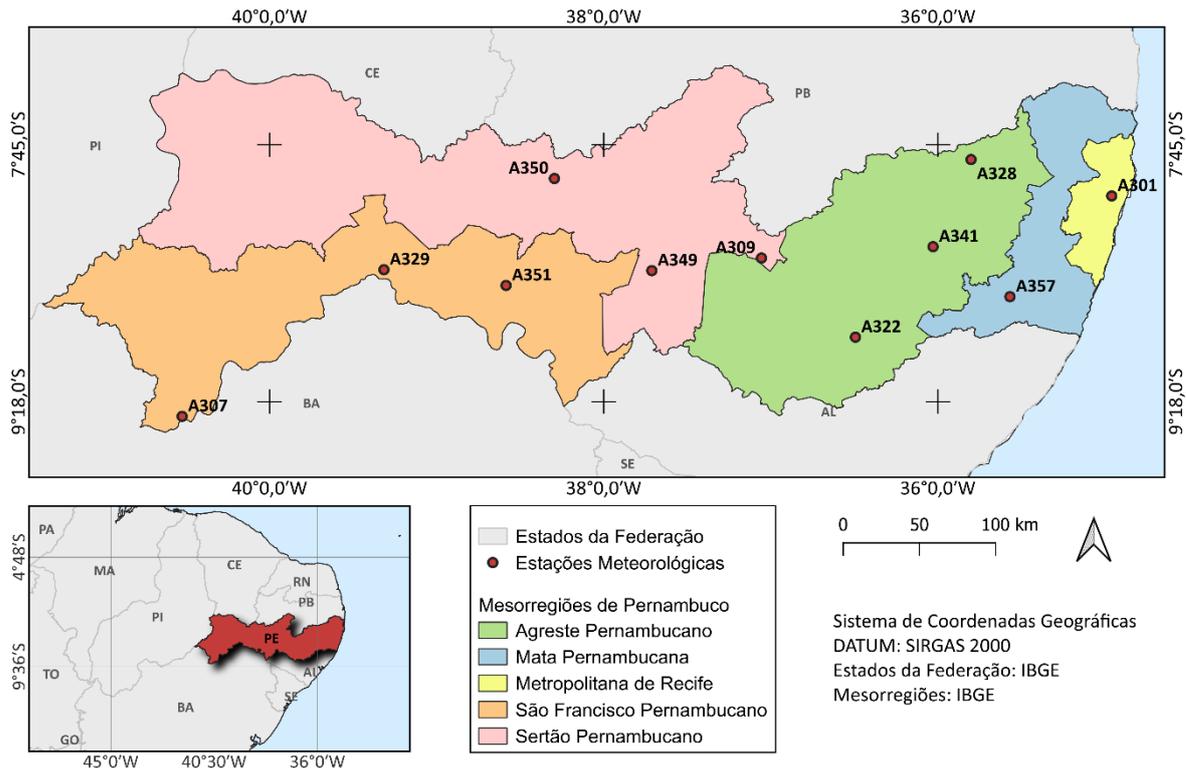
Fonte: A autora (2025).

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa concentrou-se em onze municípios localizados em diferentes mesorregiões do estado de Pernambuco, que, por sua vez, é composto por 185 municípios, com extensão de 98.067,9 km<sup>2</sup> e localizado entre as coordenadas 7°15' e 9°27' de latitude sul e 34° e 48°19' de longitude oeste, no centro leste da Região Nordeste do Brasil, conforme representado na Figura 4 (IBGE, 2025). De acordo com a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2023), o Estado é caracterizado pela sua diversidade climática que, segundo a classificação de Köppen, possui seis tipos variando entre o Clima Tropical de Monção (Ama), tropical com chuvas de outono-inverno (As'a), tropical com chuvas de verão-outono (Aw'a), tropical com chuvas de verão (Awa) e semiárido de baixas latitudes e altitudes (BSh), onde o último está presente em mais da metade do Estado. Em razão dessa variabilidade e

importância para a gestão dos recursos hídricos, o Estado é dividido em cinco zonas climáticas (mesorregiões) definidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE): São Francisco Pernambucano (SFP), Sertão Pernambucano (SP), Mata Pernambucana (MP), Agreste Pernambucano (AP) e Metropolitana de Recife (MR) (APAC, 2023).

Figura 4 - Localização da área de estudo



Fonte: A autora (2025), baseado em dados do IBGE (2022).

De acordo com a Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos (Seinfra, 2022), em Pernambuco, a temperatura anual média varia entre 18,28°C e 23,63°C, apresentando variações mais evidentes em direção ao Agreste e Sertão. A umidade relativa oscila entre 54,29% e 82,30%, com seu valor diminuindo de leste a oeste. Por sua vez, a evapotranspiração varia de 2500 mm no Oeste do Estado para 1158 mm a leste. Já a precipitação apresenta valores entre 1000 mm e 2200 mm no Litoral e na MP, 850 mm no AP e valores entre 700 e 400 no Sertão.

A MR é a mesorregião mais populosa e mais desenvolvida do estado, sendo Recife o município integrante que possui a maior densidade demográfica (IBGE, 2025). O relevo predominante na planície costeira varia entre plano e suave ondulado, sendo os tipos mais predominantes no Estado (Seinfra, 2022). A mesorregião apresenta Mata Atlântica (Floresta Ombrófila densa ou mista) como um dos principais

tipos de vegetação (IBGE, 2023). O clima é do tipo Ama, caracterizado por chuvas superiores a 1500 mm e temperatura de média acima de 22°C no mês mais quente (APAC, 2023).

De acordo com a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2023), a Mata Pernambucana (MP) possui o clima variando entre As'a, caracterizado por pluviometria inferior a 1500 mm, e BSh, com pluviometria inferior a 760 mm e temperatura média acima de 22°C. A altitude na região é em torno de 350 metros, apresentando relevo variando entre ondulado e forte ondulado com presença de encostas e piemonte orientais do Planalto da Borborema e vegetação com formação florestal composta pela caatinga e mata atlântica (Seinfra, 2022).

O Agreste Pernambucano (AP) é a zona de transição entre Sertão e a Mata Pernambucana, apresente clima predominantemente BSh, mas com presença dos climas As'a e Aw'a. As elevadas altitudes, acima de 500 metros, devido a presença do Planalto da Borborema, e altas taxas de umidade relativa do ar, fazem o clima da mesorregião ser menos árido que o Sertão mesmo estando inserido no Polígono das Secas (Andrade et al., 2018).

As mesorregiões do Sertão Pernambucano (SP) e São Francisco Pernambucano (SFP) são marcadas pelo clima semiárido, pela ocorrência de eventos de secas, presença do núcleo de desertificação de Cabrobó e do rio São Francisco, responsável pelo desenvolvimento da agricultura irrigada. Ambas as regiões são marcadas principalmente pela vegetação savânica e por formação florestal próximo a Chapada do Araripe (IBGE, 2023).

## 4.2 OBTENÇÃO DE DADOS

### 4.2.1 Dados de estações meteorológicas

A base de dados observados foi composta por dados de temperatura máxima, média e mínima, umidade relativa máxima, média e mínima, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar de onze estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) distribuídas pelo Estado. A localização das estações está representada na Figura 4 e as demais informações estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1 - Estações meteorológicas utilizadas.

Mesorregião	Código	Estação	Latitude	Longitude	Altitude	Período de dados
Metropolitana de Recife (MR)	A301	Recife	-8,0592	-34,959	11,30	21/12/2004-11/11/2021
Mapa Pernambucana (MP)	A357	Palmares	-8,6667	-35,568	164,01	03/09/2008-atual
	A322	Garanhuns	-8,9108	-36,493	827,78	07/07/2007-atual
Agreste Pernambucano (AP)	A341	Caruaru	-8,3653	-36,028	852,00	20/11/2007-atual
	A328	Surubim	-7,8397	-35,801	421,44	08/03/2008-02/08/2024
Sertão Pernambucano (SP)	A309	Arcoverde	-0,8434	-37,056	683,95	19/11/2004-atual
	A350	Serra Talhada	-7,9542	-38,295	499,02	08/07/2008-atual
	A349	Ibimirim	-8,5094	-37,712	434,23	13/10/2008-atual
São Francisco Pernambucano (SFP)	A329	Cabrobó	-8,5039	-39,315	342,74	03/09/2007-atual
	A307	Petrolina	-9,3883	-40,523	372,72	20/02/2003-25/09/2024
	A351	Floresta	-8,5989	-38,584	327,42	14/09/2008-atual

Fonte: A autora (2025), baseado nos dados do INMET (2025).

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi estimada diariamente para o período de dados disponíveis de cada estação. Em seguida, realizou-se a análise e remoção de falhas tanto nas estimativas obtidas pelos modelos quanto nos dados orbitais e em grade utilizados. As remoções foram mensais ou anuais, a depender da estação.

#### 4.2.2 Dados orbitais e em grade

Os produtos de sensoriamento remoto utilizados e suas respectivas informações estão presentes na Tabela 2 a seguir. Cada produto foi obtido para as coordenadas de cada estação no período disponível de dados observados, para posterior validação pelo modelo padrão ET<sub>o</sub> (PM), e através do *shapefile* do estado de Pernambuco para analisar o comportamento espacial do produto, com base nas mesorregiões.

Tabela 2 - Base de dados orbitais e em grade utilizados

Base	Banda ou variável climática	Unidade	Resolução		Período de dados
			Espacial	Temporal	
MOD16A2 v6	PET - Evapotranspiração potencial total	Kg/m <sup>2</sup> /8dias (mm/8dias)	500 m	8 dias	2001 - 2023
MOD16A2 v105	PET - Evapotranspiração potencial total	Kg/m <sup>2</sup> (mm/8dias)	1 km	8 dias*	2000 - 2014
TERRA CLIMATE	pet - Evapotranspiração de referência	mm	1/24° (~4 km)	mensal	1958 - Atual
GLEAM v4.2	Ep - Evaporação potencial	mm	0.1° (~10 km)	diário	1980 - 2024
BR-DWGD	ET - Evapotranspiração	mm	0.1° (~10 km)	diário	1961 - 2024

\*Para os dias 27 a 31 de dezembro de 2001, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, a unidade do PET é de 0.1mm/5dias e para os dias 26 a 31 de dezembro de 2000, 2004, 2008, a unidade é de 0.1mm/6dias.

Fonte: A autora (2025).

O produto MOD16A2 foi obtido por meio de *script* implementado na plataforma do Google Earth Engine (GEE), onde é definido a coleção “MODIS/006/MOD16A2”, a banda “PET”, a escala “500m”, a região da qual foram extraídos os dados, que nesse caso são as coordenadas das estações ou *shapefile* do Estado, é aplicado o fator de escala de 0.1 e as informações são extraídas no formato csv (separado por vírgula). No caso do recorte via *shapefile*, as imagens de 8 dias foram somadas e extraídas no sistema de referência EPSG 4326 (Datum WGS/84) e levadas para o software QGIS v3.32.1, onde foram reprojatadas e elaborados os mapas para os anos de 2009 a 2022. O período selecionado para a elaboração dos mapas corresponde ao intervalo comum a todas as estações e antecede a desativação do produto em 31 de julho de 2023.

A versão 6 do produto MOD16A2 utilizado possui algoritmo baseado na equação de Penman-Monteith, onde dados diários de reanálise e de sensoriamento remoto do MODIS são utilizados como entrada para relacionar variáveis meteorológicas com informações sobre uso e cobertura do solo (Running et al., 2017b).

O produto MOD16A2 com resolução espacial de 1 km é a versão 105 do produto MOD16A2 de 500 m, desenvolvido pelo *Numerical Terradynamic Simulation Group* (NTSG), da Universidade de Montana em colaboração com o Sistema de

Observação da Terra (*Earth Observing System*) da NASA (Mu et al., 2014). Assim como o MOD16A2 da coleção 6, o produto MOD16A2 v105 foi obtido por meio de *script* no GEE, onde foi selecionada a coleção de imagens "MODIS/NTSG/MOD16A2/105", a banda "PET", escala de 1000 m, aplicado fator de escala de 0.1, e exportado em csv. A extração das imagens pelo *shapefile* seguiu o mesmo procedimento citado anteriormente, mas devido esse produto só possuir dados do período de 2000 a 2014, foram elaborados mapas para os anos de 2009 a 2014.

Os dados de evapotranspiração da base climática TerraClimate foram obtidos através de código no GEE, na qual foi selecionada a coleção "IDAHO\_EPSCOR/TERRACLIMATE", a banda "pet" e demais informações sobre o produto que são necessárias para o *download*. A extração por *shapefile*, para posterior elaboração de mapas, foi feita para os anos de 2009 a 2024. A ETo do TerraClimate é baseada no modelo ASCE Penman-Monteith, que combina balanço de energia e trocas atmosférica sobre um gramado de referência (Abatzoglou et al., 2018).

Os dados do modelo GLEAM, versão 4.2a, foram obtidos através do software FileZilla, onde foram inseridas as informações da base recebidas no email. Os arquivos disponibilizados estão no formato netCDF (.nc), portanto as informações de Ep foram extraídos por coordenada e por *shapefile* via código no RStudio. A Ep do GLEAM é calculada através da equação de Penman partindo de variáveis como a radiação líquida da superfície ( $R_n$ ), velocidade do vento ( $U$ ), índice de área foliar (IAF), temperatura do ar próximo a superfície ( $T_{um}$ ) e déficit de pressão de vapor (VPD). (Miralles et al., 2025).

A ETo da base climática em grade BR-DWGD, foi obtida por meio de *script* no GEE, de maneira análoga aos demais dados obtidos na plataforma, selecionando a coleção "projects/ee-alexandre Xavier/assets/BR-DWGD". A base possui dados até março de 2024 e a evapotranspiração é obtida por meio da equação de Penman-Monteith partindo de dados interpolados de estações operantes do INMET e da Agência Nacional das Águas e Saneamento (ANA) (Xavier et al., 2022).

#### 4.3 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO)

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi realizada por meio de cinco modelos indiretos, os quais foram posteriormente comparados com o modelo padrão de Penman-Monteith (FAO 56), conforme descrito a seguir.

##### a) Modelo de Penman-Monteith-FAO – ET<sub>o</sub> (PM)

A equação do modelo padrão de Penman-Monteith, recomendada pela FAO por seu excelente desempenho para diversas localidades e climas, foi resultante da combinação da versão inicial da fórmula com as equações da resistência aerodinâmica e da superfície, adotando uma cultura de referência com 0,12 m de altura, albedo de 0,23 e resistência superficial de 70 s/m (Allen et al., 1998). A seguir está descrito o processo de obtenção da ET<sub>o</sub> a partir do modelo de Penman-Monteith.

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

Em que o fluxo de calor no solo (G), em MJ/m<sup>2</sup>dia, é desprezado para períodos diários, T<sub>med</sub> é a temperatura média diária calculada através da média entre a temperaturas máxima diária (T<sub>máx</sub>) e temperatura mínima diária (T<sub>mín</sub>), em C°, conforme equação 2:

$$T_{\text{med}} = \frac{T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}}{2} \quad (2)$$

A constante psicrométrica (γ), em kPa/°C, é determinada em função da pressão atmosférica (P<sub>atm</sub>), em kPa, que por sua vez, é calculada em função da altitude do local (z), em metros, conforme equações 3 e 4.

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

$$P_{\text{atm}} = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293} \right)^{5,26} \quad (4)$$

A pressão de vapor na saturação (e<sub>s</sub>), em kPa, é determinada por:

$$e_s = \frac{e^0(T_{\text{máx}}) + e^0(T_{\text{mín}})}{2} \quad (5)$$

Em que  $e^0(T_{\text{máx}})$  é a pressão de saturação de vapor à temperatura máxima (kPa) e  $e^0(T_{\text{mín}})$  é a pressão de saturação de vapor à temperatura mínima (kPa), determinadas através das equações 6 e 7:

$$e^0(T_{\text{máx}}) = 0,6108 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T_{\text{máx}}}{T_{\text{máx}} + 237,3}} \quad (6)$$

$$e^0(T_{\text{mín}}) = 0,6108 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T_{\text{mín}}}{T_{\text{mín}} + 237,3}} \quad (7)$$

A partir das pressões de saturação, e da umidade relativa do ar, a pressão de vapor atual ( $e_a$ ), em kPa, é determinada pela Equação 8:

$$e_a = \frac{e^0(T_{\text{mín}}) \cdot \frac{UR_{\text{máx}}}{100} + e^0(T_{\text{máx}}) \cdot \frac{UR_{\text{mín}}}{100}}{2} \quad (8)$$

Em que:  $UR_{\text{máx}}$  é a umidade relativa máxima do ar (%) e  $UR_{\text{mín}}$  é a umidade relativa mínima do ar (%).

A inclinação da curva de pressão de vapor é dada por:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T_{\text{med}} + 237,3)^2} \quad (9)$$

A velocidade do vento a 2 m de altura ( $U_2$ ), em m/s, pode ser determinada através da equação 10.

$$U_2 = U_z \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot z_m - 5,42)} \quad (10)$$

Em que:  $U_z$  é a velocidade no vento na altura medida, em m/s, e  $z_m$  é a altura em que a velocidade é medida, em m.

O saldo da radiação ou radiação líquida ( $R_n$ ), em MJ/m<sup>2</sup>dia, é determinado a partir da diferença entre saldo de radiação de ondas curtas ( $R_{nS}$ ), em MJ/m<sup>2</sup>dia, e o saldo de radiação de ondas longas ( $R_{nL}$ ), em MJ/m<sup>2</sup>dia, conforme equação 11.

$$R_n = R_{nS} - R_{nL} \quad (11)$$

O saldo de radiação de ondas curtas pode ser determinado pela Equação 12.

$$R_{nS} = (1-\alpha)R_s \quad (12)$$

Em que:  $\alpha$  é o albedo, considerado o valor de 0,23, e  $R_s$  é a radiação solar incidente, em MJ/m<sup>2</sup>dia, medida em estações ou estimada pela equação 13.

$$R_s = (0,25 + 0,5 \frac{n_H}{N}) R_a \quad (13)$$

Em que  $n_H$  é o número de horas reais de insolação (h),  $N$  é a insolação máxima diária teórica (h) e  $R_a$  é a radiação extraterrestre (MJ/m<sup>2</sup>dia).

A insolação máxima ( $N$ ) é baseada no ângulo do pôr-do-sol ( $\omega_s$ ), em radianos, obtido através das equações 14, 15 e 16.

$$N = \frac{24 \cdot \omega_s}{\pi} \quad (14)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (15)$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (16)$$

Em que:  $\varphi$  é a latitude em radiano,  $\delta$  é a declividade solar em radiano e  $J$  é o dia Juliano referente ao dia do mês no ano.

A radiação extraterrestre ( $R_a$ ) é determinada pela Equação 17, com apoio da Equação 18.

$$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)] \quad (17)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \quad (18)$$

Em que:  $G_{sc}$  é a constante solar (0,0820 MJ/m<sup>2</sup>min) e  $d_r$  é a distância relativa sol-terra em radianos.

O saldo de radiação de ondas, necessário para a Equação 11, é definido pela Equação 19.

$$R_{nL} = \sigma \left[ \frac{T_{\text{máx,K}}^4 + T_{\text{mín,K}}^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \cdot \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (19)$$

Em que:  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman ( $4,903 \cdot 10^{-9}$  MJ/K<sup>4</sup>m<sup>2</sup>dia),  $T_{\text{máx,K}}$  e  $T_{\text{mín,K}}$  são as temperaturas máximas e mínimas em kelvin (K),  $e_a$  é pressão de vapor atual (kPa) e  $R_{so}$  é a radiação solar em dias de céu claro (MJ/m<sup>2</sup>dia), definida pela Equação 20.

$$R_{so} = (a_s + b_s) \cdot R_a \quad (20)$$

Em que:  $a_s$  e  $b_s$  são a fração de radiação extraterrestre em dias claros ( $n=N$ ), cujo valor é considerado  $a_s + b_s = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z$ , quando os índices não disponibilizados, onde  $z$  é a altitude local (m).

### b) Modelo de Hargreaves-Samani – ETo (HS)

O modelo de Hargreaves e Samani (1985) foi desenvolvido para condições semiáridas, quando se tem ausência de dados de radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. É determinado a partir da temperatura do ar e da radiação extraterrestre, conforme Equação 21:

$$ETo(HS) = 0,0023 \cdot R_a \cdot (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0,5} \cdot (T + 17,8) \quad (21)$$

Em que: ETo (HS) - evapotranspiração de referência por Hargreaves-Samani (mm/dia),  $R_a$  - radiação solar extraterrestre (mm/dia),  $T_{\text{máx}}$  - temperatura máxima diária do ar (°C),  $T_{\text{mín}}$  - temperatura mínima diária do ar (°C),  $T$  - Temperatura média diária do ar (°C).

### c) Modelo da Radiação Solar ou FAO-24 da radiação – ETo (RS)

O modelo da Radiação Solar desenvolvido por Doorenbos & Pruitt (1977) relaciona a temperatura com a radiação solar associados ao parâmetro  $c_v$  que é determinado em função da umidade relativa e da velocidade do vento. Dessa forma, a ETo (RS) pode ser determinada a partir das equações 22 e 23:

$$ETo(RS) = c_v \cdot W \cdot R_s \quad (22)$$

$$W = 0,483 + 0,01 T_{\text{med}} \quad (23)$$

Em que: ETo (RS) - evapotranspiração de referência por Radiação Solar (mm/dia),  $c_v$  - fator de ajuste, determinado em função dos intervalos de velocidade

média do vento (m/s), medida a 2 m de altura, e umidade relativa média (%), W - fator de ponderação,  $R_s$  - radiação solar incidente (mm/dia),  $T_{med}$  – temperatura média diária.

A Tabela 3 a seguir apresenta os valores de cv em função da umidade relativa e da velocidade do vento.

Tabela 3 - Valores para o parâmetro Cv do modelo Radiação Solar

Intervalos de Velocidade Média do Vento (m/s)	Umidade Relativa Média (%)			
	< 40	40 - 55	55 - 70	> 70
0 - 2	0,971	0,920	0,857	0,814
2 - 5	1,057	1,014	0,927	0,886
5 - 8	1,143	1,100	0,986	0,923
> 8	1,229	1,172	1,043	1,000

Fonte: Pereira et al. (1997).

#### d) Modelo de Makkink – ETo (MK)

O modelo de Makkink (1957), desenvolvido para condições climáticas úmidas, foi determinado a partir da utilização de um lisímetro de lençol freático constante, relaciona a ETo com a radiação solar incidente  $R_s$ , em mm/dia, de acordo com a Equação 24.

$$E_{To}(MK) = 0,61 \cdot W \cdot R_s - 0,12 \quad (24)$$

Em que: ETo (MK) - evapotranspiração de referência por Makkink (mm/dia), W - fator de ponderação (Equação 23),  $R_s$  - radiação solar incidente (mm/dia).

A radiação solar incidente utilizada nos modelos anteriores é utilizada na unidade de MJ/ m<sup>2</sup>dia, a conversão em mm/dia foi realizada de acordo com Allen et al. (1998), conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Fatores de conversão para a radiação solar.

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

Fonte: Allen et al. (1998).

### e) Modelo de Jensen-Haise – ETo (JH)

O modelo de Jensen-Haise (1963) foi desenvolvido para região áridas e semiáridas, relacionado a temperatura com a radiação solar, conforme Equação 25.

$$E_{To}(JH) = R_s \cdot (0,0252T + 0,078) \quad (25)$$

Em que: ETo (JH) - evapotranspiração de referência por Jensen-Haise (mm/dia), T - Temperatura média diária do ar (°C), Rs - radiação solar incidente (mm/dia).

### f) Modelo de Hamon – ETo(H)

O modelo de Hamon (1961) determina a ETo em função da temperatura e da insolação máxima, como descrito na expressão da Equação 26.

$$E_{To}(H) = 0,55 \cdot \left(\frac{N}{12}\right)^2 \cdot \left(\frac{4,95 \cdot \exp^{0,062 \cdot T}}{100}\right) \cdot 25,40 \quad (26)$$

Em que: ETo(H) - evapotranspiração de referência por Hamon (mm/dia), T - Temperatura média diária do ar (°C), N – fotoperíodo (h) (Equação 14),  $\omega_s$  – ângulo horário do pôr-do-sol (Equação 15),  $\phi$  – latitude (rad),  $\delta$  – declividade solar (rad) (Equação 16), J - dia juliano.

## 4.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS MODELOS DE ETO

Os valores das estimativas de ETo diária obtido pelos cinco modelos e os dados orbitais e em grade foram comparados com o modelo padrão através das métricas estatísticas: raiz quadrada do erro-médio (RMSE), erro padrão de estimativa (SEE), erro médio absoluto (EMA), percentual de tendências (PBIAS), coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c). As expressões para determinação das métricas estão descritas pelas Equações 27 a 34.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (27)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n-1}} \quad (28)$$

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \quad (29)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \times 100 \quad (30)$$

$$r = \frac{\sum (S_i - \bar{S}_i) \times (O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{\sum (S_i - \bar{S}_i)^2 \times \sum (O_i - \bar{O}_i)^2}} \quad (31)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (S_i - O_i)^2}{\sum (|S_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \right] \quad (32)$$

$$c = r \cdot d \quad (33)$$

$$R^2 = \left( \frac{\sum (S_i - \bar{S}_i) \times (O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{\sum (S_i - \bar{S}_i)^2 \times \sum (O_i - \bar{O}_i)^2}} \right)^2 \quad (34)$$

Em que:  $O_i$  é a evapotranspiração estimada pelo modelo padrão de Penman-Monteith,  $\bar{O}_i$  é a média dos dados estimados por Penman-Monteith,  $S_i$  é a evapotranspiração estimada pelos demais modelos e produtos,  $\bar{S}_i$  é o média dos dados estimados, e  $n$  é a quantidade de números da amostra.

O RMSE indica a magnitude média das estimativas do erro, na qual o valor ideal é zero (Andrade et al., 2022a). Por sua vez, o SEE mede a dispersão dos dados em relação a reta de regressão. Já o EMA indica a diferença média entre os valores observados e estimados, tendo seu valor ideal próximo a zero (Chai e Draxler, 2014).

O Pbias analisa a tendência dos valores, representando melhor ajuste com o valor próximo a zero. O sinal negativo indica superestimação dos dados e o sinal positivo indica subestimação dos dados (Rizwan et al., 2023). De acordo com Moriasi et al. (2007), os valores do Pbias podem ser avaliados como “muito bom” ( $PBIAS < \pm 10$ ), “Bom” ( $\pm 10 < PBIAS < \pm 15$ ), “Satisfatório” ( $\pm 15 < PBIAS < \pm 25$ ) e “Insatisfatório” ( $PBIAS > \pm 25$ ).

O coeficiente de Pearson ( $r$ ) indica a relação linear existente entre dois conjuntos de dados, variando entre -1 e 1, onde represente um melhor ajuste com seu valor próximo de 1. Os valores obtidos para o coeficiente foram interpretados de acordo com a classificação de Cunha et al. (2013), presente na Tabela 5

Tabela 5 - Classificação dos valores do índice de correlação de Pearson (r).

<b>Índice de correlação (r)</b>	<b>Classificação</b>
0,0 a 0,1	Muito baixa
0,1 a 0,3	Baixa
0,3 a 0,5	Moderada
0,5 a 0,7	Alta
0,7 a 0,9	Muito alta
0,9 a 1,0	Quase perfeita

Fonte: Cunha et al., 2013.

O índice de concordância (d) de Willmott (1981) varia de 0 a 1, indicando concordância perfeita para valores próximos a 1 e a não concordância quando seu valor estiver próximo de 0 (Pedreira Junior et al., 2021). Camargo e Sentelhas (1997) propôs o índice “c” que indica o desempenho dos modelos utilizados. Os critérios de interpretação do índice estão presentes na Tabela 6.

Tabela 6 - Critério de interpretação do índice de desempenho (c).

<b>Índice de desempenho (c)</b>	<b>Desempenho</b>
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas, 1997.

Os modelos indiretos, o modelo GLEAM e a base BR-DWGD foram analisados diariamente, enquanto os produtos MODIS e TerraClimate foram analisados mensalmente.

#### 4.5 ÍNDICE DE ARIDEZ (IA)

Com o objetivo de exemplificar a aplicabilidade da ETo, será calculado o Índice de Aridez (IA) para a estação de Cabrobó, município localizado na mesorregião do São Francisco Pernambucano. O índice quantifica o grau de aridez de uma região com base na relação entre a precipitação e a evapotranspiração. Segundo Stadler (1987), esse índice é utilizado para identificar, localizar e delimitar áreas com déficit hídrico, condição que influencia diretamente o uso do solo para fins agrícolas e pecuários. Portanto foi utilizado a equação desenvolvida por Thornthwaite (1948) que posteriormente foi complementado por Penman (1953), conforme Equação 35.

$$IA = \left( \frac{P}{ET_p} \right) \quad (35)$$

Em que: P é a precipitação anual, em mm, e ET<sub>p</sub> a evapotranspiração potencial anual, em mm.

Os valores obtidos para IA podem ser interpretados, de acordo com Matallo Júnior e Schenkel (2003), quanto a suscetibilidade de desertificação e quanto a classificação climática, cujos critérios são utilizados no Brasil para delimitação da região semiárida segundo a resolução nº150, de 13 de dezembro de 2021 (SUDENE, 2021), conforme Tabelas 7 e 8:

Tabela 7 - Classificação do índice de aridez (IA) quanto a suscetibilidade a desertificação.

<b>Suscetibilidade à desertificação</b>	<b>Índice de Aridez (IA)</b>
Muito Alta	$0,05 \leq IA \leq 0,2$
Alta	$0,21 \leq IA \leq 0,5$
Moderada	$0,51 \leq IA \leq 0,65$

Fonte: Matallo Junior e Schenkel, 2003.

Tabela 8 - Classificação do índice de aridez (IA) quanto a classificação climática.

<b>Classificação climática</b>	<b>Índice de Aridez (IA)</b>
Hiperárido	$IA < 0,05$
Árido	$0,05 \leq IA \leq 0,2$
Semiárido	$0,21 \leq IA \leq 0,5$
Subúmido Seco	$0,51 \leq IA \leq 0,65$
Subúmido e Úmido	$IA > 0,65$

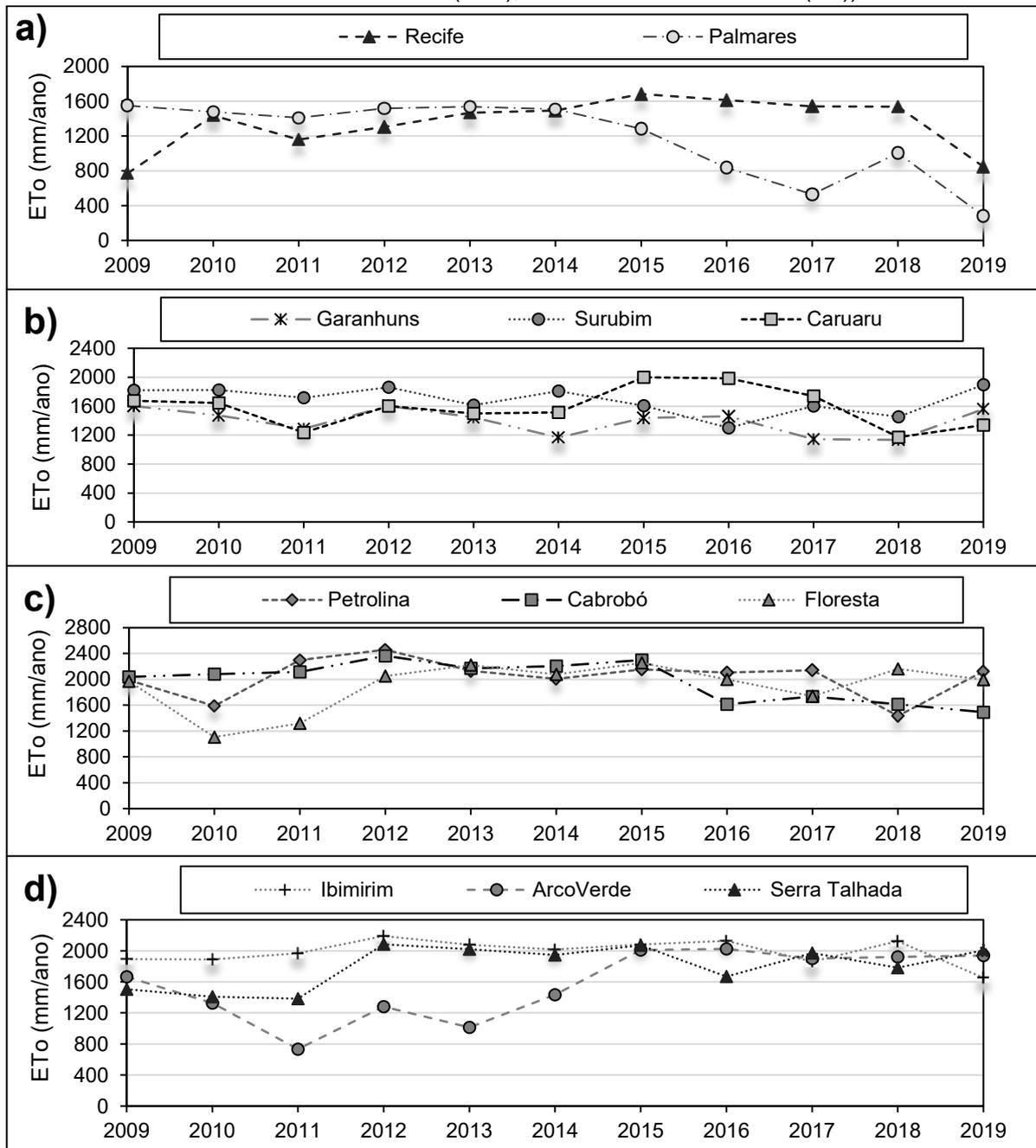
Fonte: Matallo Junior e Schenkel, 2003.

Essa aplicação foi realizada para a estação de Cabrobó devido ao município fazer parte do Núcleo de Desertificação de Cabrobó, constituído pelos municípios de Cabrobó, Belém do São Francisco, Carnaubeira da Penha, Floresta e Itacuruba, que representa 8,7% da área do Estado (MMA, 2007).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A evapotranspiração de referência estimada pelo modelo de Penman-Monteith apresentou os maiores valores para as mesorregiões do São Francisco Pernambucano (SFP) e Sertão Pernambucano (SP), variando entre 1200 mm e 2458 mm, no período de 2009 a 2019, conforme representado na Figura 5c e 5d.

Figura 5 - Evapotranspiração de Referência por mesorregiões no estado do Pernambuco (a = Metropolitana do Recife (MR) e Mata Pernambucana (MP), b = Agreste Pernambucano (AP), c = São Francisco Pernambucano (SFP), d = Sertão Pernambucano (SP)).



Fonte: A autora (2025).

As grandes perdas de água no Sertão por evapotranspiração acontecem devido à baixa pluviosidade e altas temperaturas presentes na região (Silva et al., 2022). A estação de Garanhuns, localizada no Agreste, chegou a 1602 mm nesse período. As demais estações localizadas na Mata Pernambucana (MP) e Metropolitana de Recife (MR), apresentaram valores abaixo de 800 até 1683 mm, conforme representada na Figura 5a. De acordo com a APAC (2022), a evapotranspiração varia de 2500 mm no Oeste do Estado para 1158,2 mm a leste, estando de acordo com os valores estimados.

A evapotranspiração estimada para as estações de Serra Talhada e Arcoverde, localizadas no Sertão do Pernambuco (Figura 5d), tiveram valores variando entre 1568 e 1804 mm, em média, no período de 2009 a 2019. Em Floresta e Cabrobó, no Sertão do São Francisco (Figura 5c), a ETo variou, em média 1899 e 1975 mm. Por fim, a ETo em Caruaru e Surubim, no Agreste, (Figura 5b) oscilou entre 1582 e 1681 mm. De acordo com Medeiros et al. (2021), as maiores taxas de evapotranspiração no Sertão decorrem da influência de sistemas atmosféricos transitórios no regime de precipitação que é intensificada pelas trocas de calor.

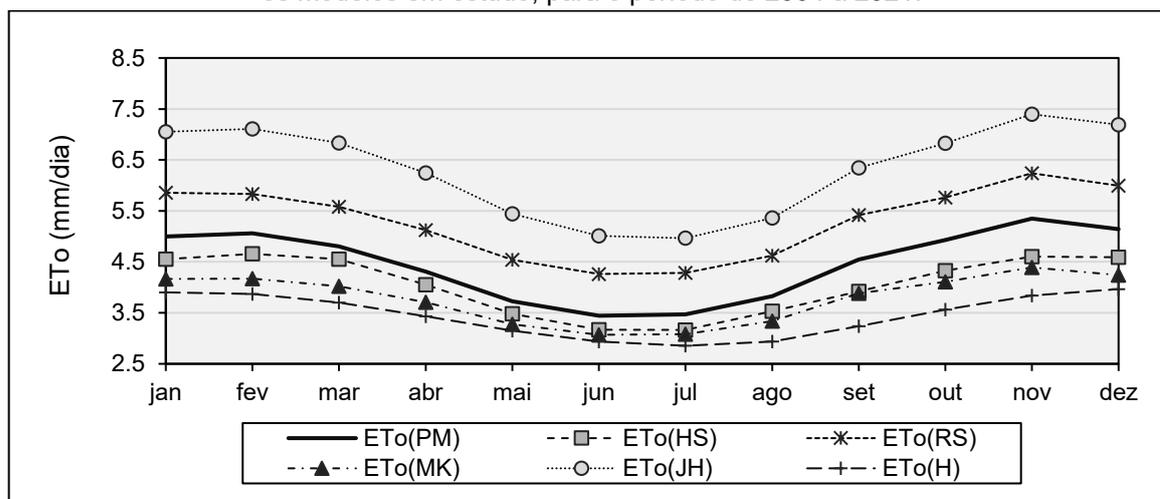
De acordo com Alvalá et al. (2017), o Nordeste foi marcado por eventos de seca nos últimos 40 anos, principalmente nos períodos de 1979-1983, 1992-1993, 1997-1998 e 2012-2017. Nota-se na Figura 5, que no período de 2012 a 2017 foram registrados os maiores valores de evapotranspiração anual, o que indica que nesse período teve uma maior demanda atmosférica por água, em todas as mesorregiões, exceto para as estações de Garanhuns, ArcoVerde e Palmares, que apresentaram falhas nos dados. Nos anos de 2015 e 2016, o evento se intensifica com a presença do El Niño Oscilação Sul (ENOS) e em 2012 com o fenômeno La Niña (Marengo et al., 2017). Esses fenômenos influenciam o comportamento da ETo, devido variação na temperatura, na incidência da radiação solar incidente e nas taxas de umidade relativa do ar.

## 5.1 DESEMPENHO DOS MODELOS INDIRETOS DE ETO

### 5.1.1 Mesorregião Metropolitana do Recife (MR)

A Figura 6 apresenta o comportamento médio diário da evapotranspiração obtida pelos modelos indiretos para a estação do Recife.

Figura 6 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município do Recife, obtida para os modelos em estudo, para o período de 2004 a 2021.



Fonte: A autora (2025).

Nota-se na Figura 6 que entre os meses de maio a junho tem-se as menores médias de ETo e de agosto a abril as maiores taxas. De acordo com Ribeiro e Nascimento (2020), os maiores índices de ETo ocorrem de dezembro a março, meses em que são registrados as maiores temperaturas e os menores índices de precipitação.

Os modelos de ETo(JH) e ETo(RS) apresentaram valores acima do modelo padrão ETo (PM) e os demais ficaram com os valores abaixo. Dentre os que ficaram abaixo do modelo padrão, o que mais se aproximou foi o modelo de ETo(HS). Os modelos ETo(JH) e ETo(H) foram os que mais se afastaram da ETo de referência.

Os resultados de desempenho das métricas analisadas para essa estação da MR está presente na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Recife (MR).

Métricas/Modelos	SEE	PBIAS (%)	EMA	R <sup>2</sup>	r	d	c	Desempenho
ETo (HS)	0,88	9,28	0,68	0,47	0,69	0,76	0,53	Sofrível
ETo (RS)	0,95	-18,54	0,83	0,94	0,97	0,87	0,84	Muito Bom
ETo (MK)	0,74	15,18	0,68	0,92	0,96	0,89	0,85	Muito Bom
ETo (JH)	1,97	-41,38	1,84	0,95	0,97	0,66	0,64	Mediano
ETo(H)	1,30	22,70	1,14	0,48	0,69	0,59	0,41	Mau

Fonte: A autora (2025).

O Erro Padrão de Estimativa (SEE), assim como o Erro Médio Absoluto (EMA), apresentou menor dispersão para a estação da RMR, com valores próximos a 1, para os modelos de ETo(HS), ETo(RS) e ETo(MK), e maior para os modelos de ETo(JH) e

ETo(H). Em relação ao Pbias, para os modelos de ETo(HS), ETo(MK), e ETo(H), houve subestimação em relação ao modelo padrão de ETo(PM). Todavia, o valor obtido pelo modelo ETo(HS) (PBIAS = 9,28%) é considerado “muito bom”, de acordo com Moriasi et al. (2007). Já para os modelos ETo(RS), ETo(MK) e ETo(H) o Pbias é classificado como satisfatório ( $\pm 15 < \text{PBIAS} < \pm 25$ ) e para o modelo de ETo(JH), o PBIAS = -41,38% é considerado insatisfatório.

Nessa estação, os melhores ajustes, de acordo com o coeficiente de determinação  $R^2$ , foram para os modelos de ETo(RS), ETo(JH) e ETo(MK). O coeficiente de correlação de Pearson apresentou classificação alta para os modelos ETo(HS) e ETo(H), e quase perfeita para os demais. O coeficiente de Wilmott “d” indicou uma boa concordância, com valores próximos de 1 para os modelos de ETo(RS) e ETo(MK) e menor concordância para o modelo de ETo(H), com o valor de 0,59. Dessa forma, os dois modelos com melhor ajuste de acordo com d, apresentaram melhor desempenho pelo índice “c”, ou seja, desempenho “muito bom”, e desempenho “mau” para o modelo de ETo(H). A pesquisa de Silva et al. (2012), realizada na zona norte de Recife, apresentou resultados semelhantes para os modelos de Hargreaves-Samani e Makkink, com índice de desempenho entre 0,80 e 0,98. Gonçalves Júnior et al. (2022) apresentaram desempenhos semelhantes para os modelos de Hargreaves-Samani ( $R^2=0,61$ ,  $r=0,78$ ,  $d=0,65$ ,  $c=0,51$ ) e Jensen-Haise ( $R^2=0,62$ ,  $r=0,79$ ,  $d=0,83$ ,  $c=0,65$ ), classificados como “Sofrível” e “Mediano”, aplicados no município de Bom Jesus-PI.

As estimativas obtidas pelo modelo de Hargreaves-Samani para Recife foram comparadas ao comportamento observado por Lima Junior (2023) no semiárido brasileiro, onde o modelo, sem calibração, apresentou limitações. Segundo o autor, a equação padrão de HS tende a subestimar ou superestimar a ETo, especialmente em regiões com forte sazonalidade ou ausência de dados completos. Na presente pesquisa, o modelo de Hargreaves-Samani apresentou tendência de subestimação dos dados, cuja calibração da equação, para as condições climáticas de Recife, pode melhorar o desempenho do modelo, assim como os procedimentos feitos por Arraes et al. (2016) e Macêdo et al. (2018).

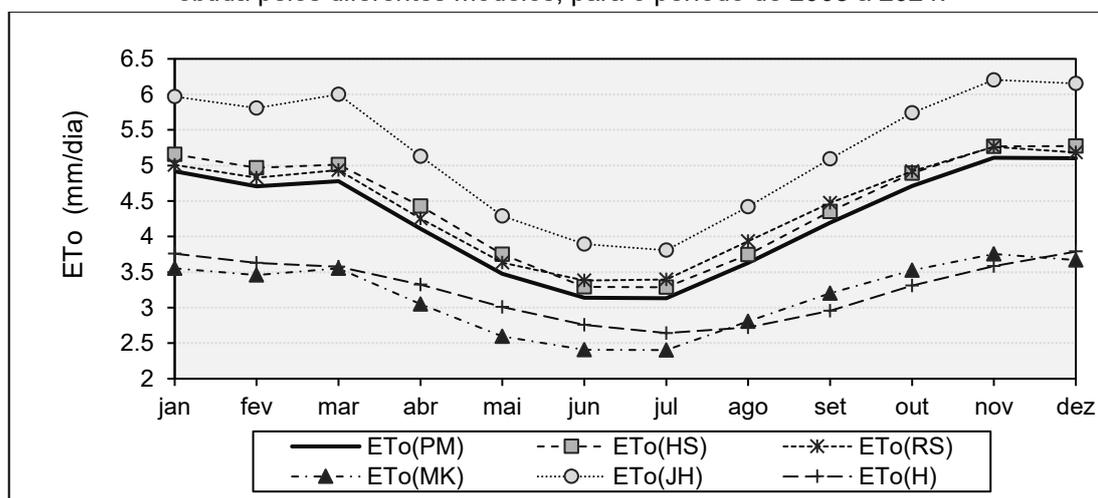
Por outro lado, o modelo de Hamon, baseado em temperatura e que considera o efeito da insolação, apresentou desempenho inferior aos demais modelos. De acordo com Fernandes et al. (2010), esse modelo tende a superestimar a ETo em

regiões úmidas, mas nessa pesquisa ele subestimou os dados na estação de Recife. Portanto, esse modelo pode ser calibrado para o município, assim como o de Hargreaves-Samani, de maneira análoga ao que foi feito por Borges e Mendiando (2007), que propôs coeficientes para aumentar a confiabilidade dos modelos de Blaney-Criddle, Hargreaves, Camargo, Thornthwaite, Hamon e Kharrufa aplicados na Bacia do Rio Jacupiranga, em São Paulo.

### 5.1.2 Mesorregião Mata Pernambucana (MP)

A Figura 7 ilustra o comportamento dos modelos indiretos de evapotranspiração para a estação de Palmares, região da Mata Pernambucana.

Figura 7 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Palmares (MP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2008 a 2024.



Fonte: A autora (2025).

É possível identificar na Figura 7 que os modelos de ETo(JH), ETo(RS) e ETo(HS) conseguem representar bem essa sazonalidade, sendo o modelo de ETo(HS) e ETo(RS) o que mais se aproximaram do modelo padrão. Os modelos de ETo(MK) e ETo(H) apresentaram médias abaixo da ETo(PM), sendo o modelo de ETo(H) o que obteve comportamento distante do padrão. No geral, a variação mensal da ETo, com base no modelo padrão de ETo(PM), foi semelhante ao apresentado por Silva et al. (2011) para as estações presentes na Zona da Mata, onde a ETo apresenta os menores valores entre os meses de abril e setembro devido as baixas temperaturas.

O desempenho dos modelos para o município de Palmares, localizado na Mata Pernambucana, está presente na Tabela 10.

Tabela 10 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Palmares (MP).

<b>Métricas/Modelos</b>	<b>SEE</b>	<b>PBIAS (%)</b>	<b>EMA</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>r</b>	<b>d</b>	<b>c</b>	<b>Desempenho</b>
ETo(HS)	0,51	-4,73	0,40	0,82	0,90	0,93	0,84	Muito Bom
ETo(RS)	0,34	-4,29	0,27	0,95	0,97	0,98	0,95	Ótimo
ETo(MK)	1,13	25,55	1,09	0,94	0,97	0,76	0,74	Bom
ETo(JH)	1,06	-22,05	0,96	0,95	0,98	0,85	0,83	Muito Bom
ETo(H)	1,28	23,44	1,12	0,59	0,77	0,61	0,47	Mau

Fonte: A autora (2025).

O modelo de ETo(RS) obteve o melhor desempenho para a estação, com dispersão de dados baixa (SEE=0,34) e viés classificado como “muito bom” (PBIAS < 10%), correlação considerada “quase perfeita” e desempenho “ótimo”. Nota-se que os modelos de ETo(HS), ETo(RS), ETo(MK) e ETo(JH) tiveram os melhores desempenhos em relação ao coeficiente R<sup>2</sup>.

Por outro lado, o modelo ETo(H), apresentou a maior dispersão de dados (SEE =1,28), o Pbias indicou subestimação dos dados, mas com valor satisfatório (PBIAS < 25%), correlação “alta” e desempenho classificado como “mau”. Souza, Eichenberger e Nascimento (2019) obtiveram índice de concordância d=0,57, correlação r=0,94 e índice de desempenho c=0,54 para o modelo de Hamon aplicado em Feira de Santana-BA.

O modelo ETo(HS) obteve desempenho semelhante a ETo(RS), apresentando baixa dispersão de dados, correlação classificada como muito alta e índice de desempenho muito bom. Os demais modelos também obtiveram bons resultados, com desempenho variando entre bom e muito bom.

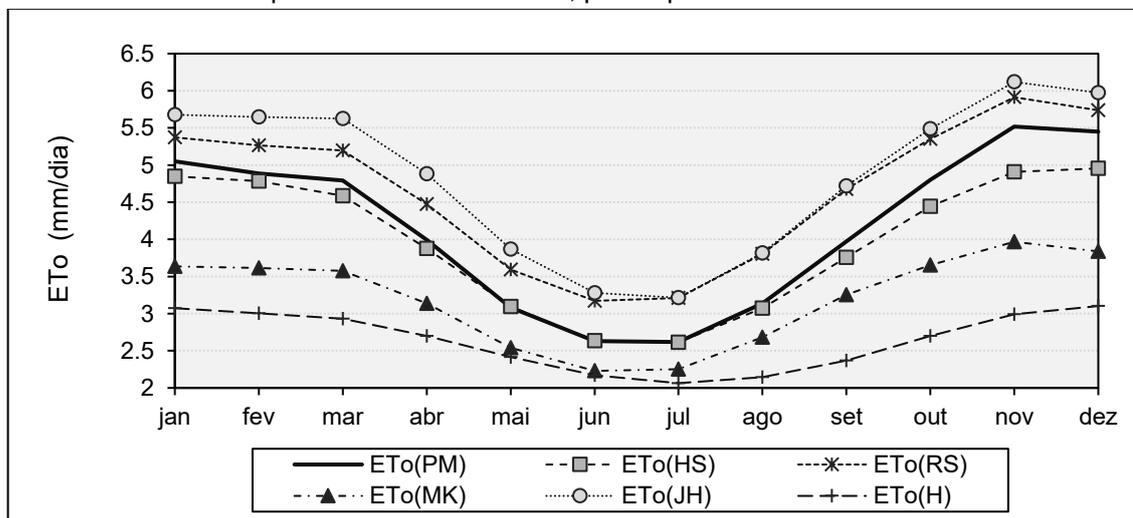
Moura et al. (2013) estudaram a evapotranspiração estimada por modelos indiretos, aplicados em uma bacia localizada na área de transição entre zona da mata e agreste, nessa pesquisa, o modelo de ETo(HS) também obteve desempenho muito bom e os valores de R<sup>2</sup> e “d” foram semelhantes. Os modelos ETo(RS), ETo(MK) e ETo(JH) também obtiveram comportamento semelhante, com desempenho variando de bom a ótimo. Resultados semelhantes também foram obtidos por Rosa, Fuzzo e Fischer Filho (2023), com R<sup>2</sup> variando entre 0,75 e 0,82 e coeficiente de Pearson entre 0,85 e 0,88, obtido para o Triângulo Mineiro Sul que apresenta clima tropical semelhante ao característico do oeste da Mata Pernambucana.

### 5.1.3 Mesorregião Agreste Pernambucano (AP)

#### 5.1.3.1 Garanhuns

O comportamento dos modelos para o município de Garanhuns, está representado na Figura 8. Na imagem, nota-se que a curva da ETo é mais evidenciada do que nas estações citadas anteriormente, com valores médios de ETo variando entre 2,61 e 5,51 mm/dia para o modelo padrão de ETo(PM). Silva et al. (2011) evidenciaram que no Agreste existe uma maior oscilação da evapotranspiração em decorrências da variação de altitude existente, onde cidades como Pesqueira e Gravatá apresentam menores valores de ET entre os meses de maio e agosto.

Figura 8 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Garanhuns (AP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2007 a 2024.



Fonte: A autora (2025).

Em relação aos demais modelos, o modelo de ETo(HS) se aproximou mais de ETo(PM), seguido por ETo(JH) e ETo(RS), que conseguiram representar bem a sazonalidade da evapotranspiração, mas apresentando valores acima do modelo padrão. Já o modelo de ETo(MK) representou bem a sazonalidade, mas com valores abaixo do padrão. Assim, como nas outras mesorregiões, o modelo de ETo(H) obteve os valores mais distantes do modelo padrão e a sazonalidade da evapotranspiração foi mais suavizada em comparação aos demais.

Na Tabela 11 tem-se os resultados das métricas aplicadas para analisar o desempenho dos modelos na estação de Garanhuns.

Tabela 11 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Garanhuns (AP).

<b>Métricas/Modelos</b>	<b>SEE</b>	<b>PBIAS (%)</b>	<b>EMA</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>r</b>	<b>d</b>	<b>c</b>	<b>Desempenho</b>
ETo(HS)	0,68	4,96	0,53	0,83	0,91	0,92	0,83	Muito Bom
ETo(RS)	0,64	-11,33	0,54	0,92	0,96	0,95	0,91	Ótimo
ETo(MK)	1,18	23,44	1,00	0,86	0,93	0,79	0,74	Bom
ETo(JH)	0,86	-16,50	0,73	0,89	0,95	0,92	0,87	Ótimo
ETo(H)	1,92	37,19	1,62	0,68	0,83	0,56	0,46	Mau

Fonte: A autora (2025).

Em Garanhuns, os modelos que apresentaram as menores dispersões das estimativas ( $SEE < 1$ ) e menor EMA foram ETo(HS), ETo(RS) e ETo(JH) ETo(HS). O Pbias indicou que os modelos ETo(HS), ETo(MK) e ETo(H) subestimaram o modelo padrão, mas com desempenho muito bom para ETo(HS) (PBIAS=4.96), satisfatório para ETo(MK) (PBIAS=23.44) e insatisfatório para ETo(H)(PBIAS=37.19). Já os demais modelos superestimaram o modelo padrão (PBIAS<0), sendo classificado como bom para ETo(RS) (PBIAS=-11.33) e satisfatório para ETo(JH) (PBIAS=-16.5).

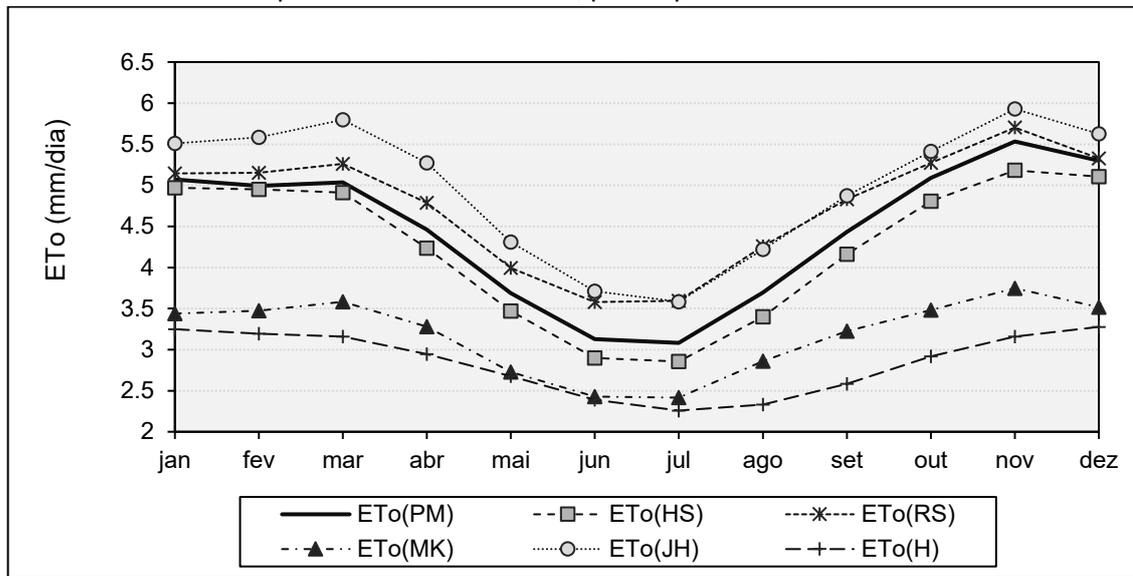
O modelo de ETo(H) obteve os menores valores para  $R^2$ , r e d, onde a correlação de Pearson obteve classificação muito alta para esse modelo e quase perfeita para os demais, o baixo índice de concordância para o modelo de ETo(H) resultou em um baixo índice de desempenho classificado como “mau”, já os demais modelos apresentaram desempenho variando entre bom, muito bom e ótimo. Turco (2020) avaliou 3 variações da equação de Hargreaves-Samani e obteve coeficiente de determinação igual a 0,89.

Borges Júnior et al. (2012) obtiveram para os modelos de ETo(HS) e ETo(RS), EMA igual a 0,48 e 0,72, índice d igual a 0,86 e 0,86, índice c igual a 0,72 e 0,85 e correlação r igual a 0,84 e 0,96, respectivamente, para o semestre de primavera-verão. Já para o semestre outono-inverno, obteve o EMA de 0,36 e 0,5, d igual a 0,94 e 0,93, c igual a 0,84 e 0,91 e r de 0,9 e 0,98, respectivamente. Os resultados obtidos nessa pesquisa se aproximaram mais dos valores que Borges Júnior et al. (2012) encontraram para o semestre primavera-verão, em que as taxas de evapotranspiração são maiores.

### 5.1.3.2 Caruaru

A Figura 9 mostra o comportamento médio mensal da ETo para os diferentes modelos indiretos para o município de Caruaru.

Figura 9 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Caruaru (AP), obtidas pelos diferentes modelos, para o período de 2007 a 2024.



Fonte: A autora (2025).

A ETo média diária em Caruaru variou entre 3,08 e 5,53 mm/dia para o modelo de ETo(PM). Todos os modelos, exceto ETo(H), conseguiram representar a sazonalidade da evapotranspiração ao longo dos meses. Os modelos de ETo(JH) e ETo(RS) apresentaram valores acima do padrão e os demais ficaram abaixo, sendo que ETo(JH) se aproximou muito de ETo(RS) entre os meses de julho e setembro. Na Figura 9, observam-se os menores valores de ETo entre os meses de maio e agosto e maiores entre setembro e abril. Esse padrão está de acordo com Medeiros (2018), que aponta que, em Caruaru, a estação chuvosa se concentra entre maio e julho, estendendo-se até agosto. Já os meses de outubro, novembro e dezembro caracterizam o período seco na região.

Na Tabela 12 apresentam-se os resultados das estatísticas aplicadas para o município de Caruaru.

Tabela 12 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Caruaru (AP).

Métricas/Modelos	SEE	PBIAS (%)	EMA	R <sup>2</sup>	r	d	c	Desempenho
ETo(HS)	0,75	4,76	0,58	0,72	0,85	0,90	0,76	Muito Bom
ETo(RS)	0,58	-6,17	0,46	0,90	0,95	0,96	0,91	Ótimo
ETo(MK)	1,41	28,81	1,29	0,87	0,93	0,75	0,70	Bom
ETo(JH)	0,76	-11,55	0,60	0,90	0,95	0,94	0,89	Ótimo
ETo(H)	1,94	36,43	1,68	0,63	0,80	0,55	0,44	Mau

Fonte: A autora (2025).

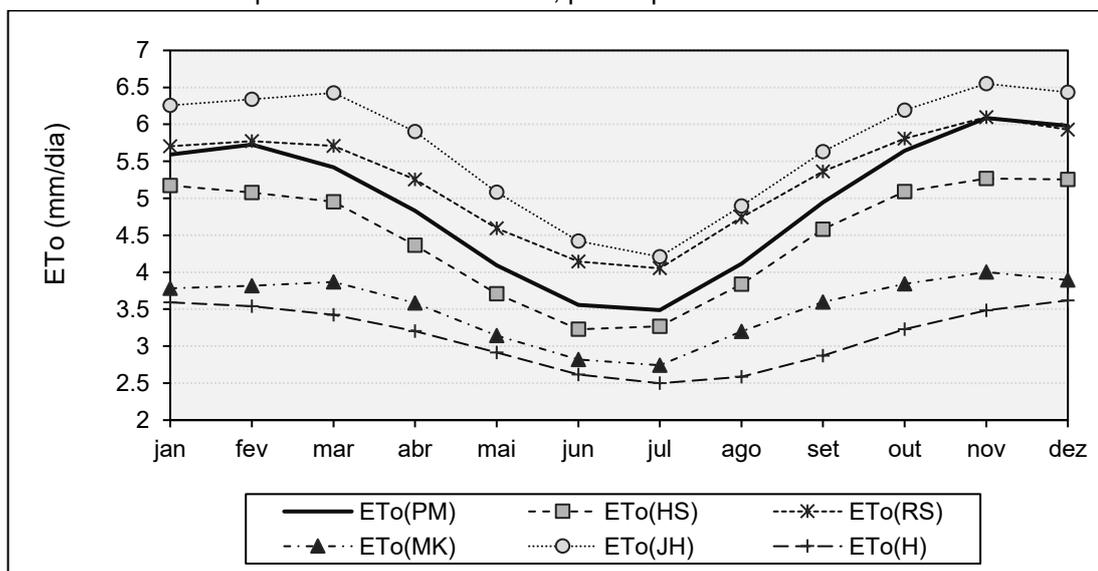
Os modelos obtiveram comportamento semelhante a estação de Garanhuns, onde o modelo de ETo(H) apresentou o pior desempenho, com maior valor de SEE, EMA e Pbias (indicando alta subestimação),  $R^2$  razoável e Pearson muito alto. Os valores encontrados de  $R^2$  e  $r$  para o modelo ETo(H) foram semelhantes ao encontrados por Nascimento et al. (2019), que obteve desempenho péssimo para Caruaru no ano de 2015.

Os modelos de ETo(RS), ETo(JH) e ETo(HS) obtiveram os menores SEE e EMA, Pbias indicando leve subestimação ou superestimação, no caso de ETo(HS), e com  $R^2$ ,  $r$ ,  $d$  e  $c$  com valores acima de 0,7, tendo seu desempenho classificado como ótimo ou muito bom. O modelo ETo(MK) teve SEE e EMA com valores acima de 1, Pbias insatisfatório superestimando o modelo padrão, e demais métricas com valores próximos ou acima de 0,7 e sendo classificado como desempenho bom. Coutinho et al. (2020) obtiveram métricas semelhantes para o modelo de Jensen-Haise aplicado em Teresópolis (RJ), onde  $r=0,9$ ,  $EMA=0,68$ ,  $d=0,93$  e  $c=0,84$ . Além desse modelo, os autores utilizaram Hargreaves-Samani, Benavides & Lopez e Hamon comparados com o modelo padrão de Penman Monteith FAO-56 para outras duas estações localizadas no Rio de Janeiro e outras três localizadas em municípios do Espírito Santo.

### 5.1.3.3 Surubim

A Figura 10 ilustra a ETo estimada pelos diferentes modelos para a estação meteorológica de Surubim.

Figura 10 - Comportamento médio diária da evapotranspiração para o município de Surubim (AP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2008 a 2024.



Fonte: A autora (2025).

A ETo do modelo padrão ETo(PM) variou entre 3,48 e 6,09 mm/dia em Surubim, com menores taxas entre os meses de março e julho, e maiores médias entre os meses de agosto e fevereiro. O modelo de ETo(H) não representou bem a variação da evapotranspiração evidenciada pelo modelo padrão, apresentando valores bem abaixo do esperado, variando entre 2,49 e 3,61 mm/dia. Por sua vez, o modelo ETo(RS) se aproximou do padrão, principalmente entre novembro de fevereiro, com valores variando entre 4,05 e 6,09 mm/dia. Freitas et al. (2018) detectaram que a ETo estimada pelo modelo de ETo(HS) variou entre 3,10 a 5,16 mm/dia e para o modelo de ETo(H), a variação foi entre 2,66 e 3,72 mm/dia, valores que estão dentro do intervalo observado na Figura10.

Na Tabela 13 a seguir está o resumo das métricas calculadas para cada modelo.

Tabela 13 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Surubim (AP).

<b>Métricas/Modelos</b>	<b>SEE</b>	<b>PBIAS (%)</b>	<b>EMA</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>r</b>	<b>d</b>	<b>c</b>	<b>Desempenho</b>
ETo(HS)	0,84	9,47	0,70	0,76	0,87	0,86	0,75	Bom
ETo(RS)	0,63	-6,46	0,51	0,83	0,91	0,94	0,86	Ótimo
ETo(MK)	1,59	28,70	1,42	0,75	0,87	0,68	0,59	Sofrível
ETo(JH)	0,99	-15,04	0,80	0,78	0,89	0,88	0,78	Muito Bom
ETo(H)	2,09	36,84	1,85	0,57	0,76	0,53	0,40	Péssimo

Fonte: A autora (2025).

Em Surubim, o modelo e ETo(RS) obteve melhor desempenho, com menor valor de SEE e EMA, menor Pbias indicando leve superestimação, e com as métricas R<sup>2</sup>, r, d e c com valores acima de 0,8, tendo desempenho classificado com ótimo. Em seguida tem-se o modelo ETo(JH), com erros próximos a 1, Pbias satisfatório, demais métricas com valores acima de 0,75, com Pearson considerado muito alto e desempenho muito bom.

Em terceiro tem-se o modelo ETo(HS) apresentando desempenho “bom”, Pbias muito bom e indicando leve subestimação, SEE e EMA com valores abaixo de 1, e demais métricas com valores acima de 0,7. De acordo com Arraes et al. (2016), o modelo Hargreaves-Samani tende a superestimar os valores de ETo em cidade como Surubim, Arcoverde e Garanhuns, devido a umidade relativa do ar ser acima de 70%.

O modelo de ETo(MK) teve desempenho sofrível, erros com valores acima de 1 e Pbias indicando subestimação considerável (insatisfatória). O pior desempenho

foi para o modelo de ETo(H), com desempenho péssimo, apresentando subestimação relevante, demais métricas inferiores a 0,7, exceto Pearson, classificado como correlação muito alta ( $0,7 < r < 0,9$ ).

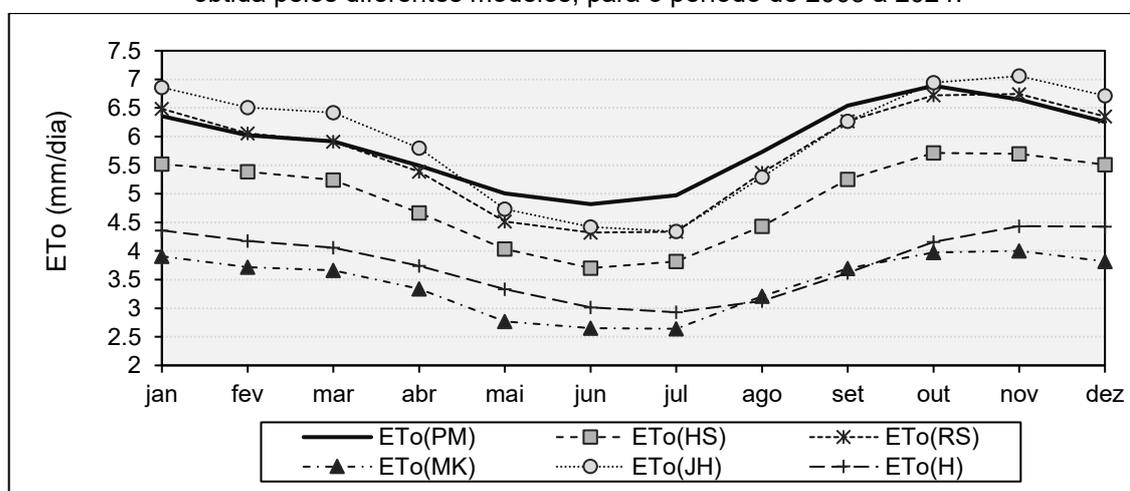
Portanto, para o Agreste Pernambucano, o método de Radiação Solar se ajustou bem as condições climáticas da região em todas as estações, pois de acordo com Fernandes et al. (2010), o coeficiente considerado no modelo permite que ele se ajuste a diferentes condições climáticas mesmo sendo desenvolvido originalmente para locais úmidos. O modelo de Jesen-Haise se apresentou como uma boa alternativa na estimativa da ETo no agreste, obtendo desempenho entre muito bom e ótimo.

#### 5.1.4 Mesorregião São Francisco Pernambucano (SFP)

##### 5.1.4.1 Petrolina

A ETo estimada através dos 6 modelos indiretos para Petrolina está presente na Figura 11. Nota-se na imagem que o comportamento da ETo ao longo dos meses é diferente em relação a MR, MP e AP, onde os valores mais baixos eram concentrados no centro do gráfico, já no SFP a curva é mais suavizada, com valores variando entre 4,81 e 6,88 mm/dia para o modelo padrão ETo(PM). Os modelos de ETo(RS) e ETo(JH) foram os que mais se aproximaram do modelo padrão, com valores acima e abaixo da curva do modelo padrão. ETo(HS) conseguiu representar bem a variação da ETo, já os modelos de ETo(MK) e ETo(H) apresentaram valores abaixo do esperado.

Figura 11 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Petrolina (SFP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2003 a 2024.



Fonte: A autora (2025).

A Tabela 14 a seguir apresenta os resultados da análise estatística, obtidos para a estação de Petrolina.

Tabela 14 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Petrolina (SFP).

<b>Métricas/Modelos</b>	<b>SEE</b>	<b>PBIAS (%)</b>	<b>EMA</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>r</b>	<b>d</b>	<b>c</b>	<b>Desempenho</b>
ETo(HS)	1,35	16,54	1,16	0,53	0,73	0,69	0,50	Mau
ETo(RS)	0,93	2,62	0,77	0,82	0,91	0,92	0,83	Muito Bom
ETo(MK)	2,52	41,07	2,43	0,74	0,86	0,55	0,47	Mau
ETo(JH)	1,05	-1,55	0,85	0,76	0,87	0,89	0,78	Muito Bom
ETo(H)	2,38	35,86	2,16	0,35	0,59	0,50	0,29	Péssimo

Fonte: A autora (2025).

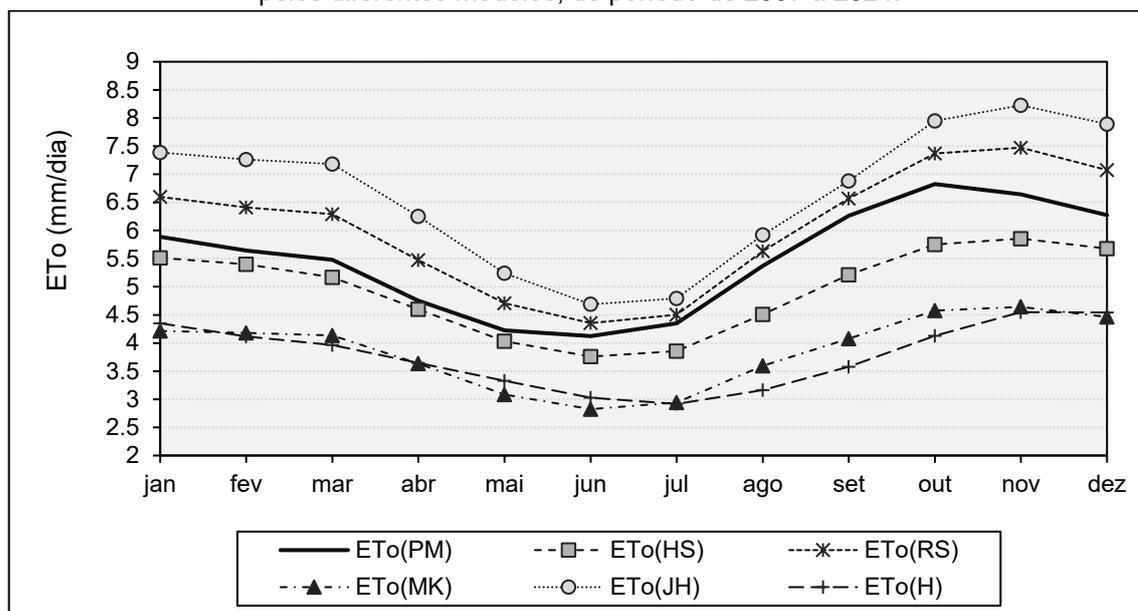
Os modelos de ETo(RS) e ETo(JH) obtiveram os melhores desempenhos para a estação de Petrolina, apresentando os menores valores de SEE, EMA e PBIAS e com as demais métricas com valores acima de 0,75. O modelo ETo(HS) obteve um desempenho mau, com SEE=1,35, EMA=1,16, com subestimação de dados (PBIAS=16,54) e correlação de Pearson muito alta (r=0,73). O modelo de ETo(MK) apresentou a maior dispersão entre os modelos (SEE=2,52), maior EMA, e maior valor do Pbias (PBIAS=41,07), considerado insatisfatório e indicando subestimação de dados. O modelo de ETo(H) apresentou desempenho péssimo através do índice c, mas apresentou SEE e Pbias inferiores a ETo(MK).

A pesquisa de Silva et al. (2014), identificou o modelo ETo(RS) como um dos que apresentou melhor desempenho e que a classificação do índice “c” foi considerada como muito bom. Cabral Júnior, Silva e Almeida (2017) apresentaram desempenho semelhante para Petrolina e Juazeiro da Bahia para os modelos de ETo(HS) e ETo(RS), classificados como péssimo e muito bom, respectivamente. Santos et al. (2017) obtiveram para Petrolina desempenho “péssimo” (R<sup>2</sup>=0,45, r=0,67, d=0,59, c=0,4) para o modelo de Hamon, “Bom” (R<sup>2</sup>=0,65, r=0,81, d=0,88, c=0,71) para Jensen-Haise e “Sofrível” (R<sup>2</sup>=0,53, r=0,73, d=0,82, c=0,6) para Hargreaves-Samani.

#### 5.1.4.2 Cabrobó

O comportamento dos modelos estudados para o município de Cabrobó está representado na Figura 12.

Figura 12 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Cabrobó, obtida pelos diferentes modelos, do período de 2007 a 2024.



Fonte: A autora (2025).

A ETo estimada por ETo(PM) variou entre 4,22 e 6,82 mm/dia em Cabrobó, com menores médias entre os meses de março e julho. Os modelos de ETo(HS), ETo(RS), ETo(JH) e ETo(MK) representaram bem a variação da evapotranspiração, sendo o modelo de ETo(RS) aquele que apresentou valores superiores mais próximos do padrão, principalmente nos meses de junho a setembro e o modelo ETo(HS) se aproxima bastante do modelo padrão de janeiro a junho, com valores de ETo abaixo do padrão. O modelo de ETo(H) não representou bem a variação mensal da ETo e obteve valores abaixo do modelo padrão.

A Tabela 15 apresenta as métricas estatísticas obtidas por modelo de evapotranspiração para os dados da estação de Cabrobó.

Tabela 15 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Cabrobó (AFP).

Métricas/Modelos	SEE	PBIAS (%)	EMA	R <sup>2</sup>	r	d	c	Desempenho
ETo(HS)	1,27	10,02	1,05	0,48	0,69	0,72	0,50	Mau
ETo(RS)	1,05	-10,06	0,82	0,74	0,86	0,90	0,77	Muito Bom
ETo(MK)	1,94	29,65	1,65	0,58	0,76	0,64	0,49	Mau
ETo(JH)	1,69	-20,98	1,35	0,56	0,75	0,77	0,58	Sofrível
ETo(H)	2,18	31,34	1,82	0,31	0,55	0,54	0,30	Péssimo

Fonte: A autora (2025).

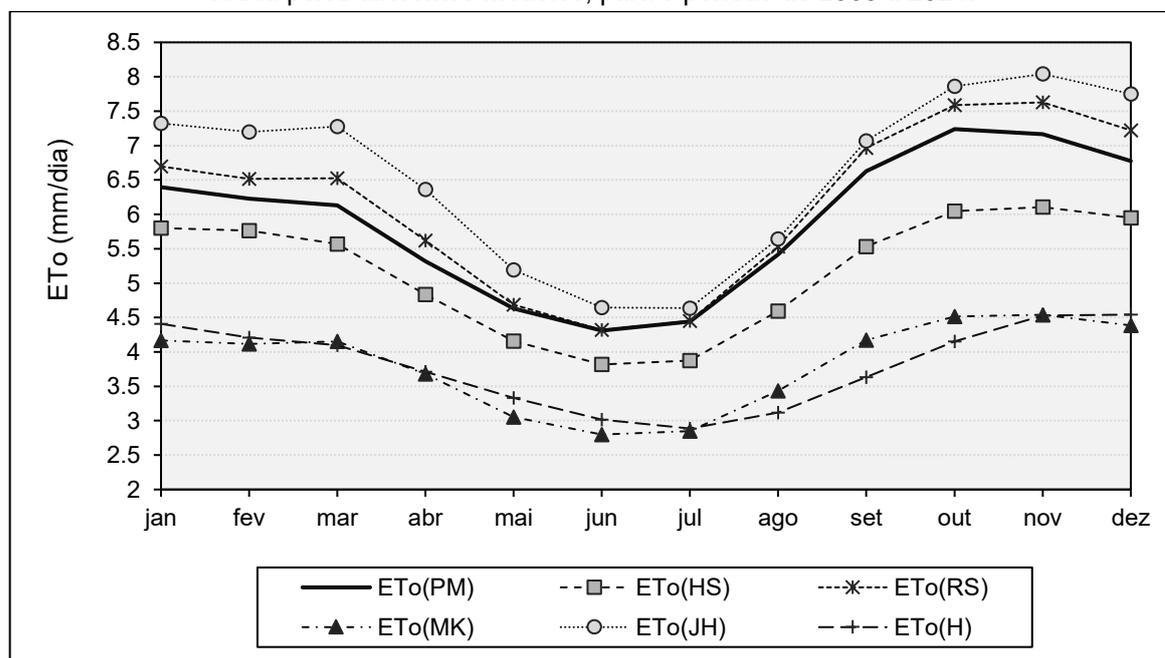
Na estação de Cabrobó, os modelos ETo(RS) e ETo(JH) se destacaram. O modelo ETo(RS) obteve o menor SEE (1,05), indicando que o erro entre os valores

estimados e observados da evapotranspiração foi de aproximadamente 1 mm/dia, apresentou bom coeficiente de determinação ( $R^2=0,74$ ), correlação muito alta ( $r=0,86$ ) e índice “c” classificado como Muito Bom ( $c=0,77$ ). Já o modelo ETo(JH) apresentou desempenho Sofrível ( $c=0,58$ ), com  $r=0,75$ ,  $SEE=1,69$  e com tendência de superestimação de dados, segundo o viés ( $PBIAS=-20,98$ ). O modelo ETo(HS) obteve desempenho considerado “mau” e leve subestimação dos dados ( $PBIAS=10,02$ ), enquanto os modelos ETo(MK) e ETo(H) apresentaram desempenhos “mau” e “péssimo”, respectivamente, sendo este último com o menor  $R^2$  ( $0,31$ ) e índice de desempenho  $c=0,30$ . De acordo com Macêdo et al. (2018), a velocidade do vento influencia bastante na estimativa da ETo em Cabrobó, visto que que foi uma variável significativa para a elaboração de equação empírica para a cidade.

#### 5.1.4.3 Floresta

O comportamento da ETo estimada pelos diferentes modelos indiretos para o município de Floresta está presente na Figura 13.

Figura 13 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Floresta (SFP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2008 a 2024.



Fonte: A autora (2025).

Observa-se na Figura 13 que os modelos ETo(RS) e ETo(JH) ficaram próximos do modelo padrão de ETo(PM), apresentando maiores valores principalmente nos meses de setembro a abril. Por sua vez, os modelos ETo(MK) e ETo(H) foram os que

mais se afastaram do modelo padrão e ETo(HS) ficou próximo, mas como valores de cerca de 1mm/dia abaixo.

A Tabela 16 mostra o desempenho dos cinco modelos a partir dos resultados das estatísticas aplicadas.

Tabela 16 - Desempenho dos modelos indiretos para Floresta (SFP).

Métricas/Modelos	SEE	PBIAS (%)	EMA	R <sup>2</sup>	r	d	c	Desempenho
ETo(HS)	1,12	9,52	0,91	0,62	0,79	0,80	0,63	Mediano
ETo(RS)	0,95	-1,40	0,68	0,89	0,95	0,94	0,89	Ótimo
ETo(MK)	2,23	37,16	2,13	0,82	0,90	0,67	0,60	Sofrível
ETo(JH)	1,22	-8,60	0,96	0,85	0,92	0,90	0,83	Muito Bom
ETo(H)	2,26	33,46	2,04	0,49	0,70	0,56	0,39	Péssimo

Fonte: A autora (2025).

Na estação de Floresta, o modelo ETo(RS) novamente apresentou o melhor desempenho, com SEE=0,95, R<sup>2</sup>=0,89, r=0,95 e c=0,89, sendo classificado como ótimo, demonstrando a robustez do modelo em diferentes regiões do Sertão do São Francisco. O modelo ETo(JH) também apresentou bom desempenho (SEE=1,22; PBIAS=-8,60), com r=0,92 e c=0,83 (Muito Bom). Já o modelo ETo(HS) foi classificado como mediano (c=0,63), com SEE=1,12. Por outro lado, os modelos ETo(MK) (SEE=2,23; PBIAS=37,16) e ETo(H) (SEE=2,26; PBIAS=33,46) apresentaram os piores desempenhos (sofrível e péssimo, respectivamente), com baixa acurácia e alta subestimação.

Esses resultados são consistentes com a análise de Silva (2022), que identificou o modelo de ETo(JH) como o mais eficaz para estimativas de ETo na região de Floresta, seguido por ETo(MK), enquanto outros modelos apresentaram resultados inferiores, reforçando a necessidade de considerar as condições climáticas específicas do Semiárido pernambucano para uma estimativa mais confiável. Tagliaferre et al. (2010) apresentaram resultados semelhantes para os modelos de Hargreaves-Samani (r=0,8, d=0,75, c=0,6) e Radiação Solar (r=0,96, d=0,98, c=0,94), cujos desempenhos também foram classificados como “mediano” e “ótimo”, respectivamente.

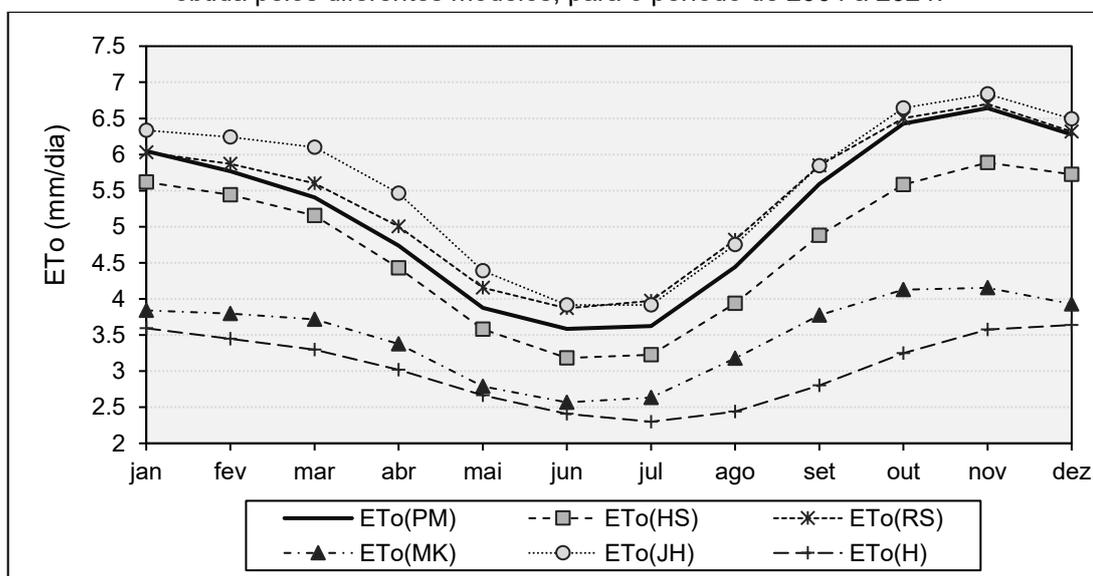
Portanto, para o SFP, o modelo de Radiação Solar é o mais indicado para estimar a ETo na mesorregião, pois seu desempenho variou entre muito bom e ótimo para as três estações analisadas.

### 5.1.5 Mesorregião Sertão Pernambucano (SP)

#### 5.1.5.1 Arcoverde

No município de Arcoverde, quando analisado o comportamento da média mensal da ETo para os modelos indiretos estudados, nota-se que os modelos de ETo(RS) e ETo(JH) se aproximaram muito entre si, nos meses de junho a setembro, e do modelo padrão, entre outubro e fevereiro. O modelo ETo(JH) obteve valores mais superiores entre janeiro e abril. O modelo de ETo(HS) representou bem a ETo, mas com valores abaixo do modelo padrão. Por fim, novamente os modelos de ETo(MK) e ETo(H) foram os que apresentaram comportamento mais inferiores, conforme representando na Figura 14.

Figura 14 - Comportamento médio diária da evapotranspiração para o município de Arcoverde (SP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2004 a 2024.



Fonte: A autora (2025).

Na Tabela 17 está o resultado das métricas aplicadas na estação de Arcoverde.

Tabela 17 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Arcoverde (SP).

Métricas/Modelos	SEE	PBIAS (%)	EMA	R <sup>2</sup>	r	d	c	Desempenho
ETo(HS)	0,81	9,30	0,65	0,80	0,90	0,90	0,81	Muito Bom
ETo(RS)	0,53	-3,74	0,43	0,90	0,95	0,97	0,92	Ótimo
ETo(MK)	1,83	32,75	1,69	0,84	0,92	0,67	0,61	Mediano
ETo(JH)	0,65	-7,32	0,52	0,88	0,94	0,95	0,89	Ótimo
ETo(H)	2,39	41,57	2,16	0,63	0,79	0,53	0,42	Mau

Fonte: A autora (2025).

Assim como mostrado na Figura 14, os modelos de ETo(RS) e ETo(JH) apresentaram melhor desempenho segundo as métricas aplicadas. O SEE teve valores variando de 0,53 a 2,39, sendo que os valores menores que 1 foram obtidos pelos modelos ETo(RS), ETo(JH) e ETo(HS). Esses três modelos também obtiveram os menores valores para o erro médio absoluto (EMA), que variou de 0,43 a 2,16. O Pbias indicou leve subestimação para ETo(HS), subestimação considerável para ETo(MK) e ETo(H), e leve superestimação para ETo(RS) e ETo(JH). O coeficiente de correlação  $R^2$  teve seus valores entre 0,63 e 0,9, sendo o menor obtido por ETo(H) e o maior por ETo(RS). O índice d variou entre 0,53 e 0,97, e o índice c entre 0,42 e 0,92, que resultou em desempenho variando entre mau, mediano, muito bom e ótimo. O índice de concordância d obtido para o modelo de ETo(JH) foi semelhante ao obtido por Ongaratto e Bortolin (2021) e Silva (2022), que apresentou d com valores próximos de 0,9.

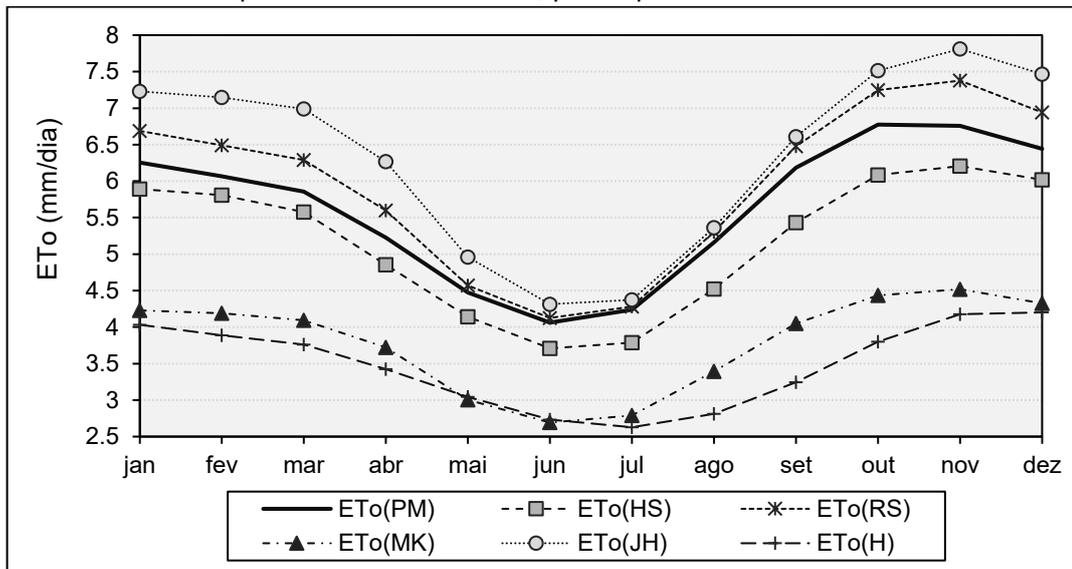
A correlação de Pearson foi muito alta para ETo(H) e quase perfeitas para os demais modelos. Os resultados obtidos para a correlação de Pearson corroboraram com Silva (2022) e Villa et al. (2021), que apresentaram valores acima de 0,9 para os modelos de Makkink, Jensen-Haise, Hargreaves-Samani e Radiação Solar.

De acordo com Macedo et al. (2018), a estimativa de ETo em Arcoverde é mais sensível a presença das variáveis de temperatura máxima, insolação e umidade relativa, mostrando que a características locais influenciam na determinação da ETo. Além disso, os autores também identificaram que o modelo de ETo(HS) apresentou superestimação da ETo em relação ao modelo padrão.

#### 5.1.5.2 Ibimirim

Analisando a ETo média diária, representado na Figura 15, percebe-se que o modelo padrão variou entre 4,06 e 6,77 mm/dia e os modelos ETo(RS) e ETo(JH) se ajustaram melhor ao padrão do que os demais, principalmente entre os meses de julho a agosto. O modelo ETo(HS) conseguiu representar bem a ETo, mas com valores abaixo do padrão. Por sua vez, os modelos ETo(MK) e ETo(H) tiveram valores abaixo do padrão, variando entre 2,73 e 4,51 mm/dia. Comportamento semelhantes dos modelos utilizados foram apresentados por Silva (2022).

Figura 15 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Ibimirim (SP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2008 a 2024.



Fonte: A autora (2025).

A Tabela 18 apresenta as métricas estatísticas para cada modelo estudado para a estação de Ibimirim.

Tabela 18 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Ibimirim (SP).

Métricas/Modelos	SEE	PBIAS (%)	EMA	R <sup>2</sup>	r	d	c	Desempenho
ETo(HS)	0,74	8,03	0,60	0,80	0,89	0,90	0,80	Muito Bom
ETo(RS)	0,67	-5,91	0,54	0,92	0,96	0,95	0,91	Ótimo
ETo(MK)	1,94	32,67	1,86	0,84	0,92	0,63	0,58	Sufrível
ETo(JH)	1,05	-12,88	0,86	0,85	0,92	0,88	0,81	Muito Bom
ETo(H)	2,34	38,13	2,17	0,58	0,76	0,52	0,40	Péssimo

Fonte: A autora (2025).

Assim como representado na Figura 15, os modelos ETo(RS), ETo(JH) e ETo(HS) se aproximaram mais do modelo padrão, mostrando melhores desempenhos, e os modelos ETo(MK) e ETo(H) se afastaram mais, tendo piores desempenhos. O SEE teve valores menores que 1 para ETo(HS) e ETo(RS), com o maior valor de 2,34 para ETo(H). Já o EMA apresentou valores inferiores a 1 para ETo(HS), ETo(RS) e ETo(JH) e valor mais alto de 2,17 para ETo(H). Os modelos com melhores desempenhos, o Pbias indicou leve superestimação ou subestimação, já para ETo(MK) e ETo(H), indica subestimação considerável. O R<sup>2</sup> variou entre 0,58 e 0,92, a correlação r foi muito alta para ETo(H) e quase perfeita para os demais. O índice d oscilou entre 0,52 e 0,95, resultando no índice c com valores entre 0,4 e 0,91,

levando ao desempenho ser classificado como ótimo para ETo(RS), muito bom para ETo(HS) e ETo(JH), sofrível para ETo(MK) e péssimo para ETo(H).

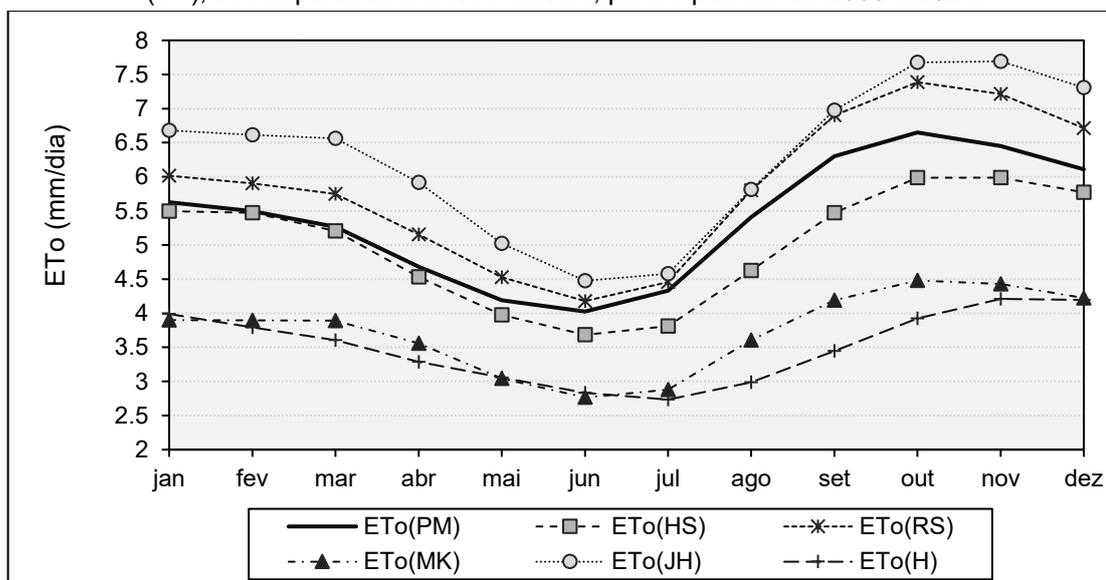
Os valores das correlações de Pearson corroboraram com os encontrados por Silva (2022), onde  $r$  variou entre 0,8 e 0,92 para os modelos de Hargreaves-Samani, Hamon, Jensen-Haise, Makkink e Radiação Solar. Além disso, o desempenho de Jensen-Haise e Hamon, classificados como Muito Bom e Péssimo, estão de acordo com os encontrados nessa pesquisa.

Ongaratto e Bortolin (2021) obtiveram resultados semelhantes para o modelo de Jensen-Haise, que foi classificado com “Muito bom” apresentando índice  $c$  com valor de 0,81 para o município São José dos Ausentes-RS.

#### 5.1.5.3 Serra talhada

A Figura 16 mostra o comportamento da ETo para a estação de Serra Talhada. Nessa estação, os modelos ETo(HS), ETo(RS) e ETo(JH) foram os que mais se aproximaram do modelo padrão de ETo(PM) e que conseguiram representar bem a sazonalidade da evapotranspiração. Por sua vez, ETo(MK) representa bem, mas apresentou valores médios muito abaixo de ETo(PM), e ETo(H) não consegue representar bem e possui valores abaixo do modelo padrão.

Figura 16 - Comportamento médio diário da evapotranspiração para o município de Serra Talhada (SP), obtida pelos diferentes modelos, para o período de 2008 a 2024.



Fonte: A autora (2025).

Na Tabela 19, tem-se os resultados das métricas estatísticas para a estação de Serra Talhada.

Tabela 19 - Desempenho dos modelos indiretos de evapotranspiração para Serra Talhada (SP).

Métricas/Modelos	SEE	PBIAS (%)	EMA	R <sup>2</sup>	r	d	c	Desempenho
ETo(HS)	0,72	6,95	0,57	0,75	0,86	0,89	0,77	Muito Bom
ETo(RS)	0,76	-8,39	0,62	0,91	0,96	0,93	0,89	Ótimo
ETo(MK)	1,70	30,35	1,62	0,83	0,91	0,66	0,60	Sofrível
ETo(JH)	1,18	-16,77	1,00	0,84	0,92	0,85	0,78	Muito Bom
ETo(H)	2,05	34,69	1,86	0,53	0,73	0,53	0,39	Péssimo

Fonte: A autora (2025).

No geral, o desempenho dos modelos foi semelhante ao da estação de Ibimirim, com os modelos de ETo(RS), ETo(JH) e ETo(HS) apresentando os melhores valores para todas as métricas, SEE entre 0,72 e 1,18, EMA entre 0,57 e 1, Pbias muito bom ou satisfatório, R<sup>2</sup>, r, d e c com valores iguais ou acima de 0,75. Já os modelos de ETo(MK) e ETo(H), mesmo com R<sup>2</sup> e r com valores acima de 0,5, apresentaram desempenhos sofrível e péssimo, respectivamente.

Rigoni et al. (2013) encontraram para o modelo de Hargreaves-Samani SEE de 0,917 mm/dia e Brixner et al. (2014) encontraram SEE=0,94 mm/dia para o modelo de Makkink. As correlações encontradas para ETo(MK) e ETo(JH) foram semelhantes às encontradas por Cunha et al. (2013), onde Makkink apresentou r=0,87 e Jensen-Haise apresentou r=0,9. Silva et al. (2021) obtiveram desempenhos semelhantes classificados como “muito bom” para os modelos de Hargreaves-Samani (R<sup>2</sup>=0,83, d=0,91, r=0,91, c=0,83) e Jensen-Haise (R<sup>2</sup>=0,81, d=0,92, r=0,9, c=0,82).

Sendo assim, para o SP, o modelo de Radiação Solar, seguido por Jensen-Haise e Hargreaves-Samani apresentaram os melhores desempenhos, sendo as opções mais confiáveis para a estimativa da ETo na mesorregião.

## 5.2 PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

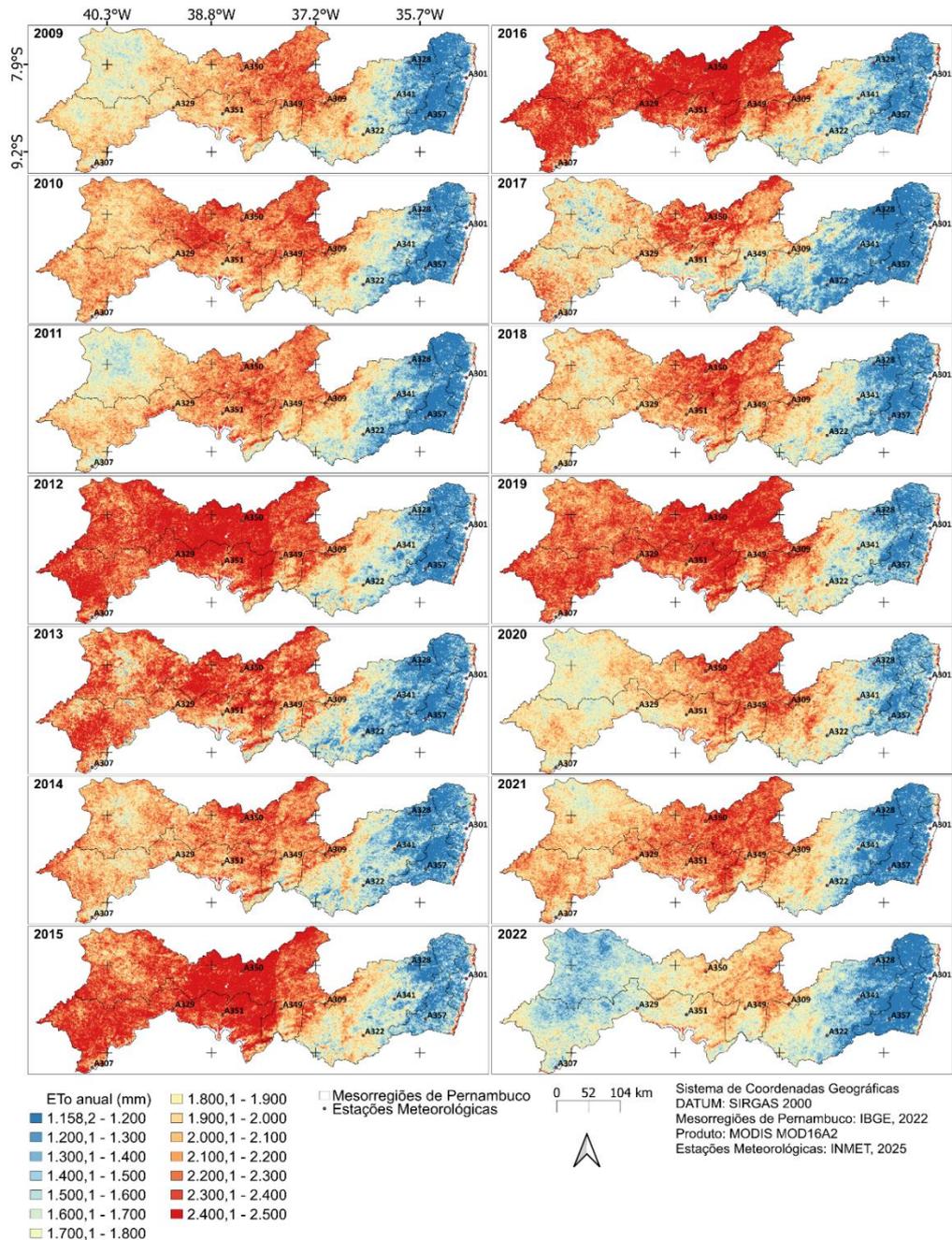
### 5.2.1 MOD16A2

#### 5.2.1.1 Versão 6

A Figura 17 apresenta a distribuição espacial da Evapotranspiração de Referência (ETo) anual estimada a partir do produto MOD16A2 para o estado de Pernambuco (PE), no período de 2009 a 2022. De forma geral, observa-se um padrão espacial bem definido de variação da ETo ao longo do Estado ao decorrer dos anos. As menores taxas de ETo concentram-se na porção leste, especialmente na

Metropolitana de Recife (MR) e parte da Mata Pernambucana (MP), enquanto os maiores valores ocorrem progressivamente no sentido oeste, abrangendo sobretudo o Sertão Pernambucano (SP), o São Francisco Pernambucano (SFP) e parte do Agreste Pernambucano (AP). Essa tendência está diretamente relacionada aos gradientes de precipitação, temperatura do ar, cobertura vegetal e disponibilidade hídrica, que variam conforme as mesorregiões.

Figura 17 – Distribuição espacial da ETo anual do produto MOD16A2 v6 em Pernambuco.



Fonte: A autora (2025).

Nas mesorregiões MR e MP, predominam os menores valores de ETo (valores chegando até 1700 mm/ano) com uma coloração azul nos mapas. A ETo estimada

pelo modelo padrão ETo(PM) atingiu o valor de 1683 mm em Recife e 1538 mm em Palmares, apresentando, no geral, valores superiores ao produto MOD16A2.

Por sua vez, verifica-se no Agreste Pernambucano (AP) uma transição gradual entre os baixos valores do litoral e os elevados valores do interior. Os valores de ETo são intermediários (entre 1313 e 2000 mm/ano), com significativa variabilidade interanual. A ETo estimada por ETo(PM) registrou totais anuais chegando a 1602 mm em Garanhuns, 1895 mm em Surubim e 1998 em Caruaru, com valor médio de 1831mm.

O Sertão é a região com as maiores taxas de ETo em todos os anos avaliados, com valores que frequentemente ultrapassam os 1900 mm/ano, chegando a mais de 2400 mm em alguns trechos, conforme indicado pelas cores vermelhas. A ETo de ETo(PM) apresentou valores dentro do mesmo intervalo categorizado pelos tons de azul e vermelho no mapa da Figura 17 para as mesorregiões do Sertão Pernambucano (SP) e São Francisco Pernambucano (SFP), com valores acima de 1400 mm e chegando a ultrapassar 2500 mm.

A análise temporal mostra que, embora o padrão espacial seja relativamente estável, há variações interanuais perceptíveis, detectando anos com eventos de seca mais severos, refletindo a influência de eventos climáticos (como El Niño e La Niña), possíveis mudanças no uso e ocupação do solo, e oscilações nas condições atmosféricas globais. Entre os anos de 2009 e 2011 exibem-se valores relativamente mais baixos de ETo, sugerindo condições climáticas mais amenas ou maior cobertura vegetal. Já os anos de 2012 e 2016 destacam-se como anos com ETo mais elevada em quase todo o Estado, especialmente no SP e no SFP. Esses anos coincidem com períodos de seca severa no Nordeste, o que aumenta a demanda evaporativa.

De acordo com o INMET (2022), os anos de 2015, 2016 e 2019 foram considerados os anos mais quentes desde 1961, onde teve contribuição do fenômeno El Niño, que causa o aquecimento das águas do Oceano Pacífico Equatorial. Já os anos de 2020 a 2022, apresentam um padrão intermediário, mas com tendência de aumento na ETo nas regiões centrais e oeste, possivelmente associado ao aumento das temperaturas e redução da umidade nos últimos anos. Contudo, o ano de 2021 teve taxas mais elevadas no período de 2020 a 2021, talvez o aumento seja decorrente desse ano ser considerado um dos sete anos mais quentes já registrados e que mesmo sob a influência do fenômeno La Niña, que causa o resfriamento

anômalo das águas do Oceano Pacífico Equatorial, o ano se manteve como um dos mais quentes (INMET, 2022).

A Tabela 20 a seguir apresenta as métricas estatísticas aplicadas para avaliar o desempenho do produto MOD16A2.

Tabela 20 - Desempenho do produto MOD16A2 versão 6.

Região	Estação	RMSE	PBIAS (%)	EMA	R <sup>2</sup>	r	d	c	Desempenho
MR	Recife	2,52	-48,42	2,27	0,19	0,43	0,38	0,16	Péssimo
MP	Palmares	2,14	-45,78	1,97	0,44	0,66	0,45	0,30	Péssimo
AP	Garanhuns	2,24	-49,90	2,05	0,45	0,67	0,53	0,35	Péssimo
	Caruaru	2,49	-48,67	2,28	0,30	0,55	0,47	0,26	Péssimo
	Surubim	1,80	-26,22	1,57	0,05	0,21	0,47	0,10	Péssimo
SFP	Petrolina	1,72	-25,47	1,53	0,59	0,77	0,63	0,48	Mau
	Cabrobó	1,96	-31,55	1,82	0,69	0,83	0,62	0,51	Sofrível
	Floresta	1,65	-26,20	1,57	0,80	0,90	0,67	0,60	Sofrível
SP	Serra Talhada	2,33	-40,71	2,18	0,42	0,65	0,47	0,30	Péssimo
	Ibimirim	1,28	-19,94	1,13	0,68	0,82	0,68	0,56	Sofrível
	Arcoverde	1,55	-24,86	1,32	0,48	0,69	0,59	0,41	Mau

Metropolitana do Recife (MR), Mata Pernambucana (MP), Agreste Pernambucano (AP), São Francisco Pernambucano (SFP), Sertão Pernambucano (SP).

Fonte: A autora (2025).

O produto MOD16A2 na versão 6 apresentou valores de RMSE menor que 2 nas estações localizadas nas mesorregiões do SP e SSF, exceto em Serra Talhada, e na estação de Surubim, no Agreste. O Pbias só foi considerado satisfatório (PBIAS<25%) para as estações de Ibimirim e Arcoverde, enquanto indicou superestimação considerável nas demais estações. Os menores valores de EMA foram obtidos principalmente no sertão, sendo Ibimirim e Arcoverde as estações com os melhores resultados. Os resultados obtidos condizem com Souza et al. (2016) quando obtiveram RMSE acima de 10 mm/8dias e Pbias chegando a -40,3% para uma cultura de Arroz Irrigado em Cachoeira do Sul – RS.

O coeficiente de determinação R<sup>2</sup> apresentou valores variando entre 0,05 e 0,8, tendo os maiores valores em estações do Sertão. A correlação de Pearson apresentou classificação muito alta (0,7 < r < ,9) para Petrolina, Cabrobó, Floresta e Ibimirim, classificação alta (0,5 < r < 0,7) para Palmares, Garanhuns, Caruaru, Serra Talhada e Arcoverde, classificação moderada (0,3 < r < 0,5) para Recife e baixa (0,1 < r < 0,3) para Surubim. O índice de concordância d apresentou seus valores variando entre 0,38 e 0,68, tendo os maiores registros no sertão. Por fim, o índice de desempenho c

obteve valor acima de 0,5 somente para Cabrobó, Floresta e Ibimirim, sendo classificado como desempenho sofrível, as demais estações tiveram seu desempenho entre mau ou péssimo.

Silva (2022) obteve melhores correlações para o produto MOD16A2 durante o período seco para os municípios de Floresta, Ibimirim e Serra Talhada, apresentando valores de  $r$  entre 0,58 e 0,91, pois durante o período chuvoso ou em regiões mais úmida, a presença de nuvens limita a disponibilidade de dados.

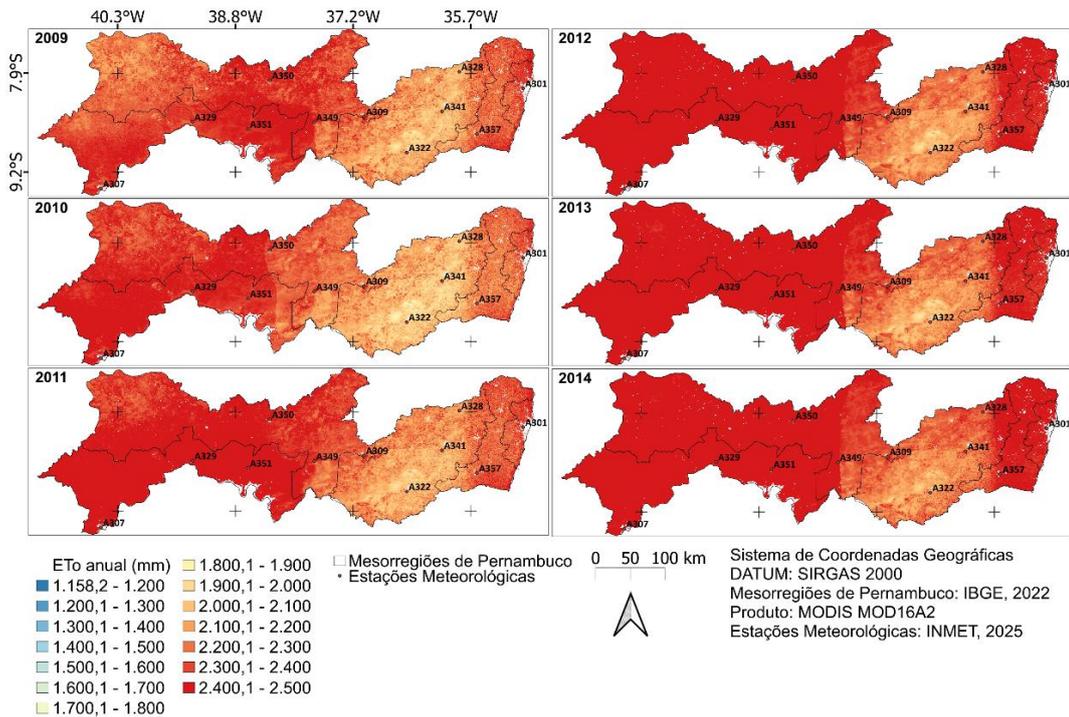
Andrade et al. (2022b) ao analisarem o produto MOD16A2 sobre a bacia do rio Paraibuna, localizada entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, identificaram a presença de manchas escuras referente a valores sem dados em todos os meses do período analisado (março de 2017 a março de 2018), cujo tamanho era maior nos meses de abril e fevereiro, indicando grande concentração de nuvens, nos demais meses a falha se concentrava sobre a área urbana. Srivastava et al. (2017) citaram que as limitações do sensor MODIS deve-se a cobertura das nuvens e do sombreamento das folhas.

Tito et al. (2021) obtiveram baixas correlações e alto erro para o produto MOD16A2, apresentando  $R^2=0,07$ , correlação de Pearson  $r=0,3$  e índice de concordância de Willmott  $d=0,67$ , para o Parque Nacional de Itatiaia (PNI), no Rio de Janeiro. Os valores de  $R^2$  e  $r$  obtidos para estação de Surubim são os que mais se aproximaram dos resultados apresentados por Tito et al. (2021).

#### 5.2.1.2 Versão 105

A Figura 18 mostra a variação espacial da Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>) do produto MOD16A2 da versão 105. Nota-se na imagem que o produto apresenta uma heterogeneidade espacial marcada ao longo dos anos, onde, assim como na Figura 17, as mesorregiões do SP e SFP possuem as maiores taxas anuais de ET<sub>o</sub>, mas com valores superiores aos da versão 6, apresentando o vermelho como a cor predominante. Tito et al. (2021) observou que o produto MOD16A2 seguiu a sazonalidade da evapotranspiração para a área do PNI, mesmo com o produto apresentando baixas correlações com a ET<sub>o</sub> estimada pelo modelo padrão de PM-FAO. Contudo, os autores destacaram a necessidade de ajustes e calibrações do produto.

Figura 18 - Distribuição espacial da ETo anual do produto MOD16A2 v105 em Pernambuco.



Fonte: A autora (2025).

Entre os anos de 2009 e 2011, a ETo apresentou valores moderados, oscilando entre 1800 e 2200 mm. Os anos de 2012 a 2014, incluídos no período com seca mais severa no Nordeste brasileiro, se destacam com taxas altas variando entre 1900 e 2200 mm no MR e MP, entre 1800 e 2100 mm no AP e de 2000 a 2500 mm no SP e SFP. Contudo, tais valores estão, em parte, acima da ETo estimada pelo modelo padrão, por exemplo, Cabrobó variou entre 2172 e 2364 mm, entre os anos de 2012 e 2014 pelo modelo ETo(PM), já o MOD16A2 variou entre 2638 e 2748 no mesmo período na coordenada da estação.

A seguir, na Tabela 21, tem-se o desempenho das métricas aplicadas para analisar o produto MOD16A2 na sua versão 105. Essa versão, assim como a versão 6 do MOD16A2, obteve melhor desempenho nas estações localizadas no SP e SFP. O RMSE teve valores entre 0,82 e 2,53, na qual a estação de Recife (RMSE=2,53) apresentou a maior dispersão dos dados e a estação de Arcoverde (RMSE=0,82) a menor. O mesmo comportamento é observado para o erro médio absoluto (EMA) que teve valores entre 0,69 e 2,44. O Pbias apresentou valores considerado bom (PBIAS<15%) para as estações de Petrolina, Cabrobó e Arcoverde, satisfatório (PBIAS<25%) para Surubim, Floresta e Ibimirim, e insatisfatório (PBIAS>25%) para as demais estações. Aguilar et al. (2018) apresentaram subestimações da evapotranspiração em cinco pontos que possuem vórtices turbulentos em zonas

áridas e semiáridas utilizadas para cultivo de trigo e arbustos. Ramoelo et al. (2014) e Du & Song (2018) também detectaram inconsistências e subestimações nos resultados obtidos pelo produto.

Tabela 21 - Desempenho do produto MOD16A2 versão 105.

Região	Estação	RMSE	PBIAS (%)	EMA	R <sup>2</sup>	r	d	c	Desempenho
MR	Recife	2,53	-56,51	2,44	0,42	0,65	0,39	0,25	Péssimo
MP	Palmares	2,08	-46,75	2,00	0,68	0,82	0,45	0,37	Péssimo
	Garanhuns	1,43	-29,27	1,25	0,63	0,79	0,64	0,51	Sofrível
AP	Caruaru	1,53	-31,45	1,44	0,63	0,79	0,56	0,45	Mau
	Surubim	1,22	-18,30	1,03	0,35	0,59	0,60	0,35	Péssimo
	Petrolina	1,02	-12,42	0,88	0,68	0,83	0,80	0,66	Bom
SFP	Cabrobó	0,98	-12,91	0,85	0,80	0,90	0,85	0,76	Muito Bom
	Floresta	1,23	-18,77	1,14	0,84	0,92	0,78	0,72	Bom
SP	Serra Talhada	1,70	-30,27	1,61	0,73	0,85	0,59	0,51	Sofrível
	Ibimirim	1,21	-19,38	1,10	0,75	0,87	0,72	0,62	Mediano
	Arcoverde	0,82	-11,14	0,69	0,82	0,91	0,85	0,77	Muito Bom

Metropolitana do Recife (MR), Mata Pernambucana (MP), Agreste Pernambucano (AP), São Francisco Pernambucano (SFP), Sertão Pernambucano (SP).

Fonte: A autora (2025).

O coeficiente R<sup>2</sup> apresentou valores acima de 0,6 para todas as estações, exceto para Recife e Surubim. Maior parte das estações obtiveram correlações classificadas como alta, muito alta ou quase perfeita. Portanto, o baixo desempenho em Recife e Surubim podem estar relacionadas a limitações do produto em áreas urbanas ou regiões com características microclimáticas específicas, que não são totalmente captadas pela resolução espacial do MODIS.

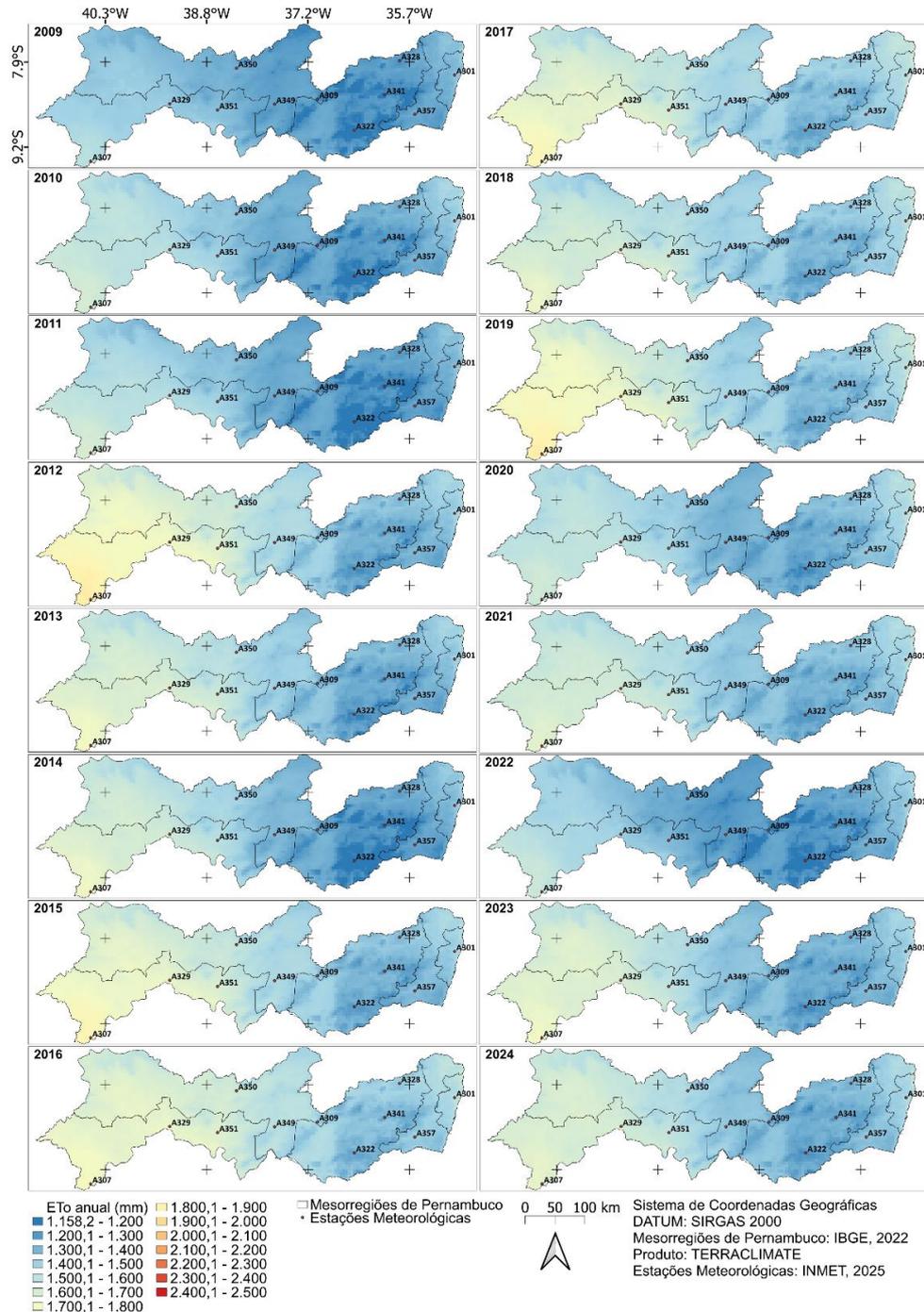
O índice de Willmott variou entre 0,39 e 0,85, apresentados valores acima de 0,8 para Petrolina, Cabrobó e Arcoverde. Por fim, o índice de desempenho indicou que as estações de Cabrobó e Arcoverde obtiveram desempenho muito bom, Petrolina e Floresta obtiveram desempenho bom, Ibimirim desempenho mediano, e demais estações entre “sofrível”, “mal” e “péssimo”.

## 5.2.2 TERRACLIMATE

A Figura 19 apresenta a variação espacial da ETo do produto TerraClimate. Percebe-se na imagem que apesar do TerraClimate possuir resolução espacial inferior ao produto MOD16A2, ele consegue representar a variação espacial da evapotranspiração existente no Estado, com base na comparação com a

especialização da ETo apresentada no Plano Nacional de Recursos Hídricos do Estado. Diferente da versão 105 do MOD16, o TerraClimate apresentou a cor azul predominante, por possuir valores de ETo menores.

Figura 19 - Distribuição espacial da ETo anual do produto TerraClimate em Pernambuco.



Fonte: A autora (2025).

O Sertão apresentou as maiores taxas anuais de ETo, principalmente no período de 2012 a 2019 e nos anos de 2023 e 2024, onde as mesorregiões voltaram a apresentar valores altos, em torno de 1700 mm. Além disso, os valores da ETo do

produto foram inferiores a 2000 mm, mas no Sertão a ETo estimada pelo modelo padrão ETo(PM) obteve taxas acima de 2000 mm, principalmente entre 2012 e 2019.

O AP teve sua transição climática bem representada, apresentando os menores valores, entre 1100 e 1500 mm, principalmente em regiões próximas a Garanhuns, que apresenta umidade relativa em torno de 80% e evapotranspiração em torno de 1158 mm (Seinfra, 2022).

A região metropolitana e a mata pernambucana teve ETo variando entre 1200 e 1600 mm ao decorrer dos anos. De acordo com o Plano Diretor de Recursos Hídricos (PDRH) do Estado, a evapotranspiração potencial pode variar entre 1500 e 1800 mm nessas mesorregiões, mas os valores da ETo do TerraClimate para as estações foram inferiores a 1500 em grande parte do período, exceto nos anos de 2017 e 2019, que a estação de Recife registrou valores acima de 1500.

Na Tabela 22, tem-se o desempenho das métricas estatísticas aplicadas para analisar o produto TerraClimate em cada estação meteorológica.

Tabela 22 - Desempenho do produto TerraClimate.

Região	Estação	RMSE	PBIAS (%)	EMA	R <sup>2</sup>	r	d	c	Desempenho
MR	Recife	0,70	11,45	0,57	0,65	0,81	0,78	0,63	Mediano
MP	Palmares	0,68	14,43	0,62	0,87	0,93	0,83	0,78	Muito Bom
AP	Garanhuns	1,00	19,43	0,83	0,80	0,90	0,76	0,68	Bom
	Caruaru	1,36	25,46	1,16	0,55	0,74	0,64	0,47	Mau
	Surubim	1,50	27,27	1,36	0,61	0,78	0,61	0,47	Mau
SFP	Petrolina	1,45	21,27	1,29	0,54	0,74	0,63	0,46	Mau
	Cabrobó	1,44	20,55	1,21	0,53	0,72	0,66	0,48	Mau
	Floresta	1,72	27,85	1,64	0,84	0,92	0,63	0,58	Sofrível
SP	Serra Talhada	1,45	25,87	1,38	0,77	0,88	0,65	0,57	Sofrível
	Ibimirim	1,91	32,64	1,85	0,81	0,90	0,58	0,52	Sofrível
	Arcoverde	1,61	29,31	1,52	0,89	0,94	0,65	0,61	Mediano

Metropolitana do Recife (MR), Mata Pernambucana (MP), Agreste Pernambucano (AP), São Francisco Pernambucano (SFP), Sertão Pernambucano (SP).

Fonte: A autora (2025).

A raiz quadrada do erro médio (RMSE) indicou que as estações de Recife, Palmares e Garanhuns tiveram as menores dispersões dos dados, com valores próximos ou inferiores a 1. O EMA apresentou comportamento semelhante para as mesmas estações, tendo a estação de Arcoverde o maior erro (EMA=1.52).

Todas as estações obtiveram o Pbias indicando subestimação dos dados ( $PBIAS > 0$ ), na qual recebe a classificação de “bom” ( $PBIAS < \pm 15$ ) para Recife e Palmares, “satisfatório” ( $PBIAS < \pm 25$ ) para Garanhuns, Petrolina e Cabrobó, e “insatisfatório” ( $PBIAS > \pm 25$ ) para as demais estações. Filgueiras et al. (2022) obteve Pbias de  $-11,90\%$  para a ETo do TerraClimate, indicando tendência de superestimação.

O coeficiente de determinação apresentou valores acima de 0,5 para todas as estações, já o coeficiente de correlação teve valores acima de 0,7, indicando correlação muito alta ou quase perfeita. Assim como o  $R^2$ , o índice c apresentou valores acima de 0,5 para todas as estações e o índice c indicou os melhores desempenhos para as estações de Palmares (desempenho muito bom), Garanhuns (desempenho bom), Recife e Arcoverde (desempenho mediano). Ruhoff et al. (2022) constataram que bacias hidrográficas tropicais e semiáridas, como as do São Francisco, Atlântico Nordeste, Paraná/Paraguai e Tocantins, que possuem forte sazonalidade pluviométrica, apresentam correlações que variam de moderada a forte.

Minuzzi e Turcato (2024) obtiveram desempenho “ótimo” para 11 das 19 estações em que ele validou a base, outras 7 estações apresentaram desempenho “muito bom” e apenas para 1 estação obteve desempenho “mediano”. Contudo, o estudo foi realizado no sul do Brasil, para os estados de Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul, cujos climas variam entre subtropical úmido com verão ameno e subtropical úmido com verão quente. De acordo com Abatzoglou et al. (2018), o TerraClimate não representa bem as variações climáticas locais de pequena escala que ocorrem em regiões montanhosas, áreas litorâneas e superfície heterogêneas.

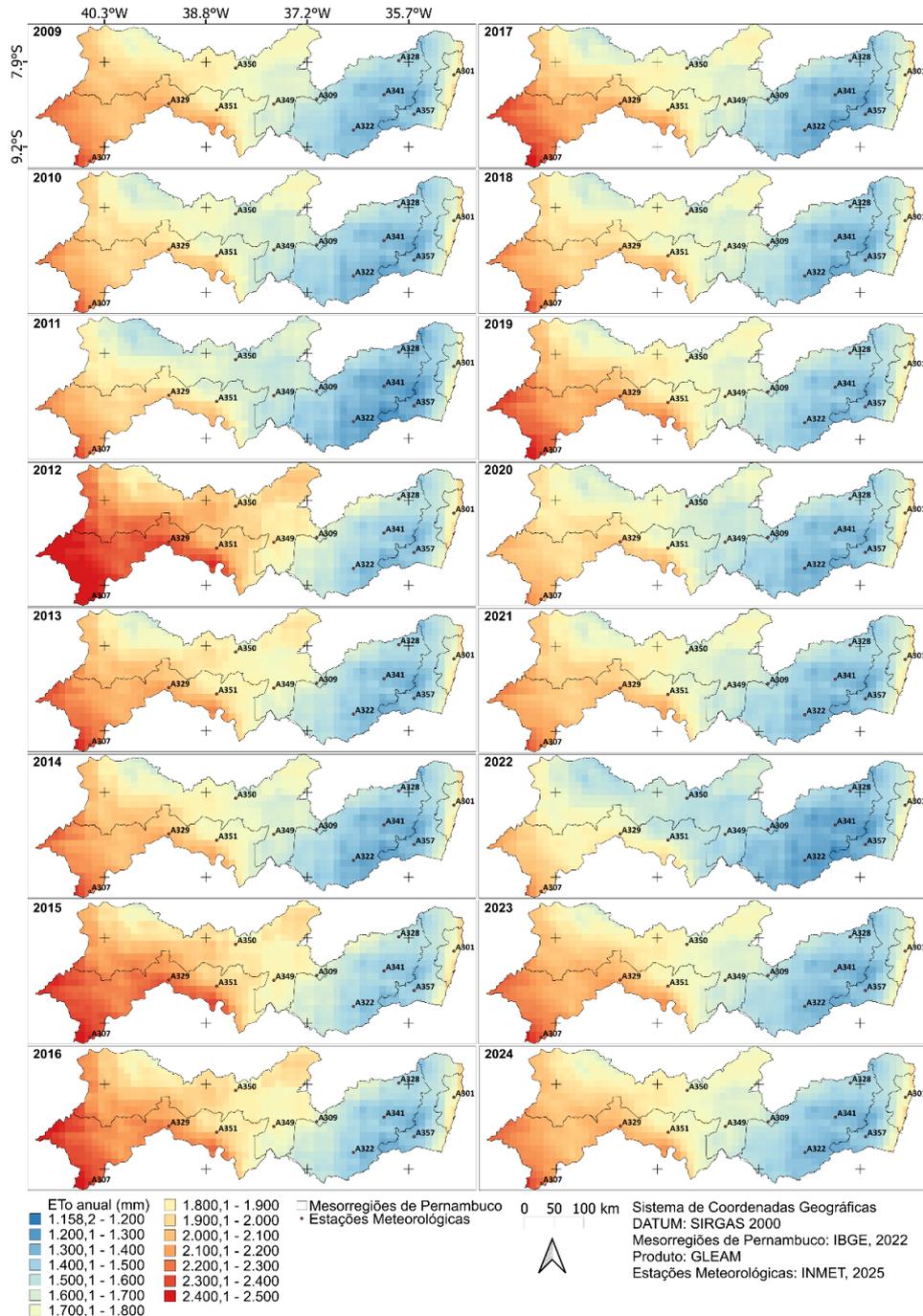
### 5.2.3 GLEAM

A evapotranspiração de referência do modelo europeu GLEAM apresentou uma distribuição espacial menos suavizada em comparação com os demais produtos citados anteriormente devido sua resolução temporal de  $0.1^\circ$ , que equivale a cerca de 10 km, conforme Figura 20.

A ETo apresentou maiores taxas anuais em todo o Estado no período de 2012 a 2019, sendo o Sertão Pernambucano (SP) e o São Francisco Pernambucano (SFP) as mesorregiões que obtiveram os maiores acumulados, principalmente no município de Petrolina, com valores chegando até 2272 mm. O Agreste Pernambucano (AP) registrou os menores valores, principalmente próximo os municípios de Garanhuns e

Caruaru, com valores oscilando entre 1200 e 1500 mm. Por fim, a Mata Pernambucana (MP) e a Metropolitana de Recife (MR) teve valores oscilando em torno de 1200 mm, em Palmares, e 1948 mm, em Recife.

Figura 20 - Distribuição espacial da ETo anual do modelo GLEAM em Pernambuco.



Fonte: A autora (2025).

Na Tabela 23 está presente o resultado das métricas estatísticas aplicadas para analisar o modelo GLEAM em cada estação.

Tabela 23 - Desempenho do produto GLEAM.

Região	Estação	RMSE	PBIAS (%)	EMA	R <sup>2</sup>	r	d	c	Desempenho
MR	Recife	0,54	-4,52	0,44	0,62	0,79	0,86	0,68	Bom
MP	Palmares	0,68	14,56	0,62	0,90	0,95	0,81	0,77	Muito Bom
	Garanhuns	0,70	12,59	0,57	0,85	0,92	0,88	0,81	Muito Bom
AP	Caruaru	1,15	18,52	0,96	0,49	0,70	0,70	0,49	Mau
	Surubim	1,09	19,21	0,97	0,75	0,87	0,73	0,63	Mediano
	Petrolina	0,72	-2,98	0,57	0,61	0,78	0,87	0,68	Bom
SFP	Cabrobó	0,73	-0,65	0,61	0,67	0,82	0,90	0,74	Bom
	Floresta	1,10	17,55	1,04	0,91	0,95	0,79	0,75	Bom
	Serra Talhada	0,74	12,77	0,69	0,91	0,96	0,87	0,83	Muito Bom
SP	Ibimirim	1,17	19,93	1,13	0,92	0,96	0,76	0,73	Bom
	Arcoverde	1,05	18,97	0,98	0,94	0,97	0,80	0,77	Muito Bom

Metropolitana do Recife (MR), Mata Pernambucana (MP), Agreste Pernambucano (AP), São Francisco Pernambucano (SFP), Sertão Pernambucano (SP).

Fonte: A autora (2025).

De maneira geral, as métricas indicaram que o modelo GLEAM teve um bom desempenho, exceto na estação de Caruaru, que o índice c foi classificado como “mau”, característicos de valores de c que estão entre 0,41 e 0,5, e para a estação de Surubim, que apresentou desempenho mediano.

As métricas RMSE e EMA resultaram em valores inferiores ou próximos de 1, indicando que o modelo possui pequena dispersão quando comparado com o modelo padrão de Penman-Monteith, sugerindo bom desempenho, pois quanto menor o valor desses erros, melhor.

O Pbias indicou leves superestimações em Recife, Petrolina e Cabrobó e nas demais indicou subestimação dos dados com valor considerado “bom” ( $\pm 10 < \text{PBIAS} < \pm 15$ ) para Palmares, Garanhuns e Serra Talhada, e “satisfatório” ( $\pm 15 < \text{PBIAS} < \pm 25$ ) para as demais estações. De acordo com Chagas et al. (2020), o GLEAM tende a superestimar ET na Amazônia e subestimar em áreas litorâneas.

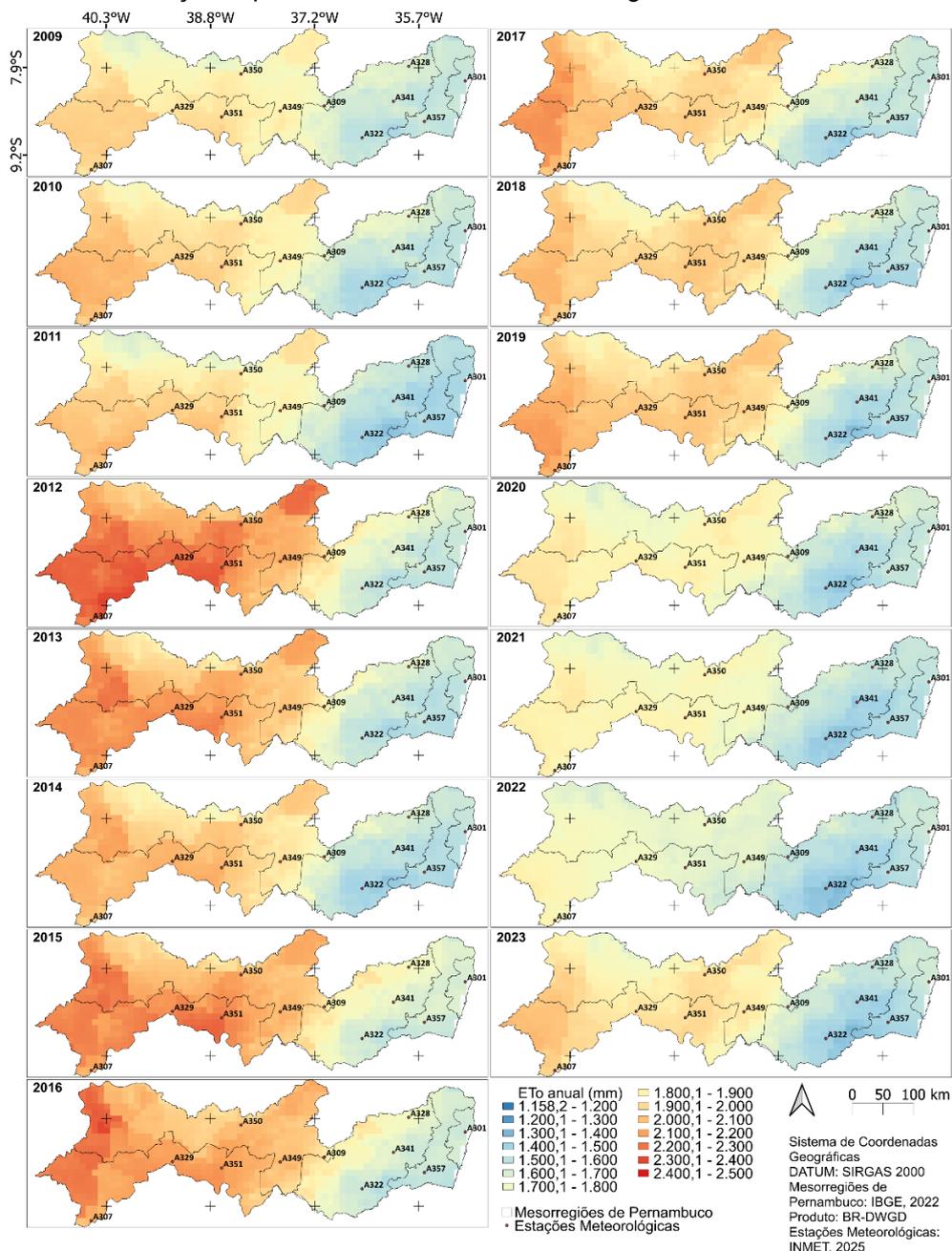
O R<sup>2</sup> apresentou valores acima de 0,6 para todas as estações, exceto para Caruaru que obteve R<sup>2</sup>=0,49. Já a correlação de Pearson e o índice de concordância apresentaram valores acima de 0,7 para todas as estações, cuja classificação r foi de muito alta a quase perfeita. Os resultados corroboraram com Moreira, Adamatti e Ruhoff (2018) que apresentaram correlação entre -0,08 e 0,91 e RMSE entre 0,29 e 0,81 para sítios de fluxos turbulentos do Programa LBA, conseguindo representar o comportamento das torres de fluxos turbulentos. Ruhoff et al. (2022) apresentaram

correlações para o GLEAM variando de forte a moderada para regiões de clima tropical e semiárido. Moreira et al. (2019) identificou que o modelo possui melhor desempenho em locais com pastagens, savana e floresta e menor desempenho em locais cobertos por lavouras e pastagens, localizados nos biomas Amazônia e Pampa.

## 5.2.4 BR-DWGD

A distribuição espacial da Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>) da base climática em grade BR-DWGD está representada na Figura 21.

Figura 21 - Distribuição espacial da ET<sub>o</sub> anual da base em grade BR-DWGD em Pernambuco.



Fonte: A autora (2025).

A base BR-DWGD destacou bastante o Sertão no período de 2012 a 2019, marcado por secas extremas, como já citado anteriormente, com valores partindo de 1800 mm e podendo chegar a valores acima de 2000 mm. Já entre 2020 e 2023, as taxas variam entre 1600 e 1900 mm.

O AP teve sua transição destacada, com menores valores, entre 1400 e 1600 mm, em torno de Garanhuns e Caruaru, mas chegando até 1800 mm em regiões próximas ao Sertão. Por fim, a MR e a MP tiveram a ETo oscilando em torno de 1400 e 1700 mm, chegando a registrar 1436 mm em Palmares e 1655 em Recife.

A seguir, a Tabela 24 traz o resultado das métricas estatísticas aplicadas para analisar o a base BR-DWGD em cada estação.

Tabela 24 - Desempenho da base BR-DWGD.

Região	Estação	RMSE	PBIAS (%)	EMA	R <sup>2</sup>	r	d	c	Desempenho
MR	Recife	0,50	4,74	0,37	0,71	0,84	0,90	0,76	Muito Bom
MP	Palmares	0,25	4,03	0,2	0,95	0,97	0,97	0,95	Ótimo
AP	Garanhuns	0,41	3,42	0,32	0,89	0,94	0,96	0,91	Ótimo
	Caruaru	0,57	6,69	0,45	0,81	0,90	0,92	0,83	Muito Bom
	Surubim	0,68	9,89	0,64	0,80	0,89	0,88	0,79	Muito Bom
SFP	Petrolina	0,68	8,00	0,55	0,78	0,89	0,89	0,78	Muito Bom
	Cabrobó	0,57	2,14	0,52	0,80	0,90	0,94	0,84	Muito Bom
	Floresta	0,51	7,14	0,43	0,93	0,97	0,95	0,92	Ótimo
SP	Serra Talhada	0,23	2,81	0,19	0,97	0,98	0,99	0,97	Ótimo
	Ibimirim	0,64	10,07	0,58	0,94	0,97	0,92	0,89	Ótimo
	Arcoverde	0,59	10,55	0,55	0,96	0,98	0,94	0,92	Ótimo

Metropolitana do Recife (MR), Mata Pernambucana (MP), Agreste Pernambucano (AP), São Francisco Pernambucano (SFP), Sertão Pernambucano (SP).

Fonte: A autora (2025).

Com base nos dados da Tabela 24, percebe-se que a base BR-DWGD apresentou excelente desempenho para todas as estações analisadas devido ao fator dela ser oriunda de interpolação de dados observados.

Tanto o RMSE, quanto o EMA, apresentaram valores inferiores a 1 e próximos de zero. O Pbias indicou leve subestimações para todas as estações, sendo os maiores valores obtidos para Ibimirim e Arcoverde. O R<sup>2</sup> apresentou valores acima de 0,7 para todas as estações, assim como a correlação de Pearson e índice d de Willmott, que teve valores acima de 0,8, resultando em desempenhos que variam entre muito bom e ótimo.

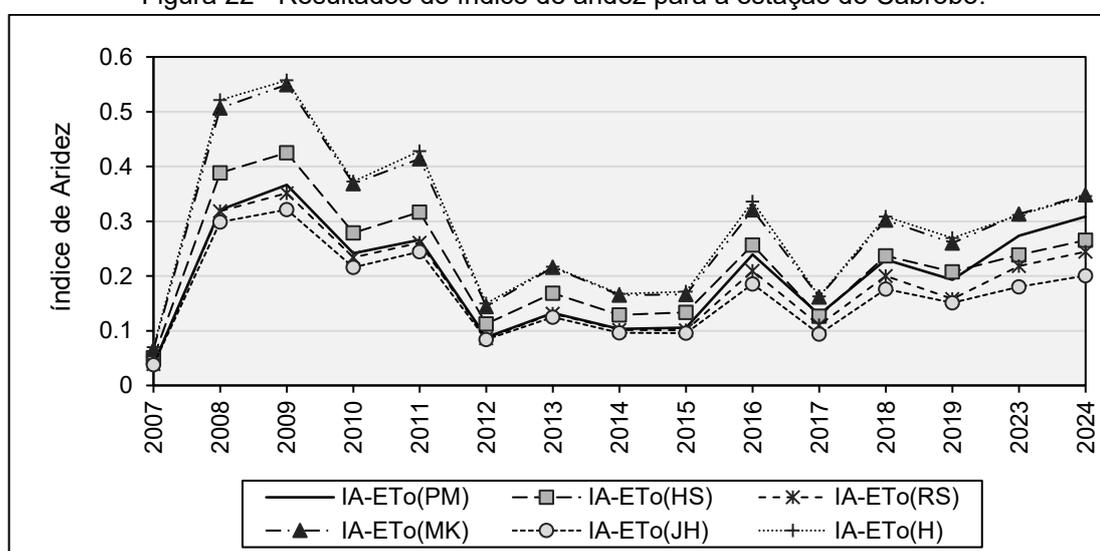
Devido ao bom desempenho das suas variáveis climáticas, o BR-DWGD tem sido usado como fonte de dados base em diferentes pesquisas. Silvar Junior et al. (2017) utilizaram as variáveis do DWGD para estimar a ETo por diferentes modelos indiretos. Polasky et al. (2025) utilizaram a base como fonte de dados observacionais para avaliar a tendência de precipitação gerada por bases globais na Amazônia. Luiz-Silva et al. (2025) utilizaram os dados de precipitação e temperatura para analisar a climatologia da Amazônia a partir da determinação de índices climáticos associados a essas variáveis. Barbosa, Buriti e Kumar (2024) utilizaram a base para desenvolver uma rede neural que detecta secas repentinas no Nordeste brasileiro. Por sua vez, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) utilizaram dados da base para determinar e avaliar o índice de aridez em todo o Brasil.

Com base nesses resultados é possível concluir que a base BR-DWGD representa uma alternativa confiável para estudos climáticos regionais, especialmente em áreas com baixa densidade de estações meteorológicas. Seu bom desempenho na estimativa da ETo, aliado à alta correlação com dados observacionais e baixos erros estatísticos, reforça sua aplicabilidade em análises hidrológicas, estudos de monitoramento da seca e avaliações agroclimáticas.

### 5.3 ÍNDICE DE ARIDEZ (IA)

O índice de aridez (IA) calculado para os dados de ETo e precipitação da estação de Cabrobó estão presentes na Figura 22.

Figura 22 - Resultados do índice de aridez para a estação de Cabrobó.



Fonte: A autora (2025).

Nota-se que os valores de IA obtidos através do uso da ETo estimada pelos modelos de Hamon e Makkink são superiores ao obtido com uso da ETo(PM) em todos os anos. Já os índices obtidos através dos demais modelos indiretos possuem valores próximos ao de ETo(PM). De modo geral, os valores do índice de aridez variaram entre 0 e 0,6, o que indica que a demanda atmosférica por água supera a quantidade de precipitação registrada no período.

A Tabela 25 apresenta a classificação do IA quanto a suscetibilidade a desertificação e quanto a classificação do clima.

Tabela 25 - Classificação do Índice de Aridez através da ETo(PM).

<b>Ano</b>	<b>Índice de Aridez (IA)</b>	<b>Suscetibilidade a desertificação</b>	<b>Classificação climática</b>
2007	0.038605	Muito alta	Hiperárido
2008	0.320637	Alta	Semiárido
2009	0.366326	Alta	Semiárido
2010	0.241275	Alta	Semiárido
2011	0.265629	Alta	Semiárido
2012	0.087787	Muito alta	Árido
2013	0.132407	Muito alta	Árido
2014	0.103341	Muito alta	Árido
2015	0.105523	Muito alta	Árido
2016	0.239256	Alta	Semiárido
2017	0.129356	Muito alta	Árido
2018	0.229711	Alta	Semiárido
2019	0.192794	Muito alta	Árido
2023	0.273229	Alta	Semiárido
2024	0.308241	Alta	Semiárido

Fonte: A autora (2025).

De acordo com a Tabela 25, quanto a classificação em relação a suscetibilidade a desertificação, o IA apresentou suscetibilidade muito alta nos anos de 2007, 2012 a 2015, 2017 e 2019. A suscetibilidade é alta nos anos de 2008 a 2011, 2016, 2018 e 2023 a 2024.

Quanto a classificação do clima, o ano de 2007 foi considerado “Hiperárido”, de 2008 a 2011, 2016, 2018 e 2023 a 2024 foi classificado como “Semiárido” e de 2012 a 2015, 2017 e 2019, foi considerado “Árido”. De acordo com Lopes e Soares (2016), o IA de Cabrobó é de 0,31, considerado como clima Semiárido. Percebe-se na Figura 22 que o índice variou de 0,04 a 0,37. Santos, Leal e Taura (2016)

encontraram o IA de 0,38 para Cabrobó, possuindo como classificação climática o semiárido e suscetibilidade à desertificação alta.

Os valores de IA com os dados de ETo estimados pelo modelo de Radiação Solar, que apresentou melhor desempenho nas mesorregiões analisadas, obtiveram classificações iguais ao da Tabela 25, exceto para os anos de 2016 e 2018, que foram classificadas com suscetibilidade a desertificação muito alta e clima árido. Essa diferença na classificação pode ser resultante da existência de falhas nos dados que reduziram os acumulados de precipitação e evapotranspiração para esses anos.

Além disso, entre 2012 e 2015, período marcado por eventos extremos de seca, o IA apresentou valores entre 0,08 e 0,24, indicando tendência de desertificação muito alta e clima classificado como árido. O valor do IA correspondente ao acumulado de chuva e precipitação para o período de 2007 a 2024 foi de 0,2, indicando clima árido, estando de acordo com o estudo do Cemaden e INPE (2023), que identificou pela primeira vez a ocorrência do clima árido no País, na qual foi detectado a presença de uma área árida ao norte da Bahia, próximo ao núcleo de desertificação de Cabrobó, e outra próximo a Petrolina-PE. O estudo constatou um aumento do índice de aridez em todo país e crescimento de regiões semiáridas com taxa de 75 mil km<sup>2</sup> por década. Essas mudanças são decorrentes do aumento da evapotranspiração associado as altas temperaturas observadas no período.

Lopes e Leal (2015) observaram redução de 0,45 para 0,35 no índice de aridez em Cabrobó no período de 1990 a 2014. De acordo com os autores, a redução do IA em regiões onde a classificação semiárida já foi delimitada precisa ser estudada para determinar quais são as influências humanas que estão acontecendo na região. Conforme representado na Figura 22, o IA apresentou queda até 2014, mas a partir de 2015 voltou a aumentar.

Os resultados evidenciam que a variabilidade do índice de aridez (IA) em Cabrobó, ao longo do período analisado, reflete tanto as oscilações climáticas naturais quanto possíveis interferências antrópicas na dinâmica hídrica regional. Além disso, a escolha do método de estimativa da ETo influencia diretamente a classificação do índice. Considerando que Cabrobó integra um dos Núcleos de Desertificação, onde políticas públicas e recursos específicos são direcionados, uma classificação incorreta pode comprometer a definição de prioridades e a efetividade das ações de mitigação e adaptação.

## 6 CONCLUSÕES

A presente dissertação permitiu uma análise abrangente do desempenho de modelos empíricos e produtos de Sensoriamento Remoto na estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) em diferentes contextos climáticos do estado de Pernambuco. Os resultados evidenciaram uma marcante variabilidade espacial e temporal da ET<sub>o</sub>, influenciada por variáveis como altitude, temperatura, umidade relativa e regime pluviométrico regional e uso e ocupação do solo.

Dentre os modelos indiretos, o de Radiação Solar (RS) destacou-se pelo desempenho consistente e elevado em diversas estações, apresentando alta correlação com o modelo padrão PM-FAO56 e desempenho variando entre muito bom e ótimo. Os modelos de Hargreaves-Samani e Jensen-Haise também demonstraram bons resultados em regiões específicas, mostrando-se promissores para aplicações em áreas com dados meteorológicos limitados. Em contrapartida, o modelo de Hamon revelou desempenho inferior em todas as regiões analisadas, com tendência à subestimação da ET<sub>o</sub> e elevada dispersão estatística, indicando baixa confiabilidade.

No que se refere aos produtos de Sensoriamento Remoto e em grade, a base BR-DWGD apresentou o melhor desempenho geral, com alta concordância em praticamente todas as mesorregiões, resultado atribuído à sua natureza baseada em dados observacionais interpolados. O GLEAM e o TerraClimate demonstraram bom desempenho em algumas regiões, mas apresentaram limitações pontuais. Já o produto MOD16A2 mostrou desempenho discrepante entre suas versões, sendo que a versão 6 apresentou resultados insatisfatórios especialmente na Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife, possivelmente devido à sua menor representatividade frente às condições microclimáticas dessas regiões.

Dessa forma, conclui-se que a escolha do modelo, base ou produto para estimativa da ET<sub>o</sub> deve ser realizada com base nas particularidades climáticas e disponibilidade de dados de cada localidade. A integração entre modelos empíricos robustos e produtos remotos validados pode oferecer soluções viáveis e eficazes para o monitoramento climático, a gestão de recursos hídricos e o planejamento agrícola, especialmente em contextos semiáridos.

Além disso, os resultados obtidos em Cabrobó, com base na aplicação do índice de aridez, reforçam a relevância da ET<sub>o</sub> como parâmetro-chave na avaliação da suscetibilidade à desertificação e detecção de secas. A sobreposição dos modelos

demonstrou que a escolha inadequada da equação pode afetar significativamente a classificação climática regional, impactando diretamente políticas públicas de adaptação e mitigação às mudanças climáticas.

Portanto, a pesquisa evidenciou que o modelo de Radiação Solar é confiável para a estimativa da ETo em todas as mesorregiões do Estado. A base BR-DWGD destacou-se como alternativa consistente para a obtenção da variável, enquanto, entre os produtos de sensoriamento remoto, o GLEAM mostrou maior potencial de aplicação no Estado.

Recomenda-se, a continuidade de estudos voltados à calibração regional dos modelos empíricos e à validação constante de novos produtos orbitais, contribuindo para o avanço do conhecimento e da gestão integrada dos recursos hídricos no Semiárido brasileiro.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J., DOBROWSKI, S. Z., PARKS, S. A.; HEGEWISCH, K. C. TerraClimate, a high- resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Sci Data** **5**,170191, 2018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- AGUILAR, A., FLORES, H., CRESPO, G., MARÍN, M., CAMPOS, I., & CALERA, A. Performance assessment of MOD16 in evapotranspiration evaluation in Northwestern Mexico. **Water**, 10(7), 901, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10070901>.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998.
- ALVALÁ, R. C. S.; CUNHA, A. P. M. A.; BRITO, S. S. B. B; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. A.; MORAES, O. L. L.; CARVALHO, M. A. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, 91 (Suppl. 1), 2017.
- ANDRADE, J.M.; RIBEIRO NETO, A.; BEZERRA, U.A.; MORAES, A.C.C.; MONTENEGRO, S.M.G.L. A comprehensive assessment of precipitation products: temporal and spatial analyses over terrestrial biomes in Northeastern Brazil. **Remote Sensing Applications-Society And Environment**, v. 28, p. 100842, 2022a.
- 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**. in: HOTT, M. C.; ANDRADE, R. G.; MAGALHAES JUNIOR, W. C. P. de (org.). *Geotecnologias: aplicações na cadeia produtiva do leite*. Ponta Grossa: Atena, 2022b.
- ANDRADE, R. G.; HOTT, M. C.; MAGALHÃES JUNIOR, W. C. P.; RIBEIRO, C. B. DE M. Análise espaço-temporal da evapotranspiração na bacia do rio Paraibuna usando o produto MOD16. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 3(4), 3406–3416, 2020. <https://doi.org/10.34188/bjaerv3n4-050>
- ANDRADE, A. R. S.; GODOY NETO, A. H.; CRUZ, A. F. DA S.; ANDRADE, E. K. P.; SANTOS, V. F. DOS; SILVA, T. N. P. Geoestatística aplicada à variabilidade espacial e padrões nas séries temporais da precipitação no Agreste pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, V. 03 N. 01, 2018, 126-145.
- ARAGHI, A.; MARTINEZ, C.J.; ADAMOWSKI, J.F. Avaliação de dados em grade do TerraClimate em diversos climas no Irã. **Earth Sci Inform**, 16, 1347–1358 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12145-023-00967-z>.
- ARAGHI, A.; DACCACHE, A. Remote sensing and TerraClimate datasets for wheat yield prediction using machine learning. **Smart Agricultural Technology**, volume 11, 2025,100909, ISSN 2772-3755. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100909>.
- ARAÚJO, G. L.; REIS, E. F.; MARTINS, C. A. S.; BARBOSA, V. S.; RODRIGUES, R. R. Desempenho comparativo de métodos para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>). **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 5, n. 2, p. 84-95, 2011.

ARRAES, F. D. D.; LIMA JUNIOR, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; MACEDO, K. G.; COURAS, Y. S.; OLIVEIRA, W. C. Parametrização da Equação de Hargreaves-Samani para o Estado do Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v.10, nº.1, p. 410 - 419, 2016.

APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Atlas climatológico do Estado de Pernambuco: normais climatológicas 1991-2020**. 2023. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/images/webAtlas-Climatologico-do-Estado-de-Pernambuco-APAC.pdf>. Acesso em: 19 mai 2025.

APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Atlas de Bacias Hidrográficas de Pernambuco**. Recife/PE. 2022. Disponível em: <https://geoportal.apac.pe.gov.br/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=7486c16fb79545f0be0dd7152c0592a6>. Acesso em: 19 mai 2025.

BARBOSA, H. A.; BURITI, C. O.; KUMAR, T. V. L. Deep Learning for Flash Drought Detection: A Case Study in Northeastern Brazil. **Atmosphere**, 15(7), 761, 2024. <https://doi.org/10.3390/atmos15070761>

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.

BHATTARAI, N.; SHAW, S. B.; Quackenbush, L. J.; Im, J.; Niraula, R. Evaluating five remote sensing based single-source surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in a humid subtropical climate. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, volume 49, 2016, pages 75-86, ISSN 1569-8432. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.01.010>.

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; ANJOS, R. J.; SILVA, T. J. A.; LIMA, J. R. S.; ANDRADE, C. L. T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.4, p.380–390, 2012.

BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p.293–300, 2007.

BRIXNER, G. F.; SCHÖFFEL, E. R.; TONIETTO, J. Determinação da evapotranspiração por diferentes métodos e sua aplicação no Índice de seca na Campanha Gaúcha, Brasil. **Rev. Bras. Frutic.**, v. 36, n. 4, p. 780–793, dez. 2014. DOI: 10.1590/0100-2945-381/13.

CABRAL JÚNIOR, J. B.; SILVA, C. M. S.; ALMEIDA, H. A. Comparação mensal, sazonal e anual de métodos de estimativas da evapotranspiração de referência para Juazeiro-BA e Petrolina-PE. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 3, n. 2, p. 23–42, 2017. DOI: 10.21680/2447-3359.2017v3n2ID12448.

CARLETON COLLEGE. Evapotranspiration and Crop Water Use. Disponível em: <[https://serc.carleton.edu/integrate/teaching\\_materials/food\\_supply/student\\_materials/1091](https://serc.carleton.edu/integrate/teaching_materials/food_supply/student_materials/1091)>

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**, Santa Maria, v. 05, 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.

CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais – MCTI. Estudo do CEMADEN e do INPE identifica pela primeira vez a ocorrência de uma região árida no país. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/estudo-do-cemaden-e-do-inpe-identifica-pela-primeira-vez-a-ocorrencia-de-uma-regiao-arida-no-pais>. Acesso em: 15 jul 2025.

CHAGAS, V. B. P., CHAFFE, P. L. B., ADDOR, N., FAN, F. M., FLEISCHMANN, A. S., PAIVA, R. C. D., AND SIQUEIRA, V. A. CAMELS-BR: hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil. **Earth Syst. Sci. Data**, 12, 2075–2096, <https://doi.org/10.5194/essd-12-2075-2020>, 2020.

CHAI, T.; DRAXLER, R.R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? - Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 3, p. 1247-1250, 2014.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2013.

COUTINHO, E. R.; MADEIRA, J. G. F.; SILVA, R. M.; OLIVEIRA, E. M.; DELGADO, A. R. S. Avaliação de Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>) Diária Para Regiões dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 4, 649 657, 2020.

CUNHA, P. C. R.; NASCIMENTO, J. L.; SILVEIRA, P. M.; ALVES JR., J. Eficiência de métodos para o cálculo de coeficientes do tanque classe A na estimativa da evapotranspiração de referência. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 2, p. 114-122, 2013.

DEGANO, M. F.; RIVAS, R. E.; CARMONA, F.; NICLÒS, R.; SÁNCHEZ, J. M. Evaluation of the MOD16A2 evapotranspiration product in an agricultural area of Argentina, the Pampas region. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, volume 24, Issue 2, 2021, pages 319-328, ISSN 1110-9823. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.08.004>.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirements. Rome: FAO, 1977. (Irrigation and drainage paper, 24).

DU, J., & SONG, K. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data from Panjin coastal wetland, Northeast China. **Chinese Geographical Science**, 28-3,420–429, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11769-018-0960-8>.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.; AMORIM, A. O. Evapotranspiração: uma revisão sobre os métodos empíricos. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2010. 44 p.

FILGUEIRAS, R.; VENANCIO, L. P.; ALEMAN, C. C.; CUNHA, F. F. Comparison and calibration of terraclimate climatological variables over the Brazilian territory. **Journal of South American Earth Sciences**, volume 117, 2022,103882, ISSN 0895-9811. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103882>.

FREITAS, P. A. S.; OLIVEIRA, L. M. M.; BARBOSA, R. F. S.; URSULINO, B. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Evapotranspiração de referência diária por diferentes modelos na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe (Pernambuco – Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.4, n.1. 035-045, 2018.

GANGOPADHYAYA, M.; URYVAEV, V. A.; OMAR, M. H., NORDENSON, T. J.; HARBECK, G. E. 1966. Measurement and estimation of evapotranspiration. Geneva: **World Meteorological Organization**. (WMO Technical Note, 83).

GOMES, V.K.I., DA SILVA, A.S.A., ARAÚJO, L.D.S. E STOSIC, T. Análise de Chuvas Extremas em Pernambuco, Nordeste do Brasil, Usando um Conjunto de Dados em Grade de Alta Resolução. **Int J Climatol**, 44: 5693-5710, 2024. <https://doi.org/10.1002/joc.8686>.

GONÇALVES JÚNIOR, A. S.; FERNANDES, G. S. T.; LIMA, E. A.; MOURA NETO, A.; SILVA, R. O.; RODRIGUES, L. S.; LOPES, J. R. A.; SILVA, L. L. S.; AZEVEDO, I. M. B. Análise interdecadal do desempenho de métodos de estimativa de evapotranspiração de referência em Bom Jesus/PI. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, e86111637821, 2022.

GUEDES, J.; SILVA, S. M. P. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação: princípios físicos, sensores e métodos. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v.12, n.29, 2018. Pp.127-144.

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 Engeneering*, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e Estados. 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe.html>. Acesso em: 31 jul. 2025.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. BDia - Banco de Dados e Informações Ambientais. 2023. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#!/consulta/vegetacao>. Acesso em: 31 jul. 2025.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. INMET aponta que a última década foi a mais quente no Brasil. 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/inmet->

aponta-que-a-%C3%BAltima-d%C3%A9cada-foi-a-mais-quente-no-brasil. Acesso em: 31 jul. 2025.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: **American Society of Civil Engineers**, 1990. 332p.

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.

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2007.

KHAN, M. S.; LIAQAT, U. W.; BAIK, J.; CHOI, M. Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, volume 252, 2018, pages 256-268, ISSN 0168-1923. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.022>.

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

LEMENKOVA, P. Mapping Climate Parameters over the Territory of Botswana Using GMT and Gridded Surface Data from TerraClimate. **ISPRS Int. J. Geo-Inf.**, 2022, 11, 473. <https://doi.org/10.3390/ijgi11090473>

LEMENKOVA, P. Console-Based Mapping of Mongolia Using GMT Cartographic Scripting Toolset for Processing TerraClimate Data. **Geosciences**, 2022b, 12, 140. <https://doi.org/10.3390/geosciences12030140>

LIMA, R. G. S. **Análise da evolução temporal da região semiárida brasileira a partir de base de dados espacializada em alta resolução**. 2025. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2025.

LIMA JUNIOR, J. C. Evapotranspiração de referência no semiárido brasileiro, análise de modelos, sensibilidade e tendência dos elementos climáticos. 2022. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

LOPES, I.; LEAL, B. G. Índice de aridez e tendência a desertificação para estações meteorológicas nos estados da Bahia e Pernambuco. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 11, Vol. 17, 2015.

LOPES SOBRINHO, O. P.; CASTRO JÚNIOR, W. L.; CIPRIANO, D. A.; CANTANHEDE, E. K. P. Métodos empíricos de estimativa da evapotranspiração de referência para Codó, Maranhão, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 34, n. 20, p. 1–12, 2024.

LOPES, L. S. O.; SOARES, R. C. Suscetibilidade à desertificação das terras secas de Gilbués (estado do Piauí) e Cabrobó (estado do Pernambuco), nordeste do Brasil. **Revista Geográfica de América Central**, 2016, 1(56), 307-323. ISSN: 1011-484X.

LUIZ-SILVA, W., BAZZANELA, A. C. F., DERECZYNSKI, C. P., OSCAR-JÚNIOR, A. C., & RAUPP, I. P. Temperature and Precipitation Extremes in the Brazilian Legal

Amazon: A Summary of Climatological Patterns and Detected Trends. **Atmosphere**, 16(2), 222, 2025. <https://doi.org/10.3390/atmos16020222>

MACÊDO, K. G.; ARRAES, F. D. D.; OLIVEIRA, J. B.; TORRES, W. L. V.; COURAS, Y. S. Desenvolvimento e ajuste de equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência no estado de Pernambuco. **Irriga**, Botucatu, v. 23, n. 1, p. 1-16, 2018.

MAKKINK, G.F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. **J. Inst. Water Engng.** 11 (3): 277-288, 1957.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALÁ, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, 90 (2 Suppl. 1), 1973–1985, 2017.

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.

MATALLO JÚNIOR, H e SCHENKEL, C. S. (Org). **Desertificação**. Brasília: UNESCO, 2003.

MEDEIROS, R. M. O balanço hídrico e o aquecimento no município de Caruaru – PE, Brasil. **Revista Equador**, v. 7, n. 2, p. 126–146, 2018.

MEDEIROS, R. M.; HOLANDA, R. M.; FRANÇA, M. V.; SABOYA, L. M. F.; ROLIM NETO, F. C.; ARAÚJO, W. R. Espacialização pelo modelo da krigagem nas variabilidades pluvial, evapotranspiração e evaporação no estado do Pernambuco – Brasil. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**, v.2, n.8, 2021.

MEINHARDT, J. C. **Estimativa da evapotranspiração de referência e sua influência no balanço hídrico climatológico normal, sequencial e de cultivo**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, 2023.

MINUZZI, R. B.; TURCATO, T. Avaliação da evapotranspiração de referência mensal fornecida pelo TerraClimate para a região sul do Brasil. **Open Science Research XIV**, ISBN 978-65-5360-559-6 - Vol. XIV - Ano 2024.

MIRALLES, D. G.; HOLMES, T. R. H.; DE JEU, R. A. M.; GASH, J. H.; MEESTERS, A. G. C. A.; DOLMAN, A. J. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 453–469, 2011. DOI:10.5194/hess-15-453-2011.

MIRALLES, D.G.; BONTE, O.; KOPPA, A.; BAEZ-VILLANUEVA, O.M.; TRONQUO, E.; ZHONG, F.; BECK, H.E.; HULSMAN, P.; DORIGO, W.A.; VERHOEST, N.E.C.; HAGHDOOST, S. GLEAM4: global land evaporation and soil moisture dataset at 0.1° resolution from 1980 to near present. **Scientific Data**, 12, 416, 2025.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil / MMA, Secretaria de Recursos Hídricos, Universidade Federal da Paraíba; Marcos Oliveira Santana, organizador. Brasília: MMA, 2007.

MORAES, R. G. S.; LIMA, E. F.; OLIVEIRA, P. L. S.; DAMASCENA, J. F.; SILVA, C. M. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência no período seco e chuvoso em Imperatriz, MA. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v. 33, n. 19, p. 169–188, 2023. DOI: 10.55761/abclima.v33i19.16162.

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.

MOREIRA, A. A.; RUHOFF, A. L.; ROBERTI, D. R.; SOUZA, V. A.; ROCHA, H. R.; PAIVA, R. C. D. Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America. **Journal of Hydrology**, volume 575, 2019, pg 131-147, ISSN 0022-1694. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.021>.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

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, p. 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.; ZHAO, M.; STEVEN, W. Running and Numerical Terradynamic Simulation Group (2014): MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product MOD16A2 Collection 5.

NASCIMENTO, I. R. S.; SOUZA, F. M. C.; RODRIGUES, E. N. S.; BORGES, P. F.; ARAÚJO, L. S. Estimativa da evapotranspiração de referência por diferentes métodos para o município de Caruaru –PE. **Revista Interdisciplinar e do Meio Ambiente**, v.1, n.1, 2019, e10.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AZEVEDO, J. R. G.; SANTOS, F. X. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro e métodos indiretos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, n.1, p.58-67, jan.-mar., 2008.

OLIVEIRA, W. K. M. **Sensoriamento remoto orbital na estimativa de evapotranspiração em sistema de pivô central**. 2022. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

ONGARATTO, J. M.; BORTOLIN, T. A. Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de referência no município de São José dos Ausentes (RS), Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 5, p. 979–987, set./out. 2021. DOI: 10.1590/S1413 415220190196.

PEDREIRA JUNIOR, A.L.; BIUDES, M.S.; MACHADO, N.G.; VOURLITIS, G.L.; GELI, H.M.E.; SANTOS, L.O.F.; QUERINO, C.A.S.; IVO, I.O.; LOTUFO NETO, N. (2021).

Assessment of Remote Sensing and Re-Analysis Estimates of Regional Precipitation over Mato Grosso, Brazil. **Water**, 13, 333, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13030333>.

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

PENMAN, H.L. The physical bases of irrigation control. *Hort. Congr.*, 2, London, Royal Horticultural Society, 1953, p.913-924. 11p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. Evapo(transpi) razão. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

POLASKY, A.; SAPKOTA, V.; FLOREST, C.E; FUENTES, J. D. Discrepancies in precipitation trends between observational and reanalysis datasets in the Amazon Basin. **Sci Rep** 15, 7268, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87418-5>

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.

RAMOELO, A., MAJOZI, N., MATHIEU, R., JOVANOVIĆ, N., NICKLESS, A., & DZIKITI, S. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African savanna, South Africa. **Remote Sensing**, 6(8), 7406–7423, 2014. <https://doi.org/10.3390/rs6087406>.

ROSA, G. B.; FUZZO, D. F. S.; FISCHER FILHO, J. A. Modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região sul do Triângulo Mineiro, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v. 33, n. 19, p. 81–97, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v33i19.16965>.

ROSSI, J. B. **Representação de eventos de secas no Brasil por produtos de sensoriamento remoto**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

RIBEIRO, E. P.; NASCIMENTO, G. V. S. Características climáticas e regime hídrico da microrregião de Recife, Pernambuco. **Revista Equador (UFPI)**, Vol. 9, Nº 3, p.158 – 177, 2020.

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.

RIZWAN, M.; LI, X.; CHEN, Y.; ANJUM, L.; HAMID, S.; YAMIN, M.; MEHMOOD, Q. Simulating future flood risks under climate change in the source region of the Indus River. **J. Flood Risk Manag.** 2023, 16, e12857.

RUHOFF, A.; DE ANDRADE, B.C.; LAIPELT, L.; FLEISCHMANN, A.S.; SIQUEIRA, V.A.; MOREIRA, A.A.; BARBEDO, R.; CYGANOSKI, G.L.; FERNANDEZ, G.M.R.; BRÊDA, J.P.L.F.; PAIVA, R. C. D. D., MELLER, A., TEIXEIRA, A. D. A., ARAÚJO, A. A., FÜCKNER, M. A.; BIGGS, T. Global Evapotranspiration Datasets Assessment Using Water Balance in South America. **Remote Sens**, 2022, 14, 2526. <https://doi.org/10.3390/rs14112526>

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

RUNNING, S., MU, Q.; ZHAO, M. MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, 2017b. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>

RUNNING, S., MU, Q.; ZHAO, M. MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, 2021a. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.061>

RUNNING, S.; MU, Q., ZHAO, M.; MORENO, A. MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, 2021b. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2GF.061>

SANTOS, R. D. S.; SOUZA, M. H. C.; BISPO, R. 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, p. 31-39, 2017.

SANTOS, S. M. dos; LEAL, B. G.; TAURA, T. A. Determinação da suscetibilidade climática à desertificação para os municípios baianos de Juazeiro, Casa Nova Sobradinho e Curaçá. **OKARA: Geografia em debate**, v. 10, n. 1, p. 171-184, 2016.

SEINFRA. Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos. Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco: atlas das bacias hidrográficas de Pernambuco. / Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos. Secretaria Executiva de Recursos Hídricos. – Recife: Seinfra, 2022.

SILVA, H. C. D.; TAVARES SILVA, M.; ARAÚJO SILVA, M. M. M.; ROCHA JUNIOR, C. A. N. Comparação entre métodos de estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>) na região de Petrolina-PE. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 36 Ed. Especial II, p. 456–461, 2014.

SILVA, A. O.; FRANÇA E SILVA, E. F.; MOURA, G. B. A.; LOPES, P. M. O. Avaliação do desempenho de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial para a região norte de Recife-PE. **Engenharia na agricultura**, Viçosa - MG, v.20 n.2, 2012.

SILVA, A. O.; MOURA, G. B. A.; FRANÇA E SILVA, E. F.; LOPES, P. M. O.; DA SILVA, A. P. N. Análise espaço-temporal da evapotranspiração de referência sob diferentes regimes de precipitações em Pernambuco. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 2, p. 135-142, abr.-jun., 2011.

SILVA, J. G. (2022). **Desempenho de modelos indiretos de estimativa de evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) e comparação georreferenciada com dados orbitais em Pernambuco** (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/49138>.

SILVA, J. L. B., BEZERRA, A. C., ALMEIDA, C.D.C., LIMA, D. F., ANDRADE, F. H. N., JIMÉNEZ, K.J. Comparison of the Reference Evapotranspiration among Empirical Methods and Penman-Monteith in Semiarid Region of Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.14, n.01, 2021, 001-015.

SILVA JUNIOR, R. O. D., SOUZA, E. B. D., TAVARES, A. L., MOTA, J. A., FERREIRA, D. B. S., SOUZA-FILHO, P. W. M., & ROCHA, E. J. P. D. Three decades of reference evapotranspiration estimates for a tropical watershed in the eastern Amazon. **Anais Da Academia Brasileira De Ciências**, 89(3), 1985–2002, 2017. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170147>.

SILVA, M. G. Estimativa da evapotranspiração de referência padrão (Penman-Monteith FAO 56): Uma abordagem com dados meteorológicos limitados. **Nativa**, Sinop, v.4, n.4, p.253-260, 2016.

SILVA, F. J.; SALES, A.; BARBOSA, H. A. S.; ALMEIDA, B. B. R.; CARNEIRO, L. H. Impacts of climate change on the hydrology of the semi-arid region of Pernambuco: Scenarios and perspectives for the Terra Nova Basin-PE. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing** 12, 2022, 175-183.

SHAMIR, E.; MENDOZA FIERRO, L.; MOHSENZADEH KARIMI, S.; PELAK, N.; TAROUILLY, E.; CHANG, H.-I.; CASTRO, C.L. Climate Change Projections of Potential Evapotranspiration for the North American Monsoon Region. **Hydrology**, 2024, 11, 83. <https://doi.org/10.3390/hydrology11060083>

SOUZA, T. S.; EICHENBERGER, A. M. R.; NASCIMENTO, P. S. Estudo comparativo de diferentes metodologias na determinação da evapotranspiração de referência em Feira de Santana – BA.

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 v.38 Ed. Especial-IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 2016, p. 270 – 276.

SRIVASTAVA, A.; SAHOO, B.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. Evaluation of Variable-Infiltration Capacity Model Evapotranspiration Estimates in a River Basin with Tropical Monsoon-Type Climatology. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, n. Icid, 2017.

STADLER, S. J. Aridity Indexes, I n The Encyclopedia of Climatology, p. 102–107, Edited by J. E. Oliver and R. W. Fairbridge, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1987, ISBN 0-87933-009-0.

SUDENE-Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Delimitação do semiárido brasileiro: critérios técnicos e resultados do estudo de atualização. Recife: Sudene, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiaridorelatorionv.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2025

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, jan.-mar., 2010.

Tanuja, R. K. Climatic shifts in the Beas Basin: A spatio-temporal analysis of time series of temperature and precipitation of TerraClimate dataset. **Science of The Total Environment**, volume 984, 2025, 179712, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179712>.

TAVARES, P. S.; PILOTTO, I. L.; CHOU, S. C.; SOUZA, S. A.; FONSECA, L. M. G.; CHAGAS, D. J. Um conjunto de dados de projeções de mudanças climáticas de alta resolução para a América do Sul com correção de viés. **Derbyana**, v. 45, 2024. DOI: 10.69469/derb.v45.821.

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.

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

TOREZZAN, C.; SOARES, C. F.; FRANÇA, B. B. N.; COLTRI, P. P.; LIMA, E. E. C.; XAVIER, A. C.; NICHI, J.; CHARLES, C. M.; ALVARADO, N. R. G.; SALES, S. F.; MOTTA, G. M.; ANDRADE, M. A.; RISSO, M. S.; PEREIRA, M. R. A.; TORRES, G. A. L.; HYSLOP, K.; SILVA, D. O.; AWE, O. D.; ARANTES, C. S.; ANDRADE JÚNIOR, V. L.; PACAGNELLA, R. C. Climaterra: a decade of daily data on births, deaths, pollution and climate variables for all municipalities in Brazil. **Data in Brief**, 2025, 111920, ISSN 2352-3409. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111920>.

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.

TURCO, J. E. P. Evapotranspiração de referência pelas equações de hargreaves em clima tropical. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.14, nº.4, p. 4106 – 4117, 2020.

VALE, B. S.; ROIG, H. L.; NEUMANN, M. R. B.; FERNANDES, E. S.; SALLES, L. A.; CASARI, R. A. C. N.; OLIVETTI, D.; MALTA, E. A. Desempenho dos Modelos SEBAL e SSEBop na Estimativa da Evapotranspiração do Trigo no Cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 37(3), 329–345, 2022. <https://doi.org/10.1590/0102-77863730031>

VIEIRA, G. H. S.; FELISBERTO, R. T.; NANDORF, R. J.; LO MONACO, P. A. V.; CHAMBELA NETO, A.; GARCIA, A. D. B. Evapotranspiração de referência sazonal simplificada para o oeste baiano (BA) e região de Piracicaba (SP), Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, MS, v. 33, 2023, ISSN 2237-8642.

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. I.], v. 10, n. 17, 2021.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *International Journal of Climatology*, p.1-15, 2022. DOI: 10.1002/joc.7731.

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.