



REGIONALIZAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E REAL PARA O ESTADO DE ALAGOAS, NORDESTE DO BRASIL

*Regionalization of reference and real evapotranspiration for
the state of Alagoas, northeastern Brazil*

*Regionalización de la evapotranspiración de referencia y real
del estado de Alagoas, nordeste de Brasil*

Lucas de Moraes Teixeira  

Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

lucas.teixeira@igdema.ufal.br

Helder José Farias da Silva  

Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

helder.silva@icat.ufal.br

Ana Paula Lopes da Silva  

Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

ana.lopes@igdema.ufal.br

Fabrício Daniel dos Santos Silva  

Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

fabricio.santos@icat.ufal.br

Daniele Tôrres Rodrigues  

Universidade Federal do Piauí (UFPI)

msp dany@ufpi.edu.br

Jean Souza dos Reis  

Instituto Gonçalo Moniz, Fundação Oswaldo Cruz

jean.reis@fiocruz.br

Jório Bezerra Cabral Júnior  

Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

jorio.cabral@igdema.ufal.br

Resumo: A evapotranspiração de referência (ET_0) refere-se à demanda de água da atmosfera baseando-se numa superfície padronizada (sem restrição hídrica) e a evapotranspiração real (ETr) é a perda de água para a atmosfera que realmente ocorre. O objetivo deste trabalho é regionalizar e analisar as variabilidades temporal e espacial da ET_0 e ETr para o estado de Alagoas. Foram utilizados dados mensais de ET_0 (1961 a 2019) e ETr do produto MOD16 (2001 a 2020). De posse dos dados, foram aplicadas análises estatísticas descritivas, multivariadas (análise de *Cluster* e *Silhouette*) e Geoestatística (IDW - Inverse Distance Weighting), respectivamente, para caracterização, identificação de áreas homogêneas e interpolação para representação espacial. Entre os principais resultados, destacam-se que as variações da ETr são maiores que a ET_0 . Delimitou-se nesta pesquisa 4 sub-regiões para ET_0 e ETr, denominadas de S1, S2, S3 e S4. A ET_0 é maior na porção oeste do estado de Alagoas (S4) e os valores decrescem em direção a porção leste (S1). Em contrapartida, para ETr, ocorre o oposto. O período de maior ET_0 ocorre entre outubro e março, enquanto os menores valores são registrados entre junho e julho, ou seja, em função da disponibilidade de energia. A ETr é, em média, maior no período chuvoso (julho) e menor no período seco (dezembro). As variações da ETr estão associadas a fatores como a distribuição desigual de umidade no solo e as condições climáticas locais (principalmente associadas à distribuição das chuvas). Conclui-se que essas informações são essenciais para a gestão sustentável dos recursos hídricos e o planejamento agrícola, especialmente em ambientes semiáridos.

Palavras-chave: Evaporação e transpiração. Variabilidade climática. Análise de Cluster. Sensoriamento remoto. Recurso hídrico.

Abstract: Reference evapotranspiration (ET_0) refers to the atmospheric water demand based on a standardized surface (without water restrictions) and actual evapotranspiration (ETr) is the water loss to the atmosphere that actually occurs. The objective of this work is to regionalize and analyze the temporal and spatial variabilities of ET_0 and ETr for the state of Alagoas. Monthly ET_0 data (1961 to 2019) and ETr data from the MOD16 product (2001 to 2020) were used. Using the data, descriptive statistical, multivariate (Cluster and Silhouette analysis) and Geostatistical (IDW - Inverse Distance Weighting) analyses were applied, respectively, for characterization, identification of homogeneous areas and interpolation for spatial representation. Among the main results, it is worth highlighting that the variations in ETr are greater than ET_0 . This study defined four subregions for ET_0 and ETr, called S1, S2, S3 and S4. ET_0 is higher in the western portion of the state of Alagoas (S4) and values decrease towards the eastern portion (S1). On the other hand, the opposite occurs for ETr. The period of highest ET_0 occurs between October and March, while the lowest values are recorded between June and July, that is, depending on the availability of energy. ETr is, on average, higher in the rainy season (July) and lower in the dry season (December). Variations in ETr are associated with factors such as uneven distribution of moisture in the soil and local climate conditions (mainly associated with rainfall distribution). It is concluded that this information is essential for the sustainable management of water resources and agricultural planning, especially in semiarid environments.

Keywords: Evaporation and transpiration. Climate variability. Cluster analysis. Remote sensing. Water resources.

Resumen: La evapotranspiración de referencia (ET_0) se refiere a la demanda de agua de la atmósfera en base a una superficie estandarizada (sin restricciones hídricas) y la evapotranspiración real (ETr) es la pérdida de agua a la atmósfera que realmente se produce. El objetivo de este trabajo es regionalizar y analizar la variabilidad temporal y espacial de ET_0 y ETr para el estado de Alagoas. Se utilizaron datos mensuales de ET_0 (1961 a 2019) y datos de ETr del producto MOD16 (2001 a 2020). Con los datos en mano, se aplicaron análisis estadísticos descriptivos, multivariados (análisis de Cluster y Silhouette) y Geoestadísticos (IDW - Inverse Distance Weighting), respectivamente, para caracterización, identificación de áreas homogéneas y interpolación para representación espacial. Entre los principales resultados, destaca que las variaciones de ETr son mayores que la ET_0 . Esta investigación definió cuatro subregiones para ET_0 y ETr, llamadas S1, S2, S3 y S4. ET_0 es mayor en la porción occidental del estado de Alagoas (S4) y los valores disminuyen hacia la porción oriental (S1). Por otro lado, lo contrario ocurre para ETr. El período de mayor ET_0 ocurre entre octubre y marzo, mientras que los valores más bajos se registran entre junio y julio, es decir, dependiendo de la disponibilidad de energía. ETr es, en promedio, mayor en la temporada lluviosa (Julio) y menor en la temporada seca (Diciembre). Las variaciones de ETr están asociadas a factores como la distribución desigual de humedad en el suelo y las condiciones climáticas locales (principalmente asociadas a la distribución de las lluvias). Se concluye que esta información es esencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos y el planeamiento agrícola, especialmente en entornos semidesérticos.

identificación de áreas homogéneas e interpolación para representación espacial. Entre los principales resultados se destaca que las variaciones de ETr son mayores que ET₀. En esta investigación se delimitaron 4 subregiones para ET₀ y ETr, denominadas S1, S2, S3 y S4. La ET₀ es mayor en la porción occidental del estado de Alagoas (S4) y los valores disminuyen hacia la porción oriental (S1). Por el contrario, para ETr ocurre lo contrario. El periodo de mayor ET₀ se da entre octubre y marzo, mientras que los valores más bajos se registran entre junio y julio. La ETr es, en promedio, mayor en la estación lluviosa (julio) y menor en la estación seca (diciembre). Las variaciones en la ETr están asociadas con factores como la distribución desigual de la humedad en el suelo y las condiciones climáticas locales. Se concluye que esta información es fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos y la planificación agrícola, especialmente en ambientes semiáridos.

Palabras clave: Evaporación y transpiración. Variabilidad climática. Análisis de conglomerados. Teledetección. Recurso hídrico.

Submetido em: 06/09/2024

Aceito para publicação em: 04/06/2025

Publicado em: 03/07/2025

1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) é a perda de água para a atmosfera, resultante da soma da evaporação da água e da transpiração das plantas (superfície vegetada) (Miralles *et al.*, 2020). Este processo desempenha um papel crucial na caracterização do ciclo hidrológico e em estudos agrícolas e ambientais, uma vez que retorna até dois terços da precipitação terrestre para a atmosfera (Silva *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2019).

A estimativa e medição da ET são tarefas desafiadoras e complexas devido às diferentes abordagens necessárias para cada tipo de superfície e região geográfica (Carvalho *et al.*, 2011). As características climáticas de uma região, incluindo os padrões de chuva e temperatura, influenciam significativamente o balanço hídrico e os processos de evapotranspiração (Mokhtar *et al.*, 2018). No entanto, a distribuição desigual das estações meteorológicas representa desafios na obtenção de dados confiáveis para análises abrangentes (Souza *et al.*, 2020).

Um dos métodos mais aceitos mundialmente com resultados satisfatórios é o método Penman-Monteith que é estimada de acordo com os procedimentos propostos por Allen *et al.*, (1998). Tal método utilizado por dois tipos de evapotranspiração utilizados nessa pesquisa: evapotranspiração de referência (ET_0) e evapotranspiração real (ETr).

A ET_0 possui grande importância no conhecimento sobre a disponibilidade de água no solo, pois indica o potencial que uma superfície possui para perder água para a atmosfera. De acordo com Pereira *et al.* (2007), ET_0 que é a quantidade de água que seria utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, e sem restrição hídrica.

A ETr é definida como a quantidade de água realmente utilizada por uma superfície vegetada extensa com grama, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo, podendo haver ou não restrição hídrica (Pereira *et al.*, 2007). O sensoriamento remoto (SR) tem se mostrado fundamental para fornecer estimativas mais precisas e detalhadas da ETr em grandes áreas a custos reduzidos (Zhang, Kimball, Running, 2016).

O estudo da ET é um importante parâmetro pois pode culminar na intensificação de secas (déficit hídrico). Projeções climáticas para este século, feitas por Marengo e Bernasconi (2015), sugerem aumento espacial da seca no Nordeste do Brasil (NEB), com intensificação de

déficits de água e secas mais prolongadas, com condições áridas para a região a partir da segunda metade do século 21.

Cunha *et al.* (2015) analisaram as características espaciais e temporais da seca sobre a vegetação na região semiárida do Brasil, através de SR, e encontraram que durante um grande evento de seca (2012 a 2013), aproximadamente 85% da região foi afetada, atingindo cerca de 1300 municípios e afetando cerca de 10 milhões de pessoas.

Impactos antropogênicos podem se estender a áreas maiores, dependendo da escala regional modificada. Por exemplo, a substituição da vegetação natural do bioma Caatinga pela agropecuária em Petrolina-PE impulsionou alterações microclimáticas significativas (Cunha *et al.*, 2013). Na Mata Atlântica, observa-se uma significativa variabilidade na magnitude dos valores de precipitação devido à dinâmica da distribuição da sua vegetação, com apenas 12,4% da área original ainda preservada (Ávila, 2014; Fundação SOS Mata Atlântica; INPE, 2022).

Alagoas é territorialmente um dos menores estados do Brasil, entretanto, a variabilidade temporal e espacial da ET₀ e ETr e suas relações com sua superfície ainda não são totalmente conhecidas. Diante disso, o objetivo deste trabalho é analisar as variabilidades temporal e espacial da evapotranspiração de referência e real para o estado de Alagoas. Essas informações são úteis no desenvolvimento de estratégias de gestão sustentável dos recursos hídricos e no planejamento eficaz das atividades agrícolas e ambientais, sobretudo em ambientes semiáridos, onde a água é naturalmente escassa.

2. MATERIAL E MÉTODOS

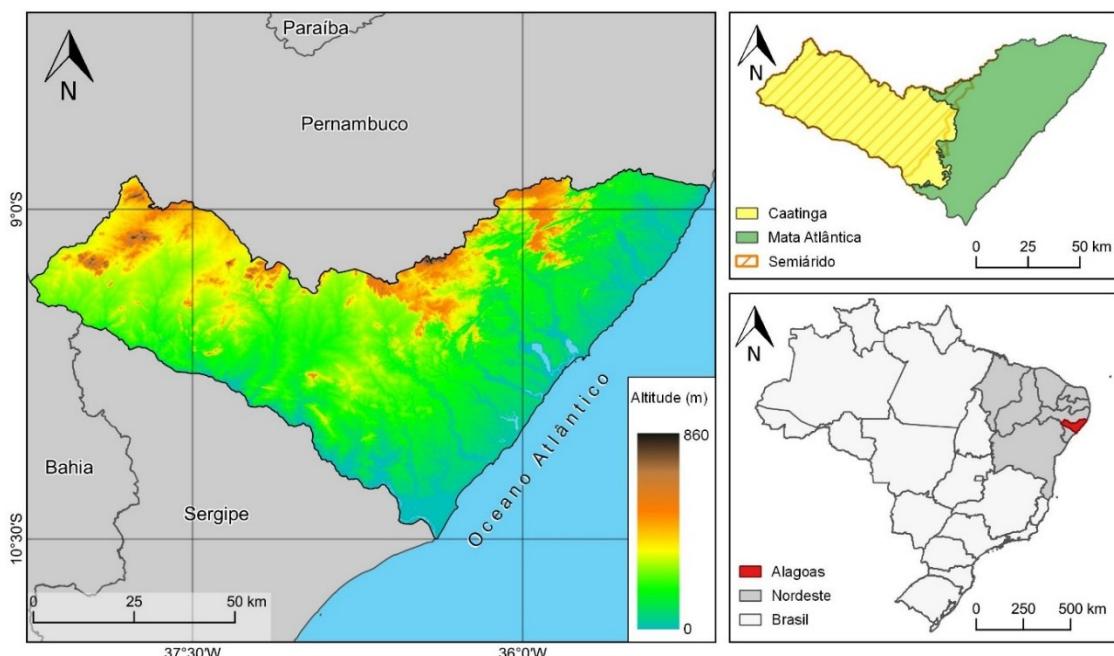
2.1. Área de estudo

O estado de Alagoas, localizado na região do NEB (Figura 1), apresenta uma área de 27.830 km² (IBGE, 2021). É territorialmente um dos menores estados do Brasil, entretanto apresenta dois tipos de Clima (Alvares *et al.*, 2013): Tropical e Semiárido. Isso repercute em características ambientais distintas, dentre elas os tipos de vegetação (Caatinga e Mata Atlântica) e de disponibilidade hídrica (Cabral Júnior; Silva, 2020).

Regiões mais ao oeste apresenta temperaturas superiores a 28°C no verão e média anual de 26,3°C, e regiões com maiores altitudes apresentam menores temperaturas

predominantemente ao norte do estado – na divisa de Pernambuco – nas margens do Planalto da Borborema (Monteiro; Côrrea, 2020; Silva *et al.*, 2023).

Figura 1 -Mapa de localização do estado de Alagoas, com destaque as delimitações dos biomas, semiárido, e sua altimetria.



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

2.2. Dados de evapotranspiração de referência

Os dados mensais da ET_0 , utilizados nesta pesquisa, foram obtidos a partir do banco de dados públicos de Xavier *et al.* (2022) desenvolvido e validado pelos autores para ampliar e melhorar a distribuição temporal e espacial de dados meteorológicos no Brasil. O banco integra informações de instituições como a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), apresentando resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ e série temporal de 1961 a 2019.

2.3. Dados de evapotranspiração real

Os dados de evapotranspiração real (ET_r) foram extraídos do Produto de Evapotranspiração Global - MOD16 (Mu *et al.*, 2011). Este produto de sensoriamento remoto fornece informações sobre a evapotranspiração real e potencial, entre outros parâmetros, com base na lógica da equação de Penman-Monteith, utilizando uma grade regular de 500

metros. O algoritmo, descrito detalhadamente por Mu *et al.* (2011), disponibiliza dados com resolução de 500 metros para evapotranspiração (real e potencial), além do fluxo de calor latente (real e potencial), com acumulados para intervalos de 8 dias, em escalas mensal e anual. Para este estudo, o período analisado compreendeu os anos de 2001 a 2020.

2.4. Análises estatísticas

De posse dos dados foram realizadas as estatísticas descritivas da ET_0 e ETr e representadas/analisadas espacialmente e temporalmente, assim como representadas através de mapas.

Em seguida aplicou-se a estatística multivariada denominada de análise de agrupamento (Cluster) para verificar áreas com características homogêneas, por variáveis (ET_0 e ETr). Esse método parte do pressuposto de que elementos da amostra ou população em grupos, sejam identificados de forma que os elementos pertencentes a um mesmo grupo sejam similares entre si, expressando as variáveis envolvidas (Mingoti, 2005). A similaridade entre os grupos foi obtida utilizando o método da distância euclidiana, que, segundo Mimmack *et al.* (2001), é uma das medidas recomendadas para a regionalização de dados climáticos. A distância euclidiana é expressa pela Equação 1:

$$d(X_i, X_j) = \left[\sum_{k=1}^p (X_{i,k} - X_{j,k})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde X_i , k e X_j , k representam os elementos a serem comparados, com $X_i \neq X_j$ e $i=1, \dots, n$ (número total da amostra). A observação da k -ésima variável de cada elemento amostral é representada por p , o número total de variáveis consideradas.

Em seguida, foi gerado um dendrograma, um diagrama bidimensional em forma de árvore onde o eixo vertical representa o nível de similaridade (ou dissimilaridade) e o eixo horizontal representa os elementos amostrais (Xu *et al.*, 1998; Fung, 2001). Foi adotada uma abordagem hierárquica, utilizando o método de ligação de Ward (variância mínima), proposto por Ward (1963), que se baseia na análise de variância. A soma dos quadrados dentro de cada grupo foi calculada a partir do quadrado da distância euclidiana de cada elemento pertencente a cada grupo, conforme a Equação 2:



$$w = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{n_g} \|X_I - \bar{X}_g\|^2 = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^k (X_{I,k} - \bar{X}_{g,k})^2 \quad \text{Equação 2}$$

Onde w representa a função de ligação de Ward, dada pela soma dos quadrados dentro de cada grupo, G é o número de elementos no grupo Gi no passo k do processo de agrupamento, X_i , k é o vetor de observações do k -ésimo elemento que pertence ao i -ésimo grupo, e \bar{X}_g é o centroide do grupo Gi .

Para a variabilidade espacial da ET_0 , utilizou-se o método de interpolação IDW (*Inverse Distance Weighting*), no qual a quantidade interpolada em um local é baseada na ponderação inversamente proporcional à distância entre o ponto e os dados da estação meteorológica mais próxima (Xavier *et al.*, 2022). A partir dos dados de interpolação, realizaram-se as análises de variabilidade mensal e anual.

Em relação à variabilidade espacial da ETr, selecionaram-se os meses de julho e dezembro como representativos dos períodos de máxima e mínima precipitação no estado de Alagoas, respectivamente. Esta escolha baseou-se na clara sazonalidade climática da região, onde julho concentra o pico pluviométrico e dezembro apresenta o menor quantitativo de chuva (Molian; Bernardo, 2002; Lyra *et al.*, 2014; Costa *et al.*, 2018; Rocha Júnior *et al.*, 2021; Silva; Cabral Júnior, 2025). Foi necessário reamostrar os dados MOD16 para uma grade de 2 km de resolução espacial, utilizando o método do vizinho mais próximo (Hengl; Heuvelink; Rossiter, 2007). Vale ressaltar que foram utilizados os mapas médios de cada estação chuvosa e seca para a análise. Para a análise de agrupamento da ETr, avaliou-se os dados das imagens do MOD16 através do *Silhouette Score*, que é calculado considerando a distância média intra-cluster (a) e a distância média para o cluster mais próximo (b) de cada ponto de dados, conforme a Equação 3:

$$S = \frac{b - a}{\max(a, b)} \quad \text{Equação 3}$$

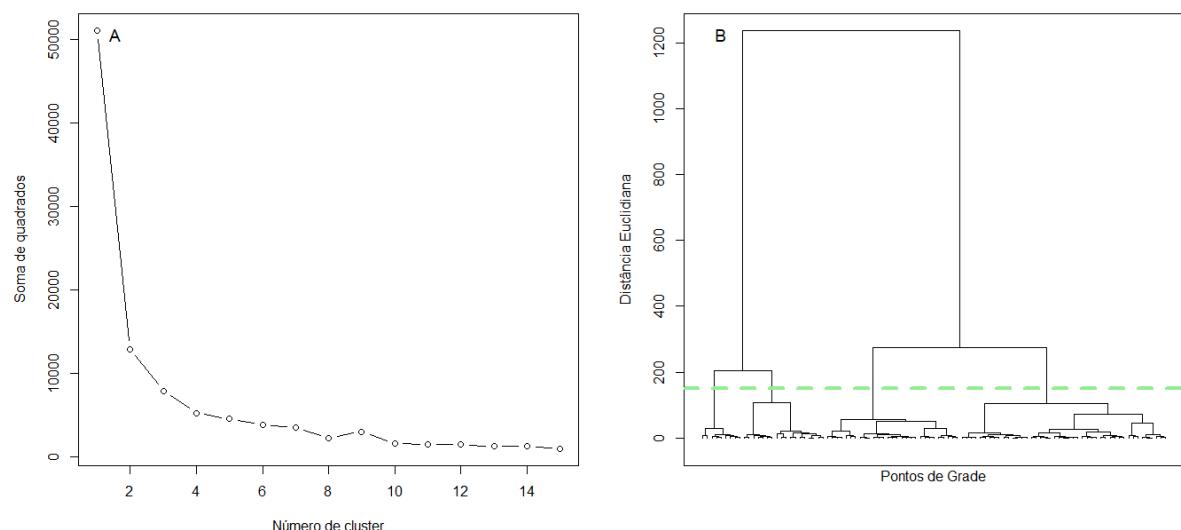
Uma pontuação de Silhouette próxima a +1 indica que o ponto de dados está bem agrupado, uma pontuação próxima a 0 sugere que o ponto pode pertencer a outro cluster, e uma pontuação próxima a -1 indica que o ponto está no cluster errado (Rousseeuw, 1987; Shahapure; Nicholas, 2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Evapotranspiração de referência

Na Figura 2 são verificados os resultados referentes ao número de clusters (grupos) através da variabilidade da soma dos quadrados (Figura 2A) e o dendrograma (Figura 2B), com a linha de corte horizontal, indicando a separação de grupos de acordo com os dados médios mensais da ET_0 para os respectivos pontos (um para cada município alagoano), de 1961 a 2019.

Figura 2 - Número de cluster (A) e dendrograma (B) referentes aos quatro grupos da evapotranspiração de referência.



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

A partir de quatro clusters (Figura 2A), as somas dos quadrados permanecem praticamente constantes, indicando que esse número de grupos é ideal para a divisão por sub-regiões no estado de Alagoas. Os grupos mantêm-se distintos entre si, separando os municípios de acordo com suas similaridades. Essas sub-regiões apresentam uma quantidade específica de pontos (Figura 2A), dependendo dos pontos que se assemelham entre si dentro de cada grupo, como representado na Figura 2B. O número de municípios e os percentuais para cada grupo estão listados na Tabela 1.

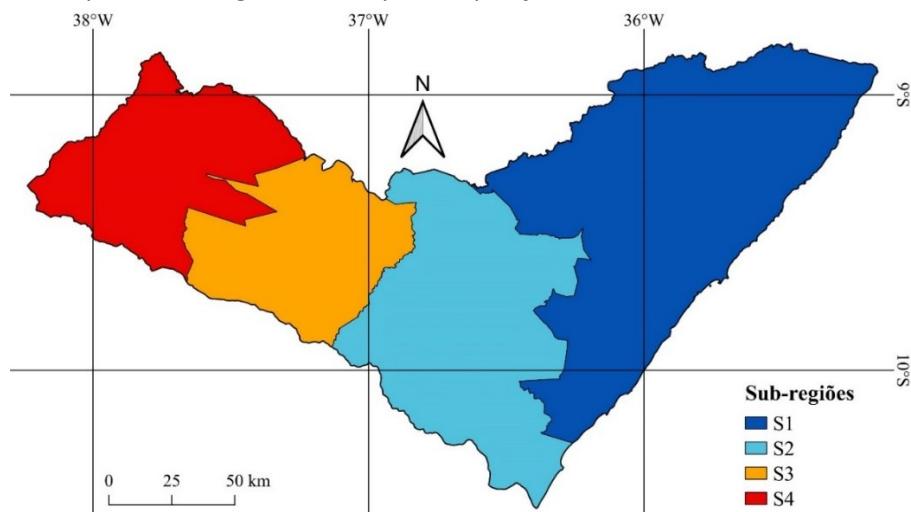
Tabela 1- Número de municípios pertencentes a cada sub-região com os respectivos percentuais para o estado de Alagoas.

Sub-região	Nº de municípios	% de municípios
1	47	46,08
2	28	27,45
3	16	15,69
4	11	10,78
Total	102	100

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Nota-se na Figura 3 que as sub-regiões estão separadas espacialmente no sentido longitudinal, de leste para oeste, e foram denominadas nesta pesquisa de Sub-região 1 (S1), Sub-região 2 (S2), Sub-região 3 (S3) e Sub-região 4 (S4). A região com o maior número de municípios é a S1, onde se localiza a capital do estado, representando 46,08% do total. As sub-regiões S2 e S3 juntas contêm 43,14% dos municípios, ou seja, o maior tamanho em área se encontra na parte central do estado. A S4 apresenta o menor número de municípios, com 10,78% do total.

Figura 3 - Mapa de sub-regiões de evapotranspiração de referência do estado de Alagoas.



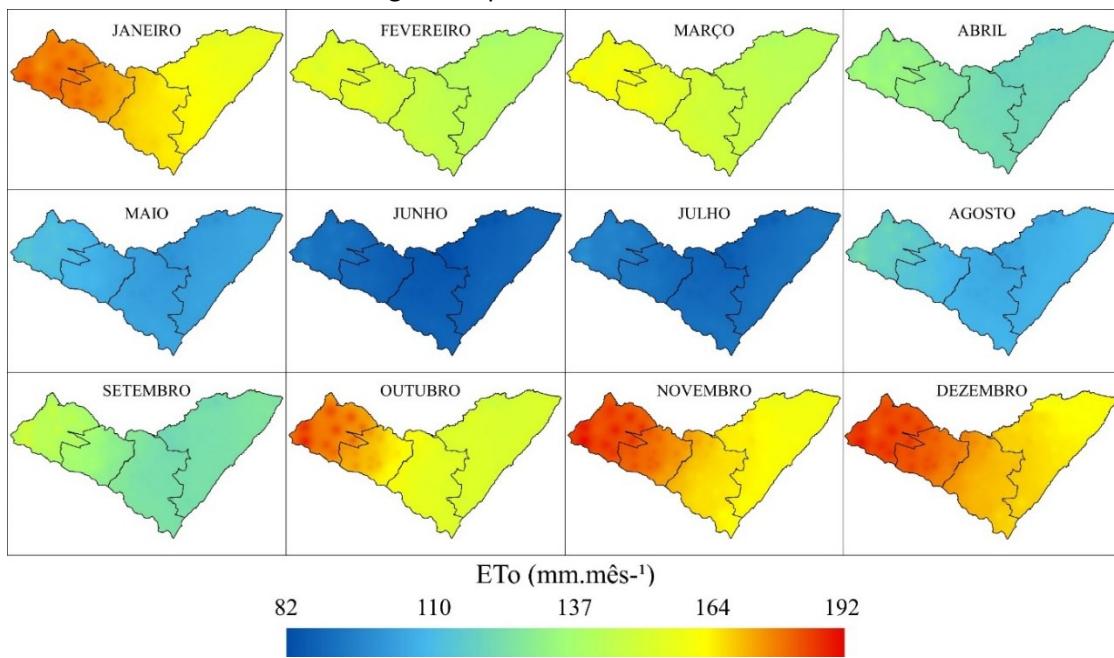
Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Na Figura 4 verificou-se, para o estado de Alagoas, que os meses de outubro a março apresentam os maiores valores de ET_0 , com média de 161,4 mm.mês⁻¹, destacando-se o mês de dezembro com o maior valor médio (172,5 mm.mês⁻¹). Esse período coincide entre as

estações de primavera-verão, quando há maior demanda de água para a atmosfera em função da maior disponibilidade de energia, conforme descrevem Cabral Júnior e Bezerra (2018). Vale ressaltar que esse período coincide ainda com o período seco (menos chuvoso) na maior parte do estado, e, portanto, contribui para que o déficit hídrico, no solo e na atmosfera, eleve a demanda por água na atmosfera e consequentemente aumente a ET_0 .

Por outro lado, os menores valores de ET_0 , são observados entre o final do outono e o inverno, maio a agosto, variando de 105 mm (maio) a 109 mm (agosto). Junho obtém o menor valor, em média, para todo o estado, com 88 mm.mês⁻¹. Esse quadrimestre além de ser o período do ano com menor disponibilidade de energia, é também o período mais úmido (estação chuvosa) para praticamente todo o estado alagoano, o que certamente diminui o potencial de perda de água para a atmosfera, ou seja, a ET_0 . Nota-se que os meses de transição foram abril e setembro, registrando, respectivamente, 124,3 mm.mês⁻¹ e 128,8 mm.mês⁻¹.

Figura 4 - Variabilidade espacial e mensal da evapotranspiração de referência para o estado de Alagoas no período de 1961 a 2019.

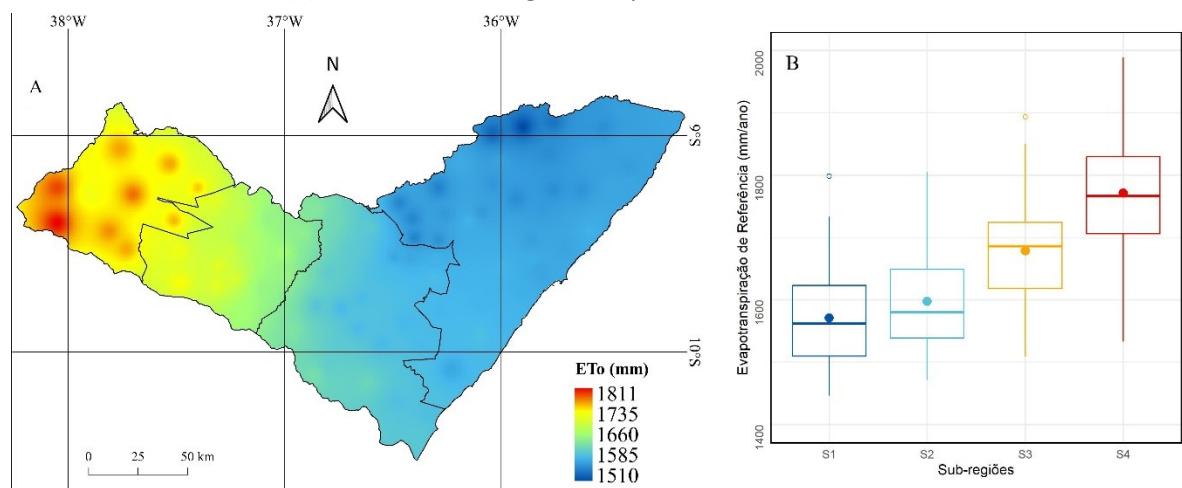


Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Em termos espaciais, as quatro sub-regiões apresentam diferenças aparentemente sutis, mas que foram sensíveis à técnica de análise de Cluster, a qual identificou significância estatística entre elas. A principal característica da ET_0 é o registro de menores valores na Sub-região 1 (S1), localizada mais a leste do estado, com um aumento gradual dessas médias nas

sub-regiões subsequentes, até alcançar a Sub-região 4 (S4) no extremo oeste do estado. Na Figura 5A, observa-se que o acumulado anual médio das sub-regiões segue esse mesmo padrão de aumento gradual de leste a oeste. Para analisar as variabilidades dos acumulados anuais da ET_0 , foi elaborado um boxplot (Figura 5B) para cada uma das quatro sub-regiões. Observa-se que as menores variabilidades estão na S1, enquanto a maior variabilidade ocorre na S4, indicando que as variações anuais são menores no leste e aumentam progressivamente à medida que se avança para o oeste do estado, durante o período estudado. Este gradiente leste-oeste na variabilidade da ET_0 reflete a influência conjunta de diferentes variáveis meteorológicas em Alagoas, as quais se destacam as mudanças espaciais, do Litoral ao Sertão, na temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação e balanço de energia superficial (Cabral Júnior; Bezerra, 2018; Silva *et al.*, 2018; Silva; Barbosa, 2022; Silva *et al.*, 2023; Silva; Cabral Júnior, 2025).

Figura 5 - Acumulado anual médio da evapotranspiração de referência para as diferentes sub-regiões (A) e variabilidade dos acumulados anuais da evapotranspiração de referência para cada sub-região (B) do estado de Alagoas, no período de 1961 a 2019.



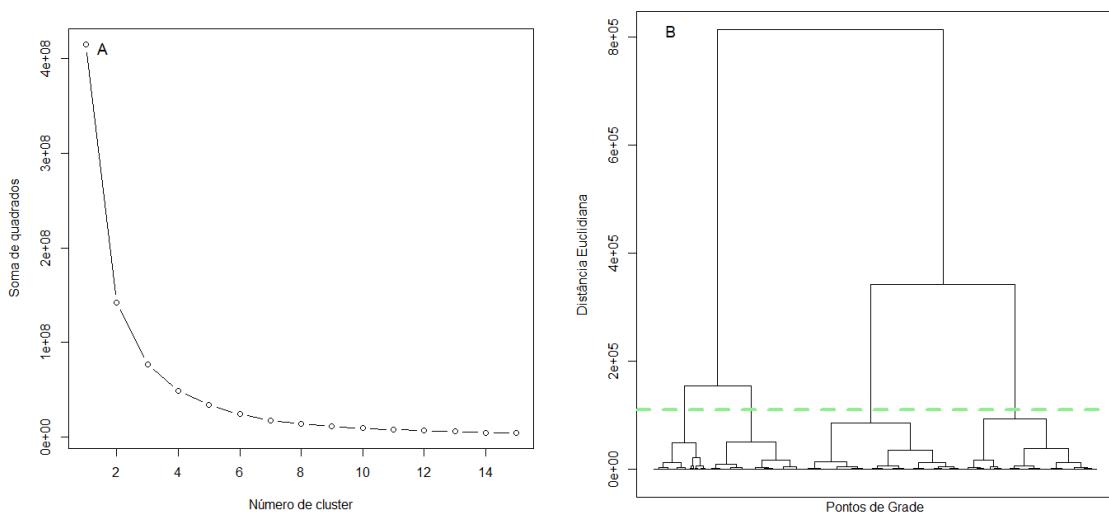
Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

3.1 Evapotranspiração de real

Na Figura 6, são apresentados os gráficos relacionados ao número de clusters (grupos) através da variabilidade da soma dos quadrados (Figura 6A) e o dendrograma (Figura 6B), com uma linha de corte horizontal indicando a separação de grupos conforme os dados médios anuais da ETr para os respectivos pixels, com resolução espacial de 2 km. A partir de quatro clusters (Figura 6A), as somas dos quadrados permanecem praticamente constantes,

sugerindo que esse número de grupos é ideal para a divisão por sub-regiões no estado de Alagoas. Os grupos mantêm-se distintos entre si, separando os municípios conforme suas similaridades. Essas sub-regiões apresentam uma quantidade específica de pontos (Figura 6A), conforme os pontos que se assemelham dentro de cada grupo, conforme representado na Figura 6.

Figura 6 - Número de cluster (A) e dendrograma (B) referentes aos quatro grupos da Evapotranspiração Real (ETr).



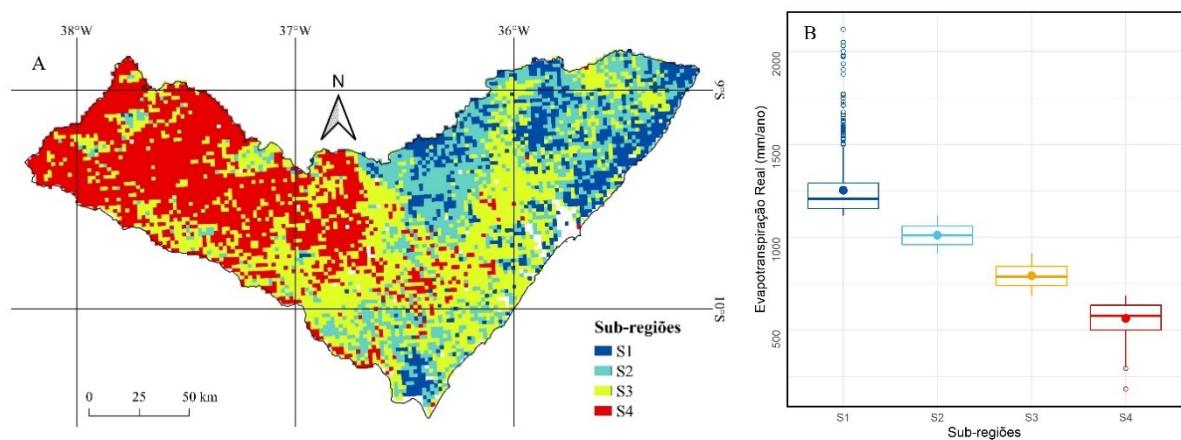
Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

As sub-regiões de ETr foram denominadas Sub-região 1 (S1), Sub-região 2 (S2), Sub-região 3 (S3) e Sub-região 4 (S4). A divisão dessas sub-regiões, conforme a Figura 7A, revelou uma irregularidade significativa e uma falta de contiguidade espacial, com áreas da mesma sub-região localizadas em diferentes partes do estado. Enquanto a sub-região S4 predomina na porção oeste, as sub-regiões S1, S2 e S3 apresentam uma distribuição descontínua, refletindo a variação de fatores como umidade do solo, tipo e uso do solo, e cobertura vegetal. Os maiores valores de ETr estão concentrados principalmente na porção leste do estado (S1), enquanto os menores valores predominam na porção oeste (S4). A qualidade dos grupos foi validada pelo Índice de Silhouette, que apresentou uma média positiva de 0,53, indicando que os dados estão bem agrupados, apesar da distribuição espacial irregular das sub-regiões.

Na Figura 7B, observa-se a variabilidade dos acumulados anuais de ETr para cada sub-região. A sub-região S1 apresenta os maiores valores, com uma média superior a 1000

mm/ano e dispersão dos dados que ultrapassa os 2000 mm/ano, indicando condições mais favoráveis para a evapotranspiração. As sub-regiões S2 e S3 apresentam médias próximas a 1000 mm/ano e ligeiramente inferiores a 1000 mm/ano, respectivamente, sugerindo uma menor variabilidade anual de ETr. Por outro lado, a sub-região S4 registra os menores valores de ETr, com médias inferiores a 750 mm/ano, refletindo a menor disponibilidade de água nessa região.

Figura 7 - Mapa de sub-regiões de Evapotranspiração Real (A) e variabilidade dos acumulados anuais da Evapotranspiração real (B), para cada sub-região do estado de Alagoas, no período de 2001 a 2020.



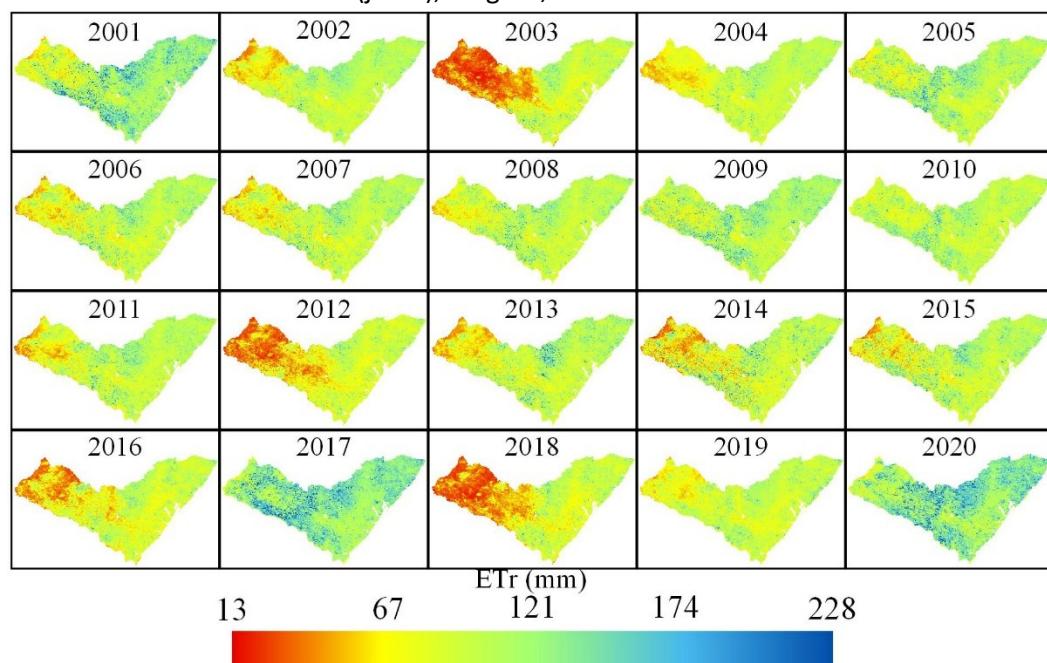
Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Conforme é bem conhecido, a distribuição das chuvas em Alagoas se concentram de abril a julho e o período mais seco de setembro a dezembro (Lyra *et al.*, 2014; Silva; Cabral Júnior, 2025). Partindo dessa premissa, analisou-se a distribuição espacial da ETr considerando dois contrastes uma série mensal em período chuvoso (julho) e outro no seco (dezembro) verificados nas Figuras 8 e 9, respectivamente. Em julho, os valores de ETr são significativamente maiores (Figura 8) em comparação a dezembro (Figura 9). Isso ocorre porque a ETr é influenciada conjuntamente pela demanda de energia da atmosfera e pela disponibilidade de água na superfície, no mês de julho a quantidade e frequência de chuvas são maiores, resultando em maior presença de umidade no solo e consequentemente, maior ETr.

Em julho, mês chuvoso, a ETr média é de 99,3 mm/mês, com valores mínimos e

máximos de 35,0 mm e 181,2 mm, respectivamente. Nos anos de 2003, 2012 e 2018, os menores valores de ETr da série histórica foram registrados, especialmente na região oeste do estado (Sertão alagoano), onde os valores ficaram abaixo de 30 mm/mês. Em contrapartida, os anos de 2001, 2017 e 2020 apresentaram os maiores valores de ETr, frequentemente acima de 80 mm/mês. A oscilação desses valores está principalmente associada à quantidade e distribuição da precipitação, que é bastante irregular no território alagoano (Lyra *et al.*, 2014; Silva; Cabral Júnior, 2025), os anos acima citados tiveram picos de precipitação (Souza, 2011; Firmino *et al.*, 2024), que influenciou a disponibilidade de umidade no solo e consequentemente na ETr (Vale *et al.*, 2023), além da demanda atmosférica por água em função da elevada disponibilidade de energia (Cabral Júnior; Bezerra, 2018; Silva *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2023).

Figura 8 - Variação interanual da Evapotranspiração Real (ETr) representando o período chuvoso (julho), Alagoas, 2001 a 2020.

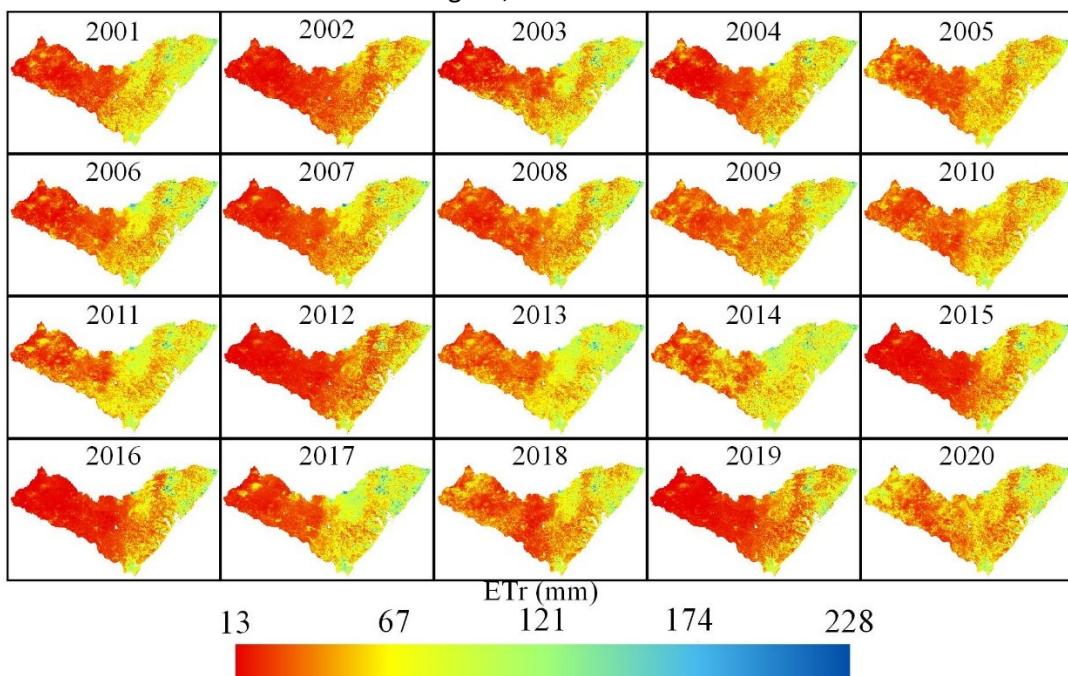


Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Em dezembro, período seco, os valores de ETr são menores, com uma média de 50,3 mm/mês e um mínimo de 13,5 mm/mês. No entanto, o valor máximo observado nesse período foi de 227,4 mm/mês, registrado excepcionalmente na região leste do estado, a mais úmida, pela presença da Mata Atlântica, uma vegetação densa, perene e de maior porte (IBGE, 2019; Farias *et al.*, 2023). Esse valor não é representativo do estado como um todo, pois cerca de 70% de Alagoas apresenta ETr média inferior a 40 mm/mês nesse período, especialmente

na região oeste, onde predomina o bioma caatinga (Figura 1). Nesse período de escassez de precipitação (Lyra *et al.*, 2014; Silva; Cabral Júnior, 2025), há um maior déficit hídrico no solo e, consequentemente, menor biomassa (Pedreira Junior *et al.*, 2020), resultando em menor perda de água para a atmosfera.

Figura 9 - Variação interanual da Evapotranspiração Real (ETr) para o período seco (dezembro), Alagoas, 2001 a 2020.

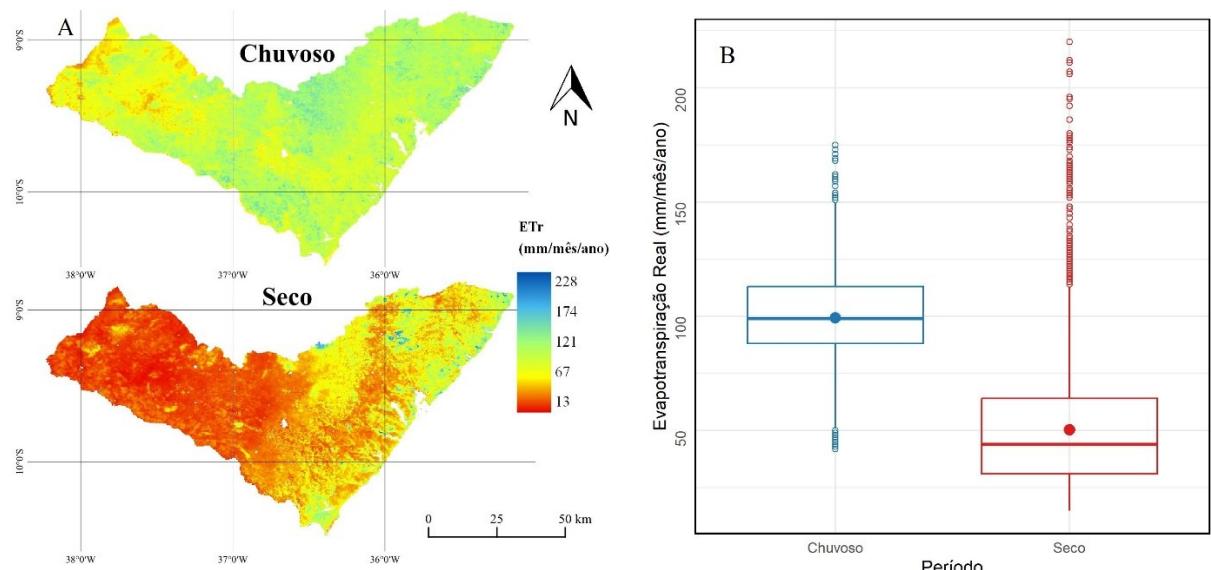


Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Na Figura 10A, é possível observar a variabilidade média da Evapotranspiração Real (ETr) nos períodos chuvoso e seco. As diferenças médias entre a ETr nos distintos períodos são significativas, assim como as diferenças entre as regiões leste e oeste de Alagoas. Ao observar o boxplot (Figura 10B), nota-se que a média dos valores de ETr é maior no período chuvoso em comparação com o período seco, porém, observa-se um maior quantitativo de valores discrepantes (*outliers*) no período seco. Esses quantitativos e variações eram esperados, pois o período chuvoso proporciona mais umidade ao solo, favorecendo maiores perdas de água para a atmosfera. No período seco, ocorre o oposto. Destaca-se que as variabilidades são maiores durante o período seco devido à distribuição irregular da precipitação. Na porção oeste do estado (semiárido), os valores médios de chuva são próximos de 0 mm nesse período. Assim, a deficiência hídrica nessa área aumenta e a ETr diminui consideravelmente, o que não

ocorre com a mesma intensidade na região úmida (leste). Portanto, as maiores amplitudes de variabilidade ocorrem durante o período seco.

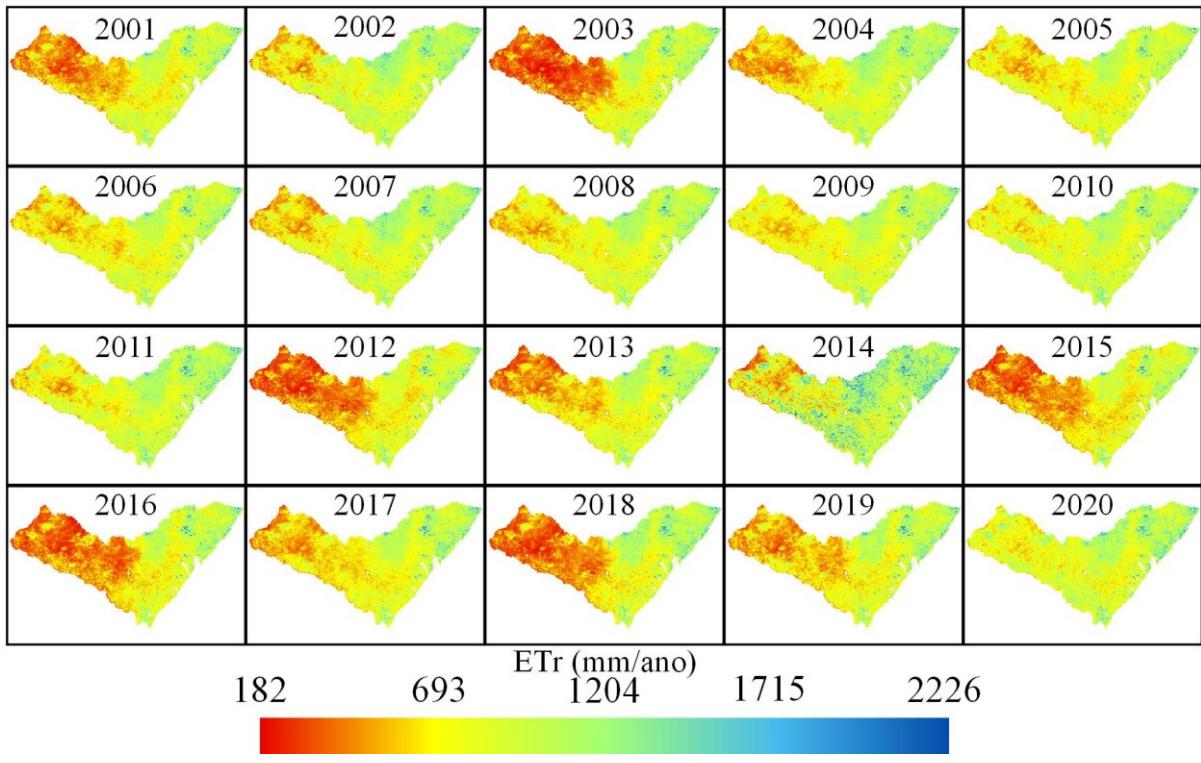
Figura 10 - Variabilidade espacial média da Evapotranspiração Real (A) e Boxplot (B) para estado de Alagoas para o período chuvoso e seco.



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

A variação espacial do acumulado anual da ETr (Figura 11) apresenta uma média de 827,9 mm/ano, com valores mínimos e máximos de 182,6 mm e 2225,9 mm/ano, respectivamente. Os menores valores anuais ocorrem no oeste do estado, variando de 182 mm a 300 mm/ano nos anos de 2001, 2003, 2012, 2013, 2015, 2016 e 2018. Em contraste, na região centro-leste de Alagoas, os valores acumulados foram superiores a 800 mm/ano, destacando-se a área nordeste do estado, onde a frequência de ETr superior a 1200 mm/ano foi mais elevada.

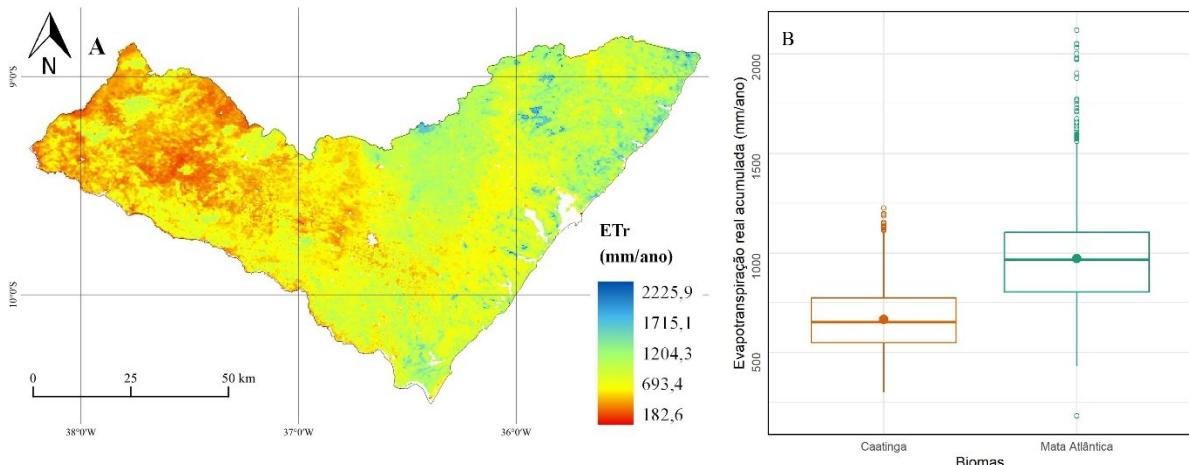
Figura 11 - Variação espacial do acumulado médio anual da Evapotranspiração Real (ETr) para o estado de Alagoas, 2001 a 2020.



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Na Figura 12A, observa-se o acumulado médio anual da ETr, com a região oeste apresentando valores entre 183 mm e 700 mm/ano, exceto algumas áreas de maiores altimetrias onde a ETr chega a 1000 mm/ano. As regiões do nordeste alagoano se destacam pelos valores de acumulado médio de ETr superiores a 1500 mm/ano. No *boxplot* (Figura 12B), a média anual foi de 826 mm, com valores discrepantes (outliers) superiores a 1000 mm/ano na caatinga e 1500 mm/ano na Mata Atlântica. Além disso, nota-se que 75% dos valores de ETr estão abaixo de 1000 mm/ano.

Figura 12 - Mapa médio anual da variabilidade espacial da Evapotranspiração Real (A) e Boxplot (B) para cada bioma do estado de Alagoas de 2001 a 2020.



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Os resultados indicam que o comportamento da ET_0 e da ETr varia de maneira significativa entre as porções leste e oeste de Alagoas. Isso se deve, em parte, ao fato de que a disponibilidade de energia é maior na região oeste, favorecendo valores mais elevados de ET_0 , uma vez que essa medida assume que não há limitações hídricas. Por outro lado, a maior disponibilidade de água no solo no leste resulta em valores mais altos de ETr nessa parte do estado.

Observa-se que, embora tanto a ET_0 quanto a ETr tenham sido divididas em quatro sub-regiões, as delimitações da ET_0 são mais bem definidas, já que são determinadas principalmente pela energia atmosférica. Em contraste, as sub-regiões de ETr apresentam uma divisão mais irregular, influenciada por diversos fatores, como a demanda atmosférica, a quantidade de umidade no solo, o tipo e uso da cobertura do solo e a presença de vegetação nativa. A Mata Atlântica, por exemplo, que é mais úmida, se encontra principalmente na região leste, enquanto a Caatinga, menos úmida, predomina no oeste, contribuindo para esses padrões distintos de ET_0 e ETr.

Estudos anteriores reforçam esses resultados. Cabral Júnior e Bezerra (2018), ao analisarem a ET_0 no Nordeste do Brasil com base em dados interpolados de Xavier *et al.* (2016), identificaram que Alagoas apresenta picos de ET_0 mais altos nos meses de verão. Já Silva *et al.* (2018) encontraram que os maiores valores de ET_0 se localizam no sertão, na parte oeste do estado, enquanto os menores valores estão no leste. No caso da ETr, as análises têm se concentrado na zona litorânea, utilizando modelagem de balanço hídrico para áreas agrícolas

(Farias *et al.*, 2023) e estudos biofísicos em anos de La Niña (Santos *et al.*, 2020), que indicam que, em períodos de maior disponibilidade hídrica no solo, há maiores valores de ETr.

Esses resultados oferecem importantes contribuições para a gestão sustentável dos recursos hídricos e o monitoramento ambiental no estado de Alagoas, especialmente em um cenário de mudanças climáticas, onde a disponibilidade de água se torna cada vez mais incerta. A compreensão das sub-regiões e das dinâmicas de ET_0 e ETr pode orientar políticas públicas voltadas para o uso eficiente da água e o planejamento agrícola, ajudando a mitigar os impactos das variações climáticas e promover a resiliência dos ecossistemas locais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que: O estado de Alagoas apresenta quatro sub-regiões homogêneas em termos de evapotranspiração de referência (ET_0) e evapotranspiração real (ETr), denominadas sub-regiões S1, S2, S3 e S4; Em média, o período de maior potencial de perda de água ocorre entre os meses de outubro a março nas quatro sub-regiões, com um valor médio de 172,5 mm.mês⁻¹. Os menores valores de perda de água são registrados entre junho e julho, com uma média de 88 mm.mês⁻¹. Para a ETr, nos meses chuvoso (julho) e seco (dezembro), a média é de 99,3 mm/mês e 50,3 mm/mês, respectivamente. O acumulado médio anual de ETr é de 827,9 mm; A variabilidade da ET_0 para cada sub-região mostra que os menores valores estão no leste de Alagoas, aumentando gradualmente à medida que se aproxima do oeste do estado. Em relação à ETr, a média é maior na porção leste e menor na região oeste. Essas variações se devem, principalmente, à desigualdade na quantidade e distribuição de umidade no solo; Essas informações são essenciais para a gestão sustentável dos recursos hídricos e o planejamento agrícola em Alagoas, especialmente em ambientes semiáridos.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL) pela concessão da bolsa de mestrado, ao Laboratório de Climatologia Teórica e Aplicada (LACTA) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG) do Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente (IGDEMA) da Universidade Federal de Alagoas

(UFAL). O último autor (orientador) agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Chamada CNPq/MCTI Nº 10/2023) pelo apoio e financiamento à pesquisa. Ampliamos também os nossos agradecimentos aos revisores, pelo tempo que dispuseram para avaliar o trabalho e sugerirem valiosas contribuições. Reconhecemos significativamente a relevância do trabalho de toda a equipe da RBclima.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, Richard G. et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n. 6, p.711-728. 2013.
- ÁVILA, L. F. et al. Partição da precipitação pluvial em uma microbacia hidrográfica ocupada por Mata Atlântica na Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Florestal**. Santa Maria, RS, v. 24, n. 3, p.583-595. 2014.
- CABRAL JÚNIOR, J. B.; BEZERRA, B. G. Análises da evapotranspiração de referência e do índice de aridez para o Nordeste do Brasil. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, n. 1, p. 71-89, 3 jul. 2018.
- CABRAL JÚNIOR, J. B.; et al. Detecting linear trend of reference evapotranspiration in irrigated farming areas in Brazil's semiarid region. **Theoretical And Applied Climatology**, v. 138, p. 215-225, 2019.
- CABRAL JÚNIOR, J. B.; SILVA, H. J. F. Classificação climática e repercuções ambientais no estado de Alagoas, Brasil. In: André Becker Nunes; Glauber Lopes Mariano. (Org.). **Meteorologia em Tópicos**. 1ed. Maceió: Clube dos Autores, v. 7, p. 288-324, 2020.
- CARVALHO, Luiz Gonsaga de et al. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p. 456-465, 2011.
- COSTA, D. D. et al. Long-term relationships between climate oscillation and basin-scale hydrological variability during rainy season in eastern Northeast Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 63, p. 1636-1652, 2018.
- CUNHA, A. P. M. DO A. et al. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 139–152, 2013.
- CUNHA, A. P. M. DO A.; ALVALÁ, R. C. DOS S.; DE OLIVEIRA, G. S. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 139–152, 2013.
- CUNHA, A. P. M.; ALVALÁ, R. C.; NOBRE, C. A.; CARVALHO, M. A. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214–215, 2015.
- FARIAS, F. et al. Large-scale water balance modeling using remote sensing and weather data:

Application in an agricultural growing region of the coastal northeast Brazil. **Remote Sensing Applications:** Society and Environment, v. 32, p. 101072, 2023.

FIRMINO, M. V. S. L.; RODRIGUES, D. T.; CABRAL JÚNIOR, J. B. Climatologia dos eventos extremos de precipitação em Maceió, Alagoas. **Revista Contexto Geográfico**, v. 9, n. 22, p. 96–106, 2024.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica**: período 2020/2021, relatório técnico. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica, 2022.

FUNG, G. A comprehensive overview of basic clustering algorithms. 2001.

HENGL, T.; HEUVELINK, G. B.M.; ROSSITER, D. G. About regression-kriging: From equations to case studies. **Computers & geosciences**, v. 33, n. 10, p. 1301-1315, 2007.

IBGE. **Biomas e Sistema Costeiro-Marinho Do Brasil**: Compatível Com a Escala 1: 250 000. Série Relatórios Metodológicos. v. 45. 2019. 164p.

LYRA, G.B. *et al.* Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state. Northeast of Brazil. **International Journal of Climatology**. v. 34, n. 13, p. 3546-3558. 2014.

MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, v. 129, n. 1–2, 2015.

MIMMACK, G. M. *et al.* Choice of distance matrices in cluster analysis: defining regions. **Journal of Climate**, v. 14, n. 12, p. 2790-2797, 2001.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada**: uma abordagem aplicada. UFMG, Belo Horizonte, 2005. 297 p.

MIRALLES, D. G. *et al.* On the use of the term “evapotranspiration”. **Water Resources Research**, v. 56, n. 11, p. e2020WR028055. 2020.

MOKHTAR, Ali *et al.* Evapotranspiration as a response to climate variability and ecosystem changes in southwest, China. **Environmental Earth Sciences**, v. 79, p. 1-21, 2020.

MOLION, L.C.B.; BERNARDO, S.O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MONTEIRO, K. A.; CORRÊA, A. C. B. Application of morphometric techniques for the delimitation of Borborema Highlands, northeast of Brazil, eastern escarpment from drainage knick-points. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 103, p. 102729, 2020.

MU, Q. *et al.* Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**. v. 115, n. 8, p. 1781-1800, 2011.

PEREIRA, A. R. *et al.* **Agrometeorologia**: Fundamentos e Aplicações Práticas. São Paulo. USP/ESALQ, 2007, 192 p.

ROCHA JÚNIOR, R.L. *et al.* An Empirical Seasonal Rainfall Forecasting Model for the Northeast Region of Brazil. **Water**. v. 13, n. 12. p. 1613. 2021

ROUSSEEUW, P. J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 20, p. 53–65, 1987.

SANTOS, F. S. *et al.* Análise sazonal dos parâmetros biofísicos utilizando o sensor MODIS para

- o estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. spe, p. 955-968, 2020.
- SHAHAPURE, K. R.; NICHOLAS, C. Análise de qualidade de cluster usando pontuação de silhueta. In: 2020 IEEE 7^a conferência internacional sobre ciência de dados e análise avançada (DSAA). IEEE, 2020. p. 747-748.
- SILVA, F. D. S. *et al.* Tendências observadas da evapotranspiração potencial no estado de Alagoas (1961-2016). **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 11, n. 1, p. 28-43. 2018.
- SILVA, H. J. F. da. *et al.* Comparative analyzes and use of evapotranspiration obtained through remote sensing to identify deforested areas in the Amazon. **Int. J. Earth Obs. Geoinformation**. v. 78, p. 163-174, 2019.
- SILVA, J. S.; CABRAL JÚNIOR, J. B. Hidroclimatologia e balanço hídrico climatológico para o estado de Alagoas, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 36, p. 340-365, 2025.
- SILVA, J. S. *et al.* Climatology and significant trends in air temperature in Alagoas, Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 1-20, 2023.
- SILVA, M. F.; BARBOSA, R. V. R. Regime de ventos em cidades de diferentes regiões geográficas de Alagoas a partir de dados meteorológicos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 509-538, 2022.
- SOUZA, J. C. O. Análise do Evento Climático Extremo Ocorrido na Região Leste de Alagoas: Bacias Hidrográficas dos Rios Mundaú e Paraíba do Meio. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 2, p. 377-395, 2011.
- SOUZA, V. A. S. de. *et al.* Extreme rainfall events in Amazonia: The Madeira river basin. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, p. 100316, 2020.
- VALE, T. M. C. *et al.* Climate and water balance influence on agricultural productivity over the Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 2, p. 879-900, 2024.
- VIEIRA, R. M. S. P. *et al.* Characterizing spatio-temporal patterns of social vulnerability to droughts, degradation and desertification in the Brazilian northeast. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 5, p. 100016, 2020.
- VIEIRA, R. M. S. P. *et al.* Land use and land cover map of a semiarid region of Brazil for meteorological and climatic models. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, 2013.
- WARD, J. Hierarchical Grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, p. 236-244, 1963.
- XAVIER, A. C. *et al.* Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, 2016.
- XAVIER, A. C. *et al.* New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, 2022.
- XU, X. *et al.* A distribution-based clustering algorithm for mining in large spatial databases. In: Proceedings 14th International Conference on Data Engineering. IEEE, 1998. p. 324-331.
- ZHANG, K.; KIMBALL, J. S.; RUNNING, S. W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. **Wiley interdisciplinary reviews: Water**, v. 3, p. 834-853, 2016.