



HIDROCLIMATOLOGIA E BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO PARA O ESTADO DE ALAGOAS, NORDESTE DO BRASIL

*Hydroclimatology and climatological water balance for the
state of Alagoas, Northeast Brazil*

*Hidroclimatología y balance hídrico climatológico del estado
de Alagoas, Noreste de Brasil*

Josiel dos Santos Silva 

Universidade Federal de Alagoas - UFAL

josiel.silva@igdema.ufal.br

Jório Bezerra Cabral Júnior 

Universidade Federal de Alagoas - UFAL

jorio.cabral@igdema.ufal.br

Resumo: O objetivo central deste trabalho é analisar a Climatologia da Precipitação Pluvial (PP), da Evapotranspiração Potencial (ETP) e quantificar o Balanço Hídrico Climatológico (BHC) para o estado de Alagoas. Para isso, utilizou-se um banco de dados mensais de PP e ETP de 1961 a 2020 e em seguida aplicou-se estatísticas descritivas e inferencial para analisar dos dados de PP e ETP nas escalas mensais, anuais, decenais e por normais climatológicas (1961-1990 e 1991-2020). Para o cômputo do BHC foi adotado o método de Thornthwaite e Mather (1955), considerando a Capacidade de Água Disponível no solo (CAD) de 100 mm. Entre os principais resultados destaca-se que: a PP apresentou uma elevada irregularidade, espacial e temporal, com curto período chuvoso (3 a 5 meses) e maiores quantitativos de precipitação na faixa litorânea (61% a mais que no Sertão). Por outro lado, a ETP apresentou menores variabilidades e os maiores quantitativos concentraram-se no Sertão alagoano (12% a mais que no Litoral). Observou-se ainda que as décadas mais recentes (1990, 2000 e 2010) foram as menos chuvosas, consequentemente a Normal Climatológica de 1961-2020 foi a mais seca. Para o BHC, foi identificado que, em termos médios, só há excedente hídrico na porção leste do estado (maio a agosto), cujo armazenamento hídrico diminui à medida em que avança para o oeste do estado. Conclui-se que há limitações hídricas importantes na porção oeste e que essas limitações podem estar sendo intensificadas com a diminuição da precipitação nas décadas e normal climatológica mais recentes.

Palavras-chave: Recurso Hídrico. Precipitação. Evapotranspiração.

Abstract: The main objective of this work is to analyze the Climatology of Rainfall (PP), Potential Evapotranspiration (ETP) and quantify the Climatological Water Balance (BHC) for the state of Alagoas. For this, a monthly database of PP and ETP from 1961 to 2020 was used and then descriptive and inferential statistics were applied to analyze the PP and ETP data on monthly, annual, decadal and climatological normal scales (1961-1990 and 1991-2020). To calculate the BHC, the Thornthwaite and Mather (1955) method was adopted, considering the Available Water Capacity (CAD) in the soil of 100 mm. Among the main results, it is worth highlighting that: the PP presented high spatial and temporal irregularity, with a short rainy season (3 to 5 months) and higher amounts of precipitation in the coastal strip (61% more than in the Sertão). On the other hand, the ETP presented lower variability and the highest amounts were concentrated in the Sertão region of Alagoas (12% more than in the Coast). It was also observed that the most recent decades (1990, 2000 and 2010) were the least rainy, consequently the Climatological Normal of 1961-2020 was the driest. For the BHC, it was identified that, on average, there is a water surplus only in the eastern portion of the state (May to August), whose water storage decreases as it advances to the west of the state. It is concluded that there are important water limitations in the western portion and that these limitations may be intensifying with the decrease in precipitation in the most recent decades and climatological normal.

Keywords: Water Resource. Precipitation. Evapotranspiration.

Resumen: El objetivo central de este trabajo es analizar la Climatología de la Precipitación (PP), la Evapotranspiración Potencial (ETP) y cuantificar el Balance Hídrico Climatológico (BHC) para el estado de Alagoas. Para ello se utilizó una base de datos mensual de PP y ETP desde 1961 a 2020 y luego se aplicó estadística descriptiva e inferencial para analizar los datos de PP y ETP en escalas normales mensuales, anuales, decenales y climatológicas (1961 -1990 y 1991-2020). Para calcular la BHC se adoptó el método de Thornthwaite y Mather (1955), considerando la Capacidad de Agua Disponible del Suelo (CAD) de 100 mm. Entre los principales resultados, se destaca que: El PP presentó alta irregularidad espacial y temporal, con un período lluvioso corto (3 a 5 meses) y mayores precipitaciones en la franja costera (61% más que en el Sertão). Por otro lado, el ETP presentó menor variabilidad y las mayores cantidades se concentraron en el Sertão de Alagoas (12% más que en la Costa). También se observó que las décadas más recientes (1990, 2000 y 2010) fueron las menos lluviosas, en consecuencia la Normal Climatológica de 1961-2020 fue la más seca. Para BHC, se identificó que, en promedio, sólo existe excedente de agua en la porción este del estado (mayo a agosto), cuyo almacenamiento de agua disminuye a medida que se avanza hacia el oeste del estado. Se concluye que existen importantes limitaciones hídricas en la porción occidental y que dichas limitaciones pueden intensificarse con la disminución de las precipitaciones en las últimas décadas y la normalidad climatológica.

Palabras clave: Recurso Hídrico. Precipitación. Evapotranspiración.

Submetido em: 01/09/2024

Aceito para publicação em: 25/01/2025

Publicado em: 05/02/2025

1. INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil (NEB), inserido nos trópicos, é a segunda região mais populosa do país, com 54,6 milhões de habitantes, e a terceira maior em dimensão territorial, com 1.554,291 km² (IBGE, 2023). Uma das características marcantes da região é a elevada vulnerabilidade à seca, associada principalmente às altas temperaturas e ao déficit hídrico (Marengo *et al.*, 2017; Refati *et al.*, 2023). Tendências de aumento da temperatura do ar detectadas na região do NEB (Costa *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2023), indicam um possível aumento dos eventos de seca, pois a evapotranspiração potencial (ETP) é intensificada (Liu *et al.*, 2013; Cabral Júnior *et al.*, 2019), resultando em redução na quantidade de água do solo, que somada ao mau uso do solo, aumentam o risco de desertificação em partes do NEB (Marengo; Bernasconi, 2015; Barbosa, 2024). A relação oferta-demanda é um componente central necessário para entender as repercussões ambientais em escala regional, consideradas fundamentais para a gestão de recursos hídricos em diversos setores da sociedade (Aparecido *et al.*, 2022; Vale *et al.*, 2024).

Ressalta-se que de acordo com Lucas *et al.* (2020) a evapotranspiração é a maior vazão de água do ciclo hidrológico em escala global, sendo a ETP o principal preditor climático de biodiversidade (Fisher *et al.*, 2011), e, em conjunto com a Precipitação Pluvial (PP) são decisivas para a disponibilidade de água no solo, sendo indicadores centrais de eventos de secas (Medeiros *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2022), através de ambas pode-se calcular o Balanço Hídrico Climatológico (BHC).

Logo o BHC de forma simplificada é a contabilização de água no solo, ou seja, a computação das entradas e saídas de água no sistema, proporcionando conhecer a disponibilidade hídrica de uma região, principalmente para um planejamento agrícola eficiente (Araújo *et al.*, 2019; Cassetari; Queiroz, 2020). O estudo dos elementos do BHC auxilia na gestão da irrigação, ajudando a identificar a melhor época para o preparo do solo, semeadura e plantio, além de garantir segurança hídrica e econômica ao produtor rural (Villa *et al.*, 2022). Na gestão de recursos hídricos, no planejamento e operação de reservatórios, na alocação eficiente de água entre setores como agricultura, indústria e consumo humano, e monitoramento da saúde das bacias hidrográficas (Souza *et al.*, 2014; Rodrigues *et al.*, 2022; Tiburcio *et al.*, 2023).

No atual cenário do aquecimento global, mudanças na PP, ETP e, consequentemente, na disponibilidade hídrica, ocasionam diferentes impactos, como aumentos nos períodos de seca, alteração na dinâmica de ecossistemas, com vários setores econômicos sendo afetados, como a geração de energia hidrelétrica, agricultura, pecuária e indústria (Mutti *et al.*, 2020; Tavares *et al.*, 2023). Nesse sentido, o estudo do BHC é essencial para mitigar tais impactos e dar suporte ao planejamento da gestão da água (Brêda *et al.*, 2020). Existem vários métodos para calcular o balanço hídrico, um dos mais utilizados foi proposto por Thornthwaite e Mather (1955), que permite definir índices hídricos, de umidade e de aridez de uma região, possibilitando uma classificação climática baseada nesses índices (Silva *et al.*, 2022).

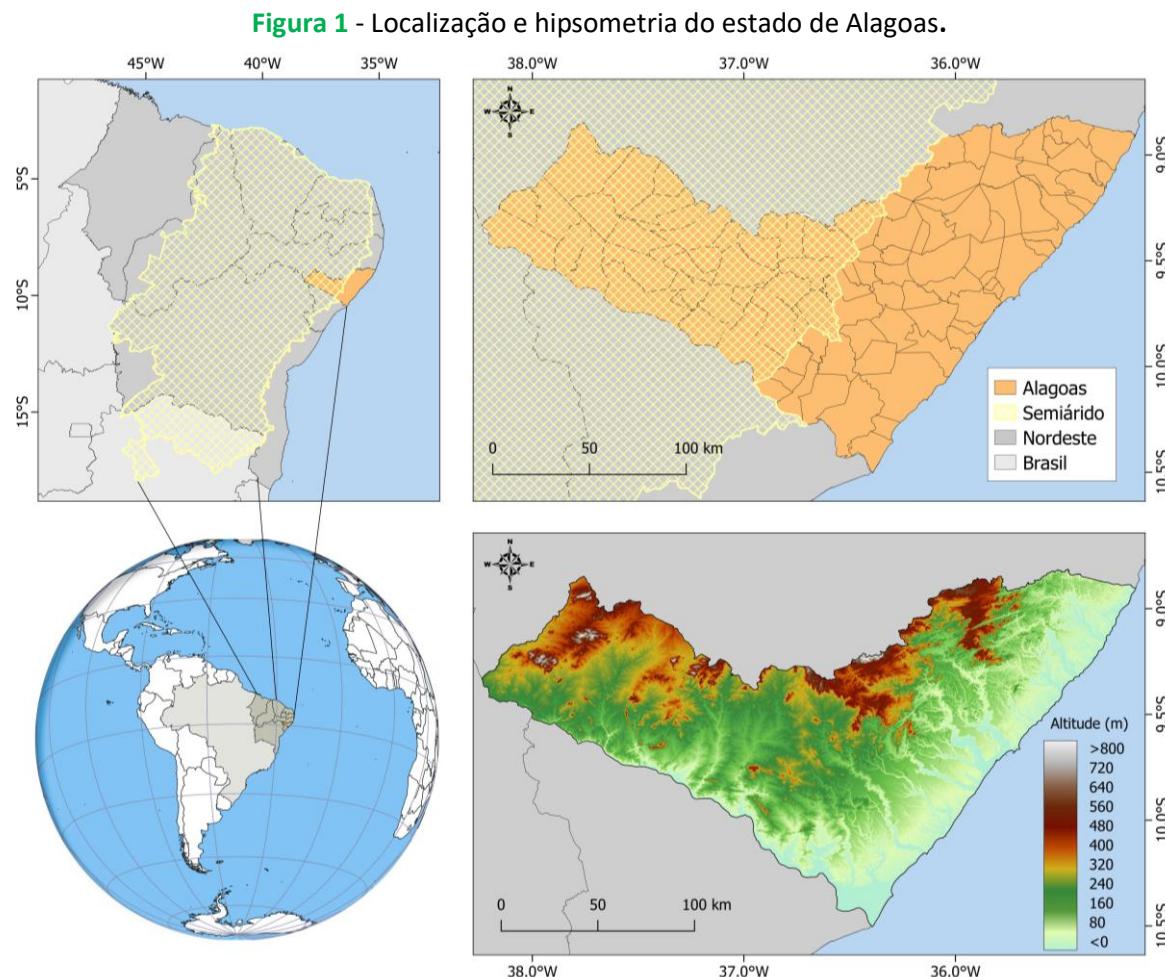
O estado de Alagoas possui uma elevada variabilidade da PP e elevados valores de ETP (Cabral Júnior; Bezerra, 2018; Lyra *et al.*, 2014; Oliveira Júnior *et al.*, 2021), entretanto ainda é pouco conhecido na literatura as características e variabilidades desses principais componentes do balanço hídrico alagoano, o que necessita de análises mais detalhadas que podem ser utilizadas em diferentes aplicações, inclusive no manejo dos recursos hídricos. Desta forma os objetivos neste trabalho consistiram-se em analisar a hidroclimatologia do estado de Alagoas, no intuito de: (I) caracterizar a variabilidade temporal e espacial da PP e ETP em diferentes escalas (mensal, anual, decenal e por normais climatológicas), (II) quantificar as variáveis do BHC (armazenamento, déficit e excesso hídricos), (III) mensurar os índices hídrico, de aridez e de umidade e (IV) realizar classificação climática para o estado de Alagoas, Nordeste do Brasil.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

A área de estudo a ser analisada é o estado de Alagoas, localizado na região do NEB, com 102 municípios (Figura 1) numa área 27.768 km². Embora seja o segundo menor estado do país, apresenta grande variabilidade climática e regional. Sendo que 43,1% do estado está inserido na região semiárida. Conforme a classificação de Köppen, o estado possui duas classificações climáticas: Tropical chuvoso (A) a leste e o Semiárido (B) a oeste (Alvares *et al.*, 2013).

O estado de Alagoas está localizado em duas importantes regiões hidrográficas nacionais: a do rio São Francisco e a do Atlântico Nordeste Oriental (Marcuzzo, 2017). Este posicionamento geográfico contribui para a diversidade ecológica e a riqueza dos recursos hídricos do estado, que é caracterizado pela predominância de dois biomas principais: a Caatinga e a Mata Atlântica (IBGE, 2019).



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

2.2. Dados

Para analisar a Climatologia temporal e espacialmente no estado de Alagoas, utilizaram-se dados mensais de PP e ETP, disponibilizados por Xavier *et al.* (2022), que no intuito de ampliar e melhorar a distribuição temporal e espacial de dados meteorológicos, desenvolveram e validaram um banco de dados meteorológicos com uma resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, para uma série temporal de 1961 a 2020.

2.3. Cálculo do BHC e Classificação Climática

De posse dos dados realizou-se a análise descritiva dos dados mensais de precipitação e ETP. A estação chuvosa foi definida baseando-se nos maiores acumulados médios mensais. O oposto foi definido para o período seco. De posse das estatísticas, foram analisados os dados nas escalas mensais, anuais, decenais e por normais climatológicas.

Para o BHC foi adotado o método de Thornthwaite e Mather (1955), cujos parâmetros de entrada são: capacidade de água disponível no solo (CAD), o qual leva em consideração o valor de 100 mm. Os dados de entrada para o cálculo do BHC são: PP e ETP, cuja origem de dados já foi mencionada, podendo-se estimar os valores correspondentes ao Armazenamento de água no solo (ARM), Deficiência Hídrica (DEF) e Excedente Hídrico (EXC) mensais (Thornthwaite, 1948; Thornthwaite; Mather, 1955), cujas equações estão descritas, respectivamente, abaixo. Os cálculos do BHC foram realizados através de planilhas Excel elaboradas por Rolim *et al.* (1998).

$$\begin{aligned} \text{se } (P - ETP) < 0 \rightarrow ARM = CAD * e\left(\frac{NAc}{CAD}\right) \\ \text{se } (P - ETP) \geq 0 \rightarrow ARM = ARM_{n-1} + (P - ETP) \rightarrow NAc = CAD * \ln\left(\frac{ARM}{CAD}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{se } (P - ETP) < 0 \rightarrow ETR = P + |ALT| \\ \text{se } (P - ETP) \geq 0 \rightarrow ETR = ETP \end{aligned} \quad (2)$$

$$DEF = ETP - ETR \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{se } ARM < CAD \rightarrow EXC = 0 \\ \text{se } ARM = CAD \rightarrow EXC = (P - ETP) - ALT \end{aligned} \quad (4)$$

Em que: P é a precipitação mensal; ETP é a evapotranspiração potencial mensal; NAc são os valores de $(P - ETP)$ negativos acumulados; ETR é a evapotranspiração real mensal; e $ALT = \Delta ARM$.

A partir das variáveis do BHC, calculou-se os seguintes índices: hídrico (Ih), de aridez (Ia) e de umidade (Iu) de acordo com as seguintes equações 5, 6 e 7:

$$Ih = \frac{EXC}{ETP} 100 \quad (5)$$

$$Ia = \frac{DEF}{ETP} 100 \quad (6)$$

$$Iu = Ih - (0,61 * Ia) \quad (7)$$

Onde: EXC é o excesso hídrico anual, em mm; DEF a deficiência hídrica anual, em mm; ETP a evapotranspiração potencial anual, em mm.

Utilizando-se os valores dos índices mencionados acima, a classificação climática foi obtida de acordo com a metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955), foi avaliado para todos os municípios através do Software R versão 4.3.0, o tipo climático e o respectivo subtipo conforme as Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Tipos climáticos a partir do índice de umidade (Iu).

Tipos Climáticos	Índice de Umidade (Iu)
A – superúmido	$100 \leq Iu$
B4 – úmido	$80 \leq Iu < 100$
B3 – úmido	$60 \leq Iu < 80$
B2 – úmido	$40 \leq Iu < 60$
B1 – úmido	$20 \leq Iu < 40$
C2 – subúmido	$0 \leq Iu < 20$
C1 – subúmido seco	$-33,33 \leq Iu < 0$
D – semiárido	$-66,7 \leq Iu < -33,3$
E – árido	$-100 \leq Iu < -66,7$

Fonte: Martins *et al.* (2018).

Tabela 2 - Subtipos climáticos, conforme os índices de aridez (Ia) e hídrico (Ih).

Climas úmidos (A, B4, B3, B2, B1 e C2)	Índice de Aridez (Ia)	Climas secos (C1, D e E)	Índice Hídrico (Ih)
r – pequena ou nenhuma deficiência de água	0 – 16,7	d – pequeno ou nenhum excesso de água	0 – 10
s – moderada deficiência no verão	16,7 – 33,33	s – moderado excesso de inverno	10 – 20
w – moderada deficiênciano inverno	16,7 – 33,33	w – moderado excessode verão	10 – 20
s_2 – grande deficiência no verão	> 33,33	s_2 – largo excesso de inverno	20
w_2 – grande deficiência no inverno	> 33,33	w_2 – largo excesso deverão	20

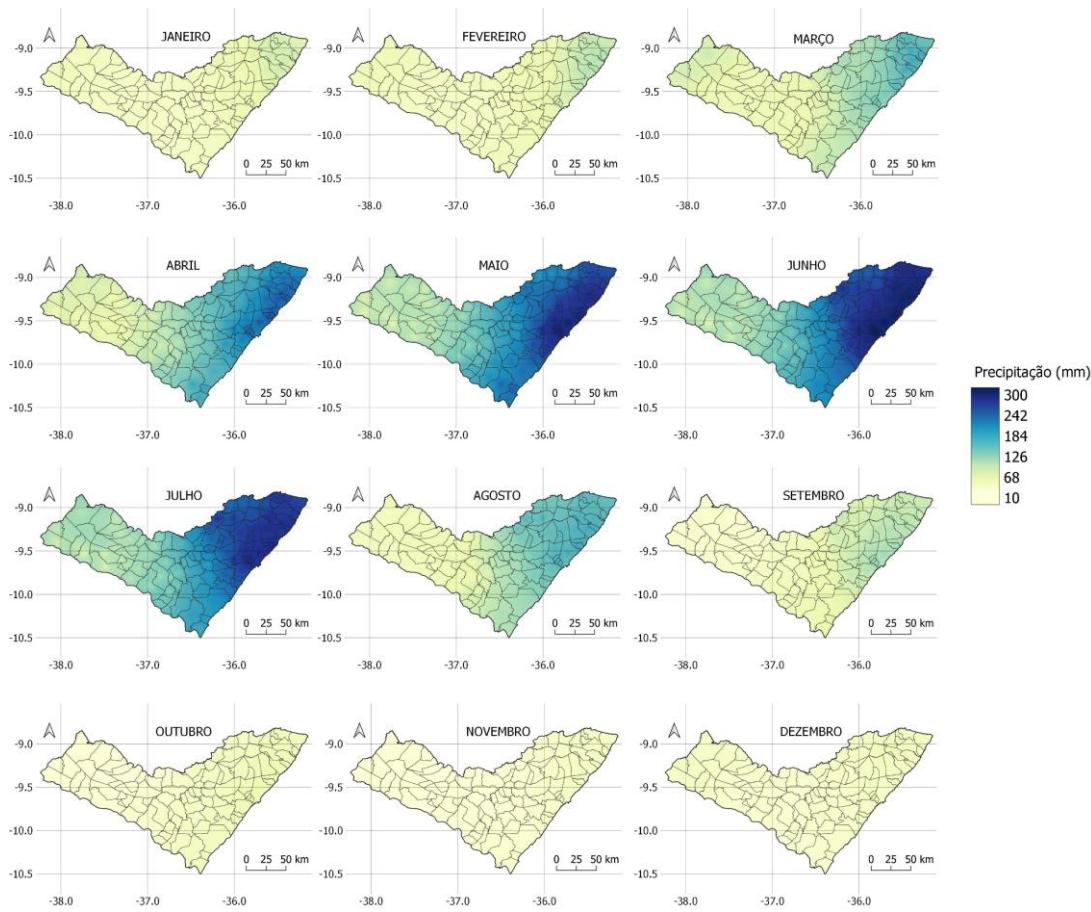
Fonte: Martins *et al.* (2018).

A distribuição espacial e temporal dos dados foram apresentadas utilizando-se o método de interpolação Inverse Distance Weighted (IDW) no software QGIS versão 3.28.15.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verifica-se na Figura 2 a variabilidade dos acumulados médios mensais de precipitação em Alagoas. Observa-se que a distribuição pluvial é irregular, no tempo e no espaço, em todo o estado, com os maiores quantitativos, em média, na faixa litorânea e diminuem em direção ao Sertão. Embora a estação chuvosa tenha, em toda Alagoas, registrado duração em média, entre 4 a 5 meses, sendo os meses de abril a julho os mais chuvosos, entretanto os valores pluviais são espacialmente desiguais. Nesse sentido, por exemplo, destaca-se o mês de junho como o mais chuvoso com média de 253 mm na faixa Leste, 165 mm na faixa de transição (Agreste) e 97 mm no Sertão.

Figura 2 - Distribuição espacial mensal da precipitação para o estado de Alagoas no período de 1961 a 2020.



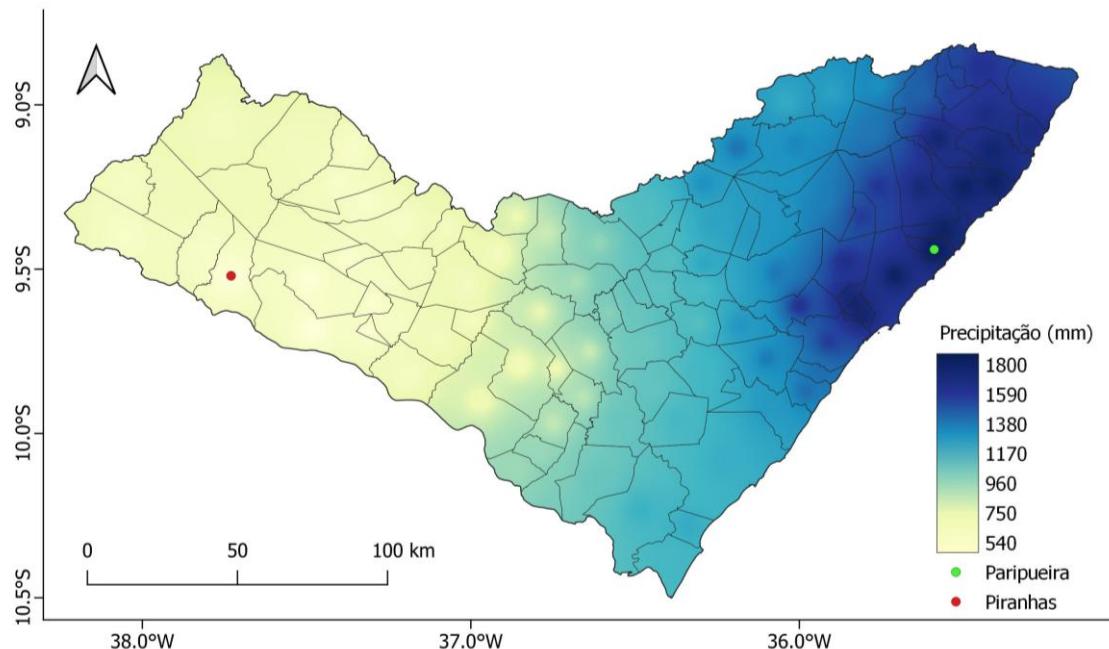
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O período de transição entre a estação chuvosa e a seca (agosto e setembro) é, em média, 25% mais chuvoso do que o período de transição da estação seca para a chuvosa (janeiro a março). Destaca-se que o período mais seco (outubro a dezembro) as médias pluviais para a faixa leste, Agreste e Sertão são respectivamente de 42, 29 e 22 mm. Essas características são climatológicas e, como é propriamente inerente da chuva, apresentam grande variabilidade no tempo e no espaço (Almeida, 2016; Marengo *et al.*, 2017; Cabral Júnior; Lucena, 2020; Rodrigues *et al.*, 2021; Vale *et al.*, 2024). Em alguns anos o período seco pode prolongar-se para até 9 ou 10 meses, principalmente no oeste do estado, região semiárida, cuja característica principal é a elevada irregularidade da precipitação.

Quando se analisa a variabilidade da precipitação anual em Alagoas (Figura 3), observa-se que o nordeste do estado é a área mais chuvosa e no oeste concentra-se os menores valores pluviais. O município mais chuvoso é Paripueira (9.44° S e 35.59° W), que em média acumula

um total $1.800 \text{ mm.ano}^{-1}$, enquanto o município de Piranhas (9.52° S e 37.73° W) é o mais seco com um acumulado de 543 mm.ano^{-1} , uma diferença de 1.257 mm , ou seja, em termos médios, em Piranhas precipita menos de um terço do que chove em Paripueira.

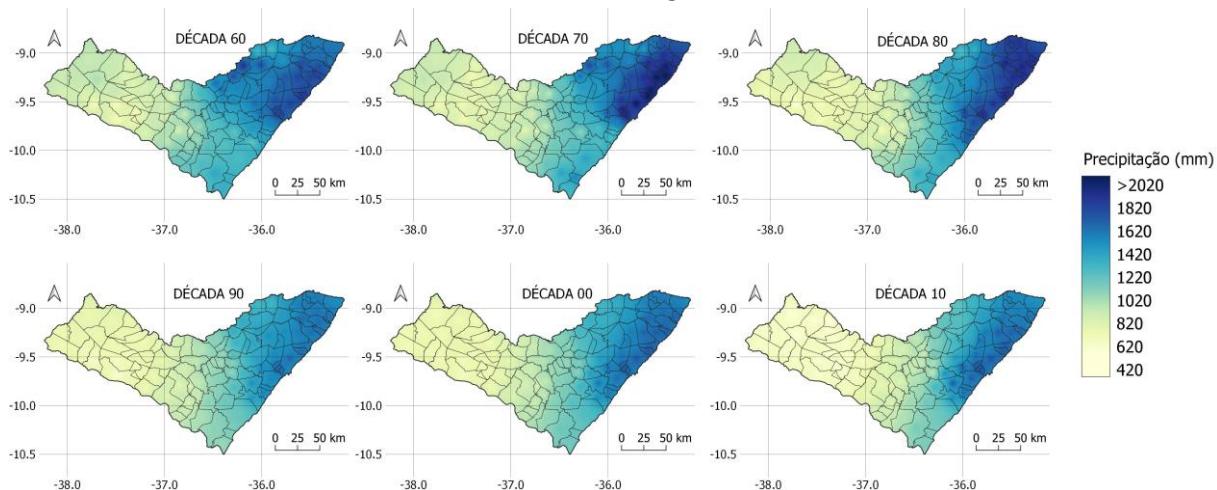
Figura 3 - Distribuição espacial anual da precipitação para o estado de Alagoas no período de 1961 a 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

As elevadas oscilações mensais e anual da PP indicam assimetrias na distribuição espacial e na concentração das chuvas em curtos intervalos de tempo, que reverberam numa desigual disponibilidade hídrica em Alagoas. Em termos da variabilidade pluvial decenal, Figura 4, constata-se que há décadas mais e outras menos chuvosas. A década mais chuvosa foi a de 1960, enquanto a mais seca a de 2010, com valores médios respectivos para todo o estado na ordem de 1.193 e 985 mm.ano^{-1} , com valores médios sempre inferiores e com maior variabilidade na porção oeste de Alagoas.

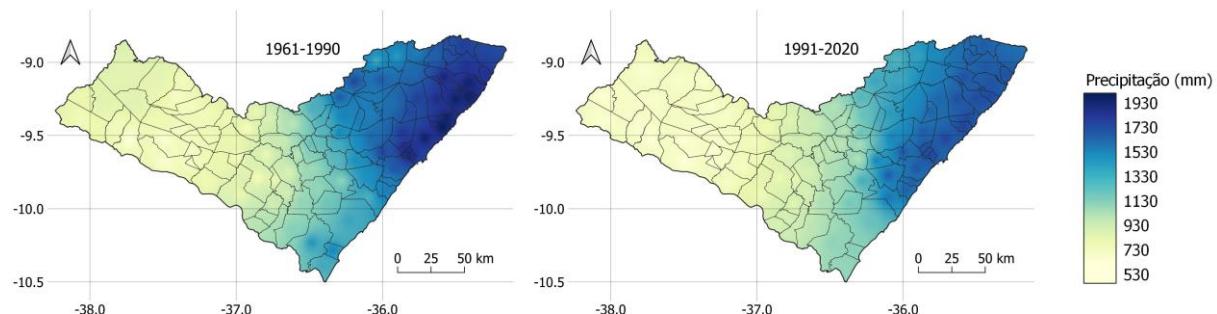
Figura 4 - Distribuição espacial do acumulado anual médio da precipitação, por décadas, para o estado de Alagoas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Análises da PP por normais climatológicas também foram analisadas. Verifica-se na Figura 5 as médias referentes a 2^a e 3^a Normal Climatológica (2^a NC: 1961 a 1990 e 3^a NC: 1991 a 2020). A NC mais recente (1991 a 2020) foi menos chuvosa com uma média de 1.061 mm.ano⁻¹ para todo o estado, enquanto a 2^a NC (1961 a 1990) apresenta maiores valores precipitados, com uma média de 1.166 mm.ano⁻¹, representando uma diferença percentual de aproximadamente 9,9% na pluviosidade entre as normais.

Figura 5 - Distribuição espacial do acumulado anual médio da precipitação, para a segunda (1961 a 1990) e terceira (1991 a 2020) normais climatológicas, para o estado de Alagoas.

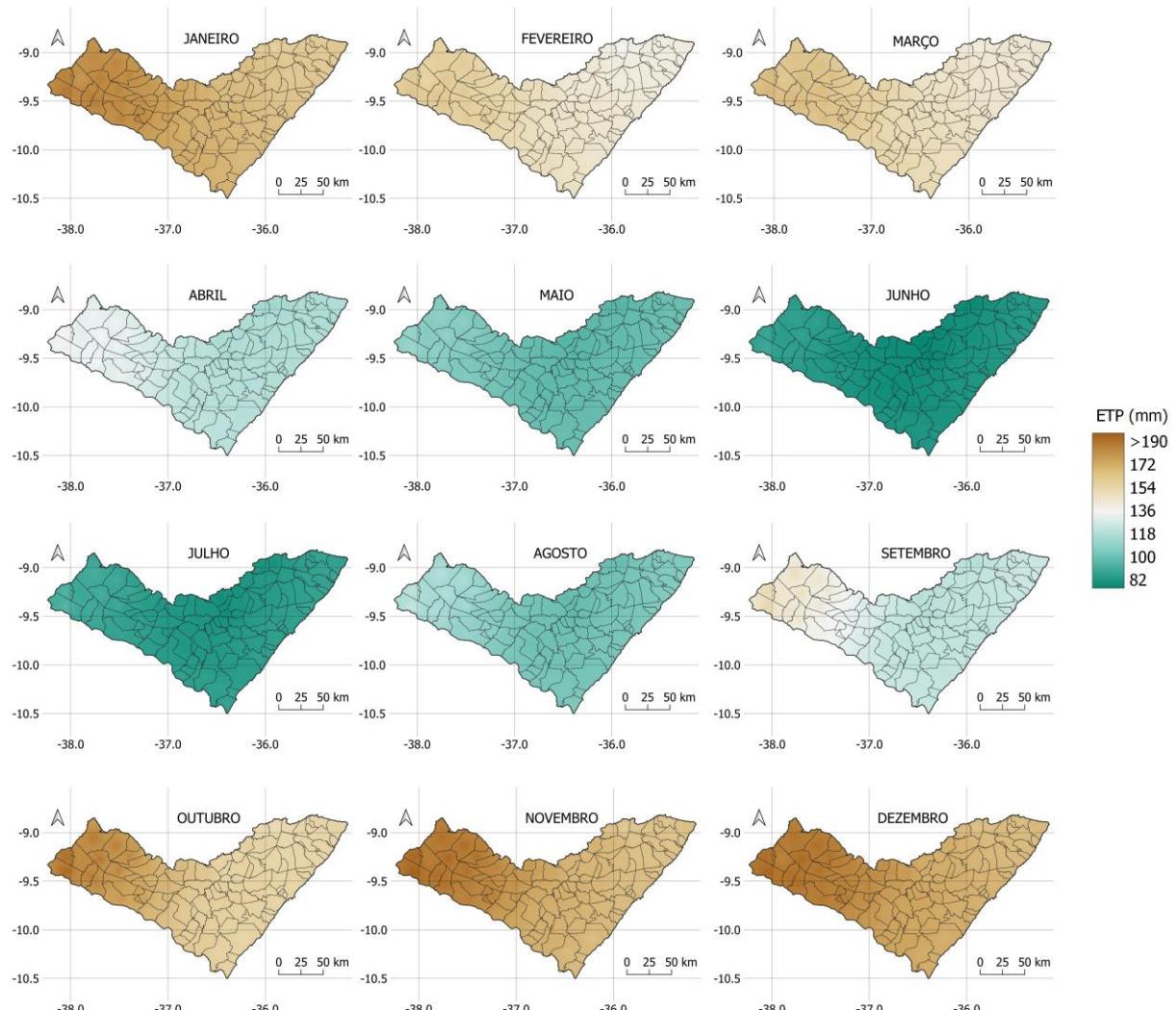


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Na Figura 6 verificou-se, para o estado de Alagoas, que os meses de outubro a março apresentam os maiores valores de ETP, destacando-se o mês de novembro com o maior valor (191 mm) no Sertão de Alagoas. Esse período coincide com as estações de primavera e verão, quando há maior demanda de água para a atmosfera em função da maior disponibilidade de

energia, esse período também coincide com a fase menos chuvosa na maior parte do estado, contribuindo para que o déficit hídrico, no solo e na atmosfera, aumente. Por outro lado, os menores valores de ETP, são observados entre o final do outono e o inverno, maio a agosto, variando de 82 a 125 mm. Esse período além de ser o período do ano com menor disponibilidade de energia, também abrange parte do período chuvoso em Alagoas.

Figura 6 – Variabilidades mensais e da Evapotranspiração potencial para o estado de Alagoas no período de 1961 a 2020.

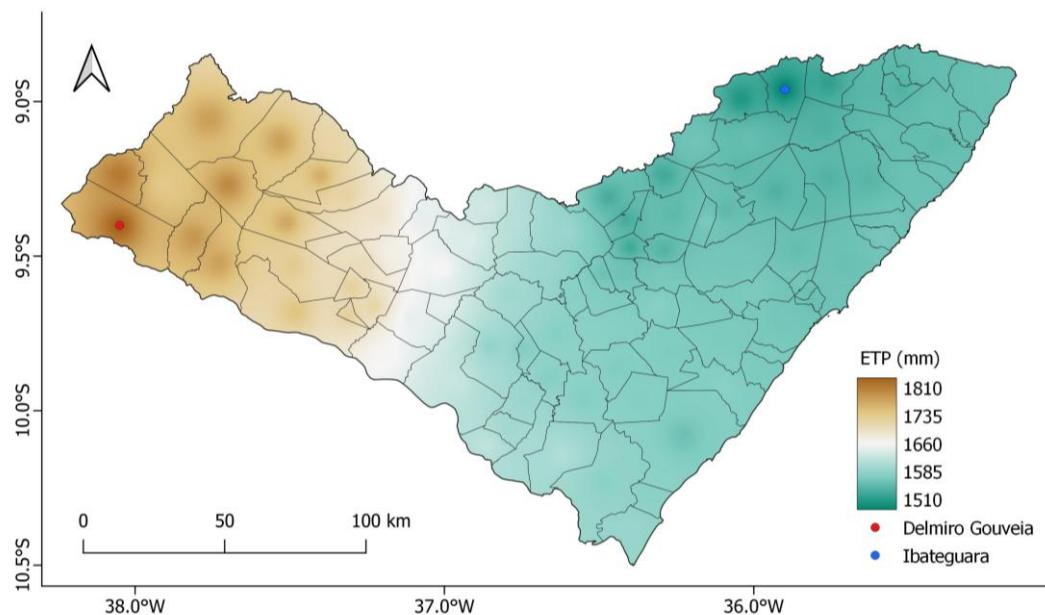


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Em termos anuais (Figura 7), em Alagoas, observa-se que o acumulado anual médio de ETP em Alagoas segue um aumento gradual do leste para o oeste do estado. O município de Delmiro Gouveia (9.40° S e 38.05° W), localizado no semiárido alagoano, apresenta o maior valor de ETP, 1810 mm, enquanto o menor valor foi registrado em Ibataguera (8.96° S e 35.90°

W), 1510 mm, no leste do estado.

Figura 7 - Distribuição anual da Evapotranspiração potencial para o estado de Alagoas no período de 1961 a 2020.

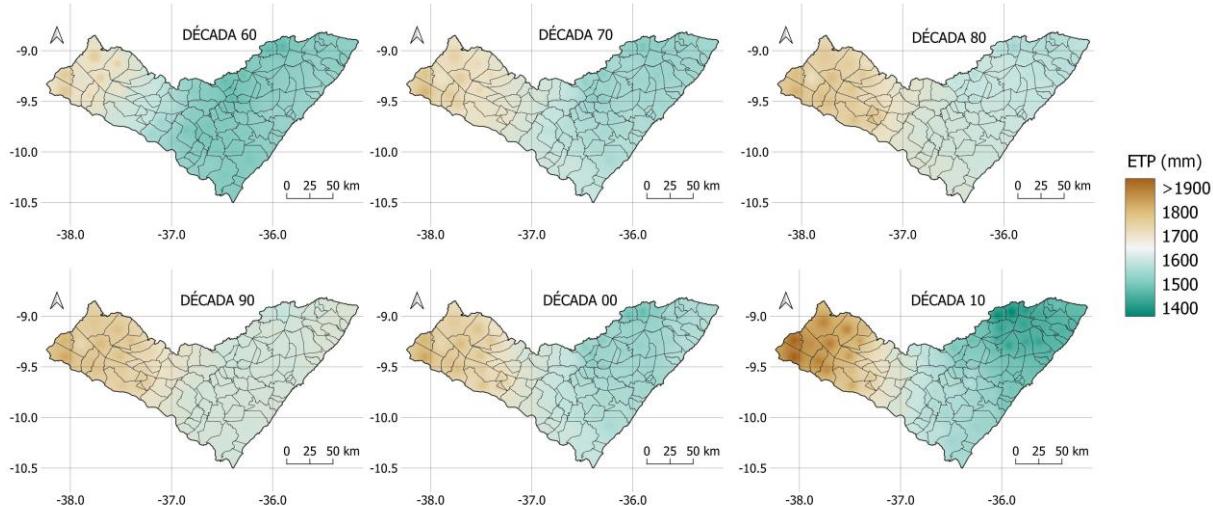


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

As variabilidades mensais e anuais da ETP são justificadas principalmente em função de outras variáveis atmosféricas, como temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e o balanço de energia (solar e terrestre) à superfície, entre outros (Silva *et al.*, 2018; Cabral Júnior *et al.*, 2019; Beruski; Nepomuceno, 2020; Cabral Júnior *et al.*, 2021; Zomer; Xu; Trabucco, 2022; Sabino; Souza, 2023).

Análises das médias da ETP, por décadas, também foram realizadas. Observa-se na Figura 8, um sequenciamento cronológico crescente da ETP, exceto na década de 2000, para a porção leste, que obteve uma leve diminuição. Nesse sentido, para todo o estado a década de 60 registrou a menor média (1.565 mm/ano/década) e a década de 90 a maior (com 1.664 mm/ano/década), embora que a oeste a ETP registre sempre os maiores valores da série temporal (médias maiores que 1.900 mm) comparado a região leste (médias inferiores a 1.650 mm).

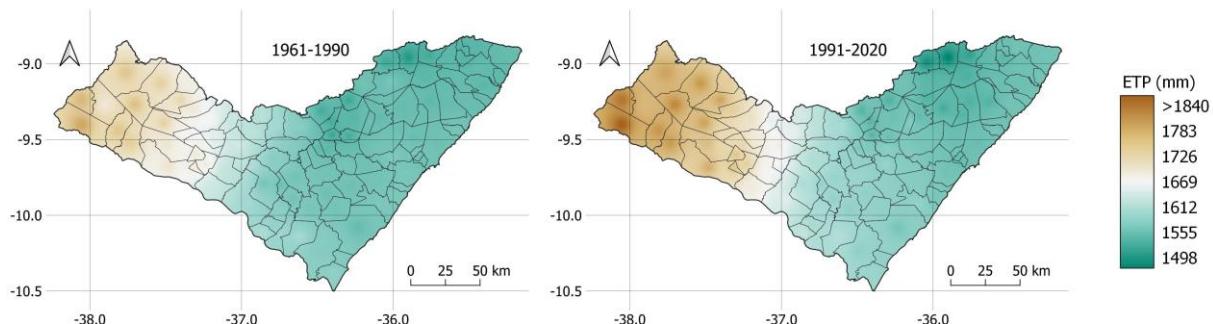
Figura 8 – Variabilidades espacial e temporal da Evapotranspiração potencial, por décadas, para o estado de Alagoas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Na Figura 9 é identificada a variabilidade da ETP por normais climatológicas de Alagoas, 1961 a 1990 e 1991 a 2020, observa-se um acréscimo da primeira para segunda normal, em termos de intensidade (aumento médio de 50 mm) e expansão da área com valores de ETP superiores a 1.650 mm, especialmente isso ocorreu no Sertão do estado.

Figura 9 - Distribuição espacial do acumulado anual médio da Evapotranspiração potencial, para a segunda (1961 a 1990) e terceira (1991 a 2020) normais climatológicas, para o estado de Alagoas.



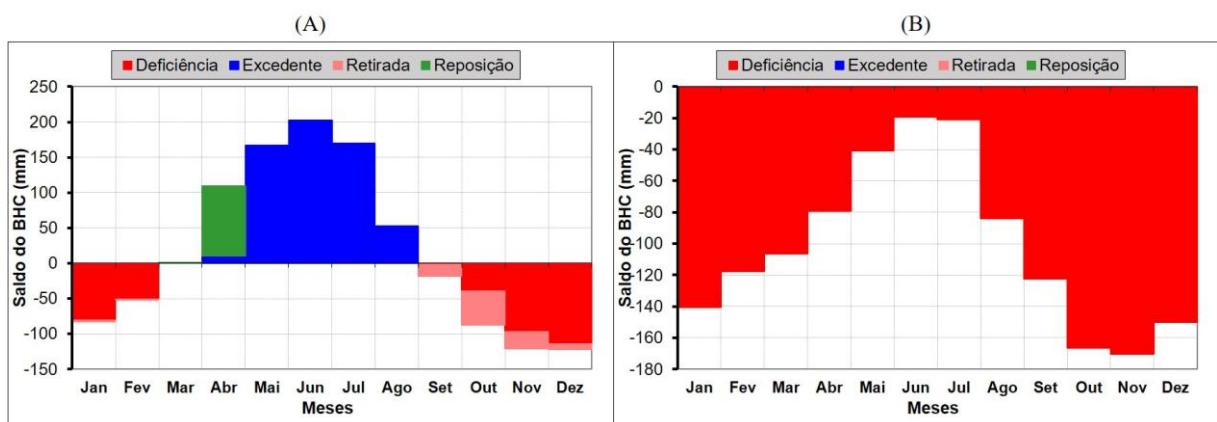
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O aumento na temperatura média do ar tem contribuído para aumento da ET_0 (Cabral Júnior *et al.*, 2019). Silva *et al.* (2023) encontraram tendências de aumento da temperatura do ar para todo o estado de Alagoas, com destaque para o semiárido alagoano, que por sua vez pode ter contribuído para intensificação do aumento da ETP, no tempo e no espaço, e que podem estar intensificando registros de secas, conforme foi previsto por Marengo *et al.* (2017)

e identificado em algumas áreas do NEB por Barbosa (2024) uma mudança do clima semiárido para o árido.

O cômputo do balanço hídrico para duas localidades com características desiguais de PP e ETP, ou seja, um situado na porção leste (município de Paripueira) e outro no Sertão de Alagoas (Piranhas) foi analisado. Na Figura 10, nota-se que em Paripueira (Figura 10A) o período de excedente e de deficiência hídrica duram em média 5 meses (abril a agosto e outubro a fevereiro, respectivamente), sendo o mês de junho o que possui maior excesso (202 mm). Por outro lado, a reposição de água ocorre no início da estação chuvosa (março e abril) e a retirada de água no solo no início da estação seca, cuja deficiência aparece a partir do mês de outubro.

Figura 10 - Balanço hídrico climático médio mensal para duas áreas distintas de Alagoas: leste do estado, Paripueira (A) e Sertão, Piranhas (B). Período: 1961 a 2020.



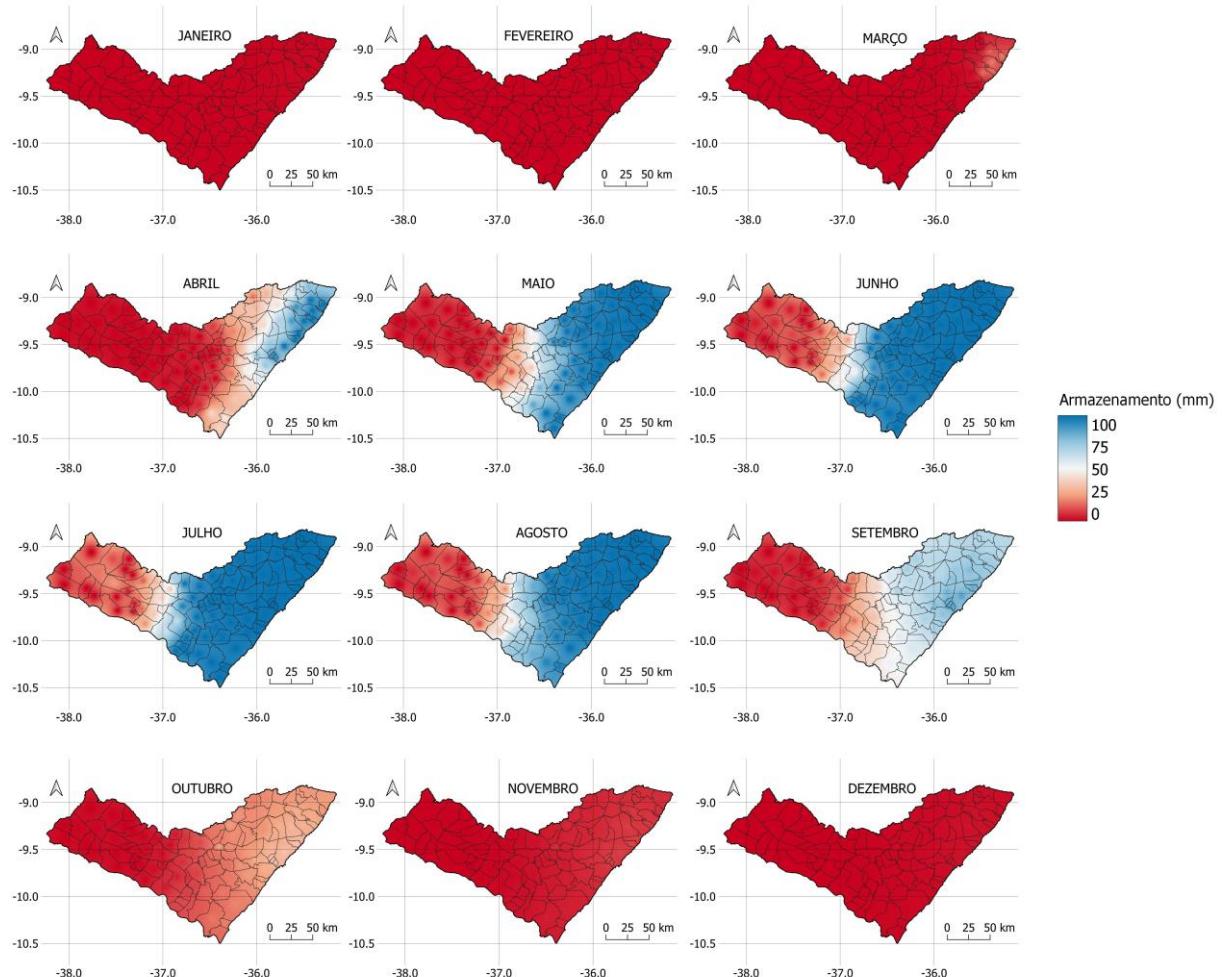
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Em contrapartida, o BHC para o município de Piranhas (Figura 10B) não apresenta, em média, excesso hídrico, os déficits, por sua vez, são expressivos na maioria dos meses, com um acumulado médio anual de 1218 mm. Esse saldo negativo é justificado pelo fato de que os valores pluviais são, em média, sempre inferiores a ETP durante todos os meses do ano, embora com grande irregularidade no tempo e no espaço. Portanto, a possibilidade de ocorrer excesso hídrico nessa localidade (Sertão de Alagoas) ocorre quando as anomalias de precipitação superam às médias pluviais esperadas, especialmente na curta estação chuvosa.

As contabilizações e distribuições do Armazenamento de água no solo (ARM), Excedente (EXC) e Déficit hídrico (DEF), para todo o estado alagoano, foram analisados e são

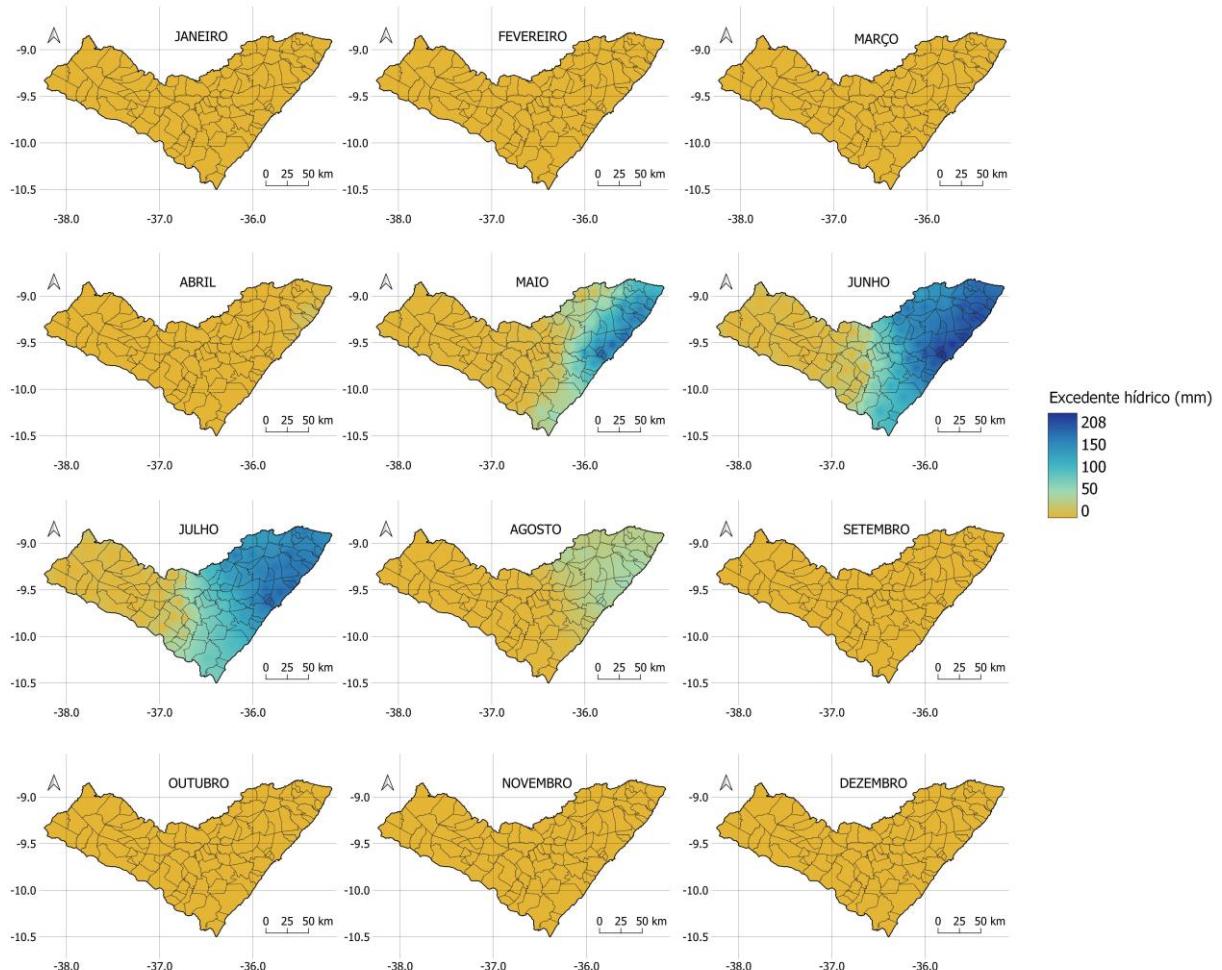
demonstrados nas Figuras 11, 12 e 13, sucessivamente. Nota-se, na Figura 11, que entre os meses de novembro a março o ARM é praticamente nulo e entre os meses de maio a agosto constam os valores máximos, com maiores concentrações no leste do estado, onde as precipitações são mais intensas. Consequentemente os meses de maiores armazenamentos apresentaram EXC (maio a agosto), Figura 12, entretanto, com elevada variação espacial e temporal. Por outro lado, conforme foi mencionado, armazenamento hídrico é insuficiente à demanda do solo durante 5 meses (novembro a março), isso incide em DEF verificada na Figura 13.

Figura 11 - Distribuição espacial mensal do armazenamento de água no solo para o estado de Alagoas no período de 1961 a 2020.



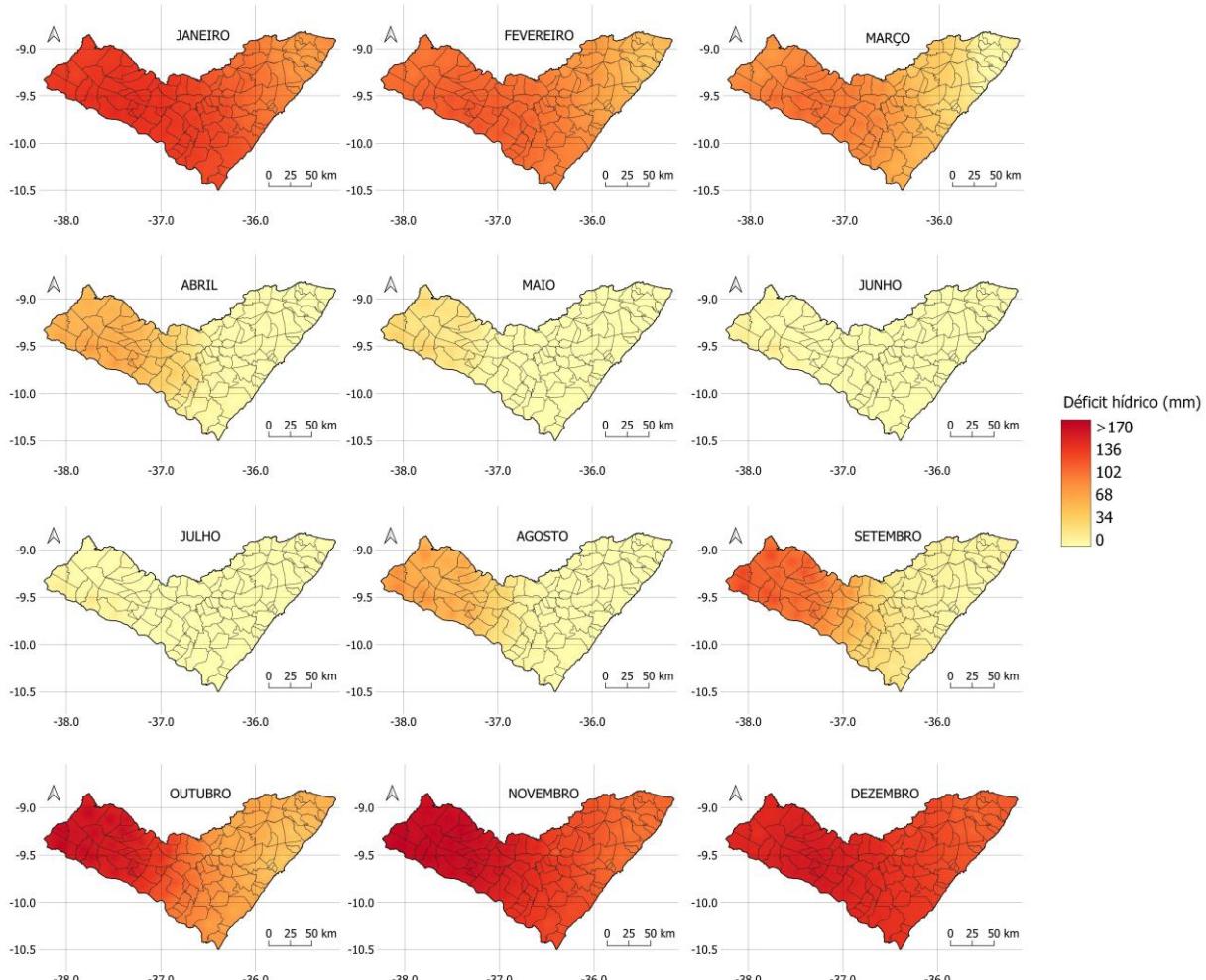
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Figura 12 - Distribuição espacial mensal do excedente hídrico para o estado de Alagoas no período de 1961 a 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Figura 13 - Distribuição espacial mensal do déficit hídrico para o estado de Alagoas no período de 1961 a 2020.



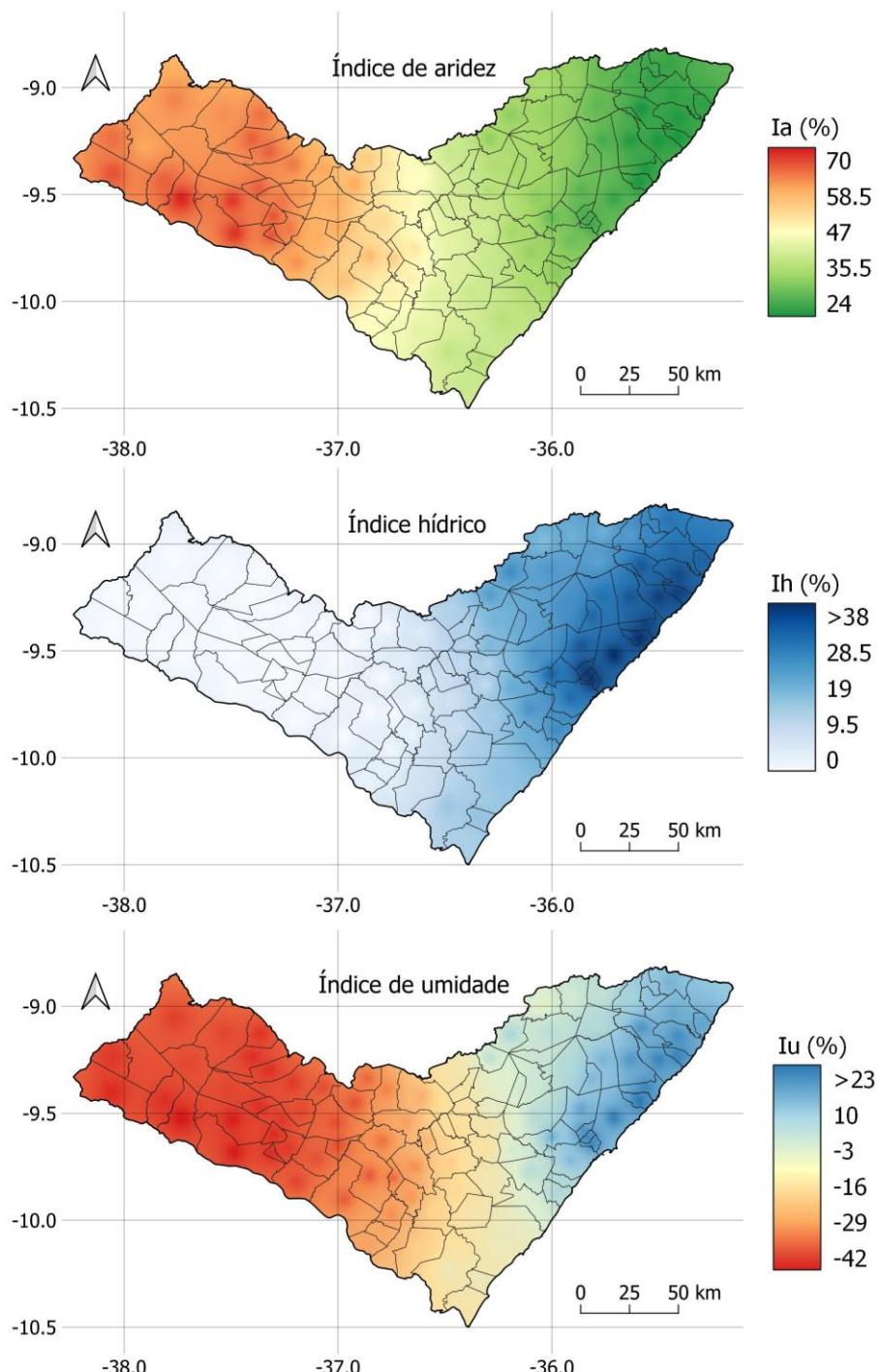
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os principais sistemas meteorológicos que influenciam na precipitação e, consequentemente, no BHC do estado de Alagoas são a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) (Molian; Bernardo, 2002; Silva *et al.*, 2011; Lyra *et al.*, 2014; Reboita *et al.*, 2016). Além desses, destacam-se os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), caracterizados por nuvens convectivas que se deslocam de leste a oeste nos oceanos (Gomes *et al.*, 2019; Hollis *et al.*, 2024), atingindo a costa leste do NEB, exercendo um papel importante durante a estação chuvosa, e as fases do El Niño Oscilação Sul (ENOS), Santos *et al.* (2023) encontraram alta variabilidade interanual na precipitação em Alagoas devido às fases extremas do ENOS.

A Figura 14 apresenta a espacialização dos índices de aridez (Ia), hídrico (Ih) e de

umidade (I_u), para aridez os maiores percentuais estão no oeste do estado, enquanto para a disponibilidade hídrica ocorre o inverso com os maiores índices localizados no leste, desta forma o índice de umidade é deficitário em toda porção oeste, atingindo -42%, e positivo na maior parte do leste, com percentuais acima de 23%.

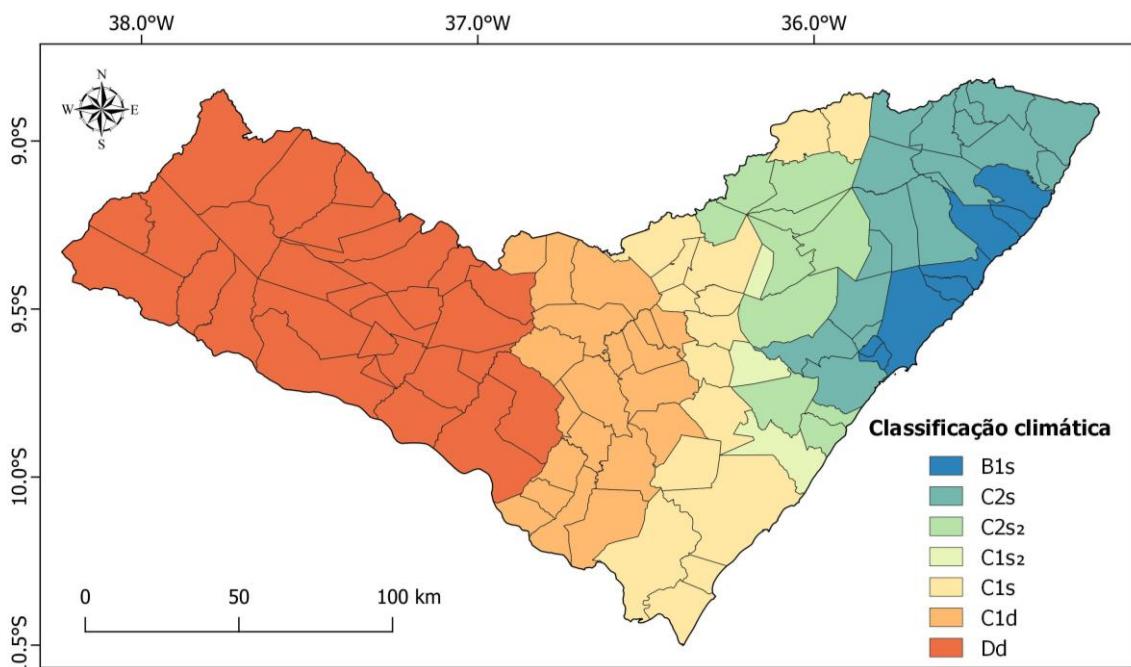
Figura 14 - Índices de aridez, hídrico e de umidade para o estado de Alagoas no período de 1961 a 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A partir da determinação de I_a , I_h e I_u , foi possível realizar a classificação climática (Figura 15), de acordo com a metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), e identificar que o estado de Alagoas possui 4 tipos climáticos B1, C1, C2 e D, que formam 7 fórmulas climáticas quando classificadas as subdivisões, que são: B1s - úmido com moderada deficiência, C2s - sub-úmido com moderada deficiência no verão, C2s₂ - sub-úmido com grande deficiência no verão, C1s₂ - sub-úmido seco com grande excesso hídrico no inverno, C1s - sub-úmido seco com moderado excesso hídrico no inverno, C1d - sub-úmido seco com pequeno ou nenhum excesso hídrico e Dd - semiárido com pequeno ou nenhum excesso hídrico, respectivamente distribuídos do leste para o oeste do estado.

Figura 15 - Classificação climática de Thornthwaite e Mather (1955) para o estado de Alagoas, período de 1961 a 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os resultados encontrados corroboram com diversos trabalhos que têm especializado as condições hidroclimatológicas na região do NEB, região essa que é afetada pela irregularidade espacial e temporal da precipitação (Medeiros *et al.*, 2021) e por elevados valores de Evapotranspiração de Referência (ET_0) (Cabral Júnior; Bezerra, 2018; Rocha Júnior *et al.*, 2020), principalmente na porção semiárida, no qual os valores mais elevados de aridez

são observados. Por outro lado, a faixa leste que apresenta maior quantidade e intensidade pluvial (Lyra *et al.*, 2014; Cabral Júnior; Silva, 2020), possui concentração de excedentes hídricos no inverno e é associada a desastres naturais (Santos *et al.*, 2019; Silva Júnior *et al.*, 2022). Nessas regiões, a maior frequência, intensidade e excessos pluviais elevam o risco de alagamentos, enchentes e deslizamento de solo que também ocasionam problemas econômicos e sociais relevantes (Santos *et al.*, 2010; Rodrigues *et al.*, 2020).

Estudos realizados por Araújo *et al.* (2019) e Silva *et al.* (2022) para os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, respectivamente, detectaram menores valores de precipitação, altas taxas de ETP e áreas com clima semiárido no interior desses estados. Aparecido *et al.* (2022), para todo o NEB, encontraram padrão semelhante, em especial no estado de Alagoas com altos valores de ETP e DEF no oeste (semiárido) e elevado ARM e EXC na região costeira. Conforme Vale *et al.* (2024), tais informações são essenciais para a melhoria do rendimento das culturas no NEB.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados encontrados para o estado de Alagoas, conclui-se que:

1. A distribuição da precipitação é irregular e o período chuvoso ocorre entre abril e julho e o período mais seco entre outubro e dezembro;
2. No período mais chuvoso, a ETP é menor, por outro lado no período mais seco a ETP obtém os maiores valores;
3. A porção leste do estado é a mais chuvosa, enquanto a porção oeste é a mais seca e com maiores valores de ETP;
4. Os excessos hídricos são mais expressivos no inverno (JJA), quando superam 200 mm/mês, em contrapartida no verão (DJF) os déficits hídricos superam 170 mm/mês;
6. A década (2010) e a Normal Climatológica (1961 a 2020), mais recentes, foram menos chuvosas e com maior ETP, o que potencializou o aumento de deficiências hídricas;
5. O estado de Alagoas possui 4 tipos climáticos de acordo com a metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), predominando a leste os climas úmido e sub-úmido, e a oeste os climas sub-úmido seco e semiárido.

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). Os dois autores agradecem, pelo apoio e fomento à pesquisa, à FAPEAL (edital 003/2022) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Chamada CNPq/MCTI Nº 10/2023). Ampliamos também os nossos agradecimentos aos avaliadores, pelo tempo que dispuseram para avaliar o trabalho e sugerirem valiosas contribuições. Reconhecemos significativamente a relevância do trabalho voluntário de toda a equipe da RBCLima.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, H. A. **Climatologia Aplicada à Geografia**, 2. ed.; ADUEPB: Campina Grande, Brasil, 2016. 317 p.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n. 1, p. 711-728, 2013.
- APARECIDO, L. E. O. *et al.* Soil water seasonal and spatial variability in Northeast Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 24, n. 5, p. 6136-6152, 2022.
- ARAÚJO, S. R. D; DANTAS NETO, J.; SILVA, P. F.; ARAÚJO, B. A.; SABOYA, L. M. F.; MATOS, R. M. Balanço hídrico e classificação climática para as mesorregiões da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 6, p. 1985-1997, jan. 2019.
- BARBOSA, H. A. Understanding the rapid increase in drought stress and its connections with climate desertification since the early 1990s over the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, v. 222, p. 105142, 2024.
- BERUSKI, G. C.; NEPOMUCENO, Y. C. Estimação da evapotranspiração potencial sob distintas condições de referências para determinação do consumo hídrico da soja e milho. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 864-882, 2020.
- BRÉDA, J. P. L. F. *et al.* Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. **Climatic Change**, v. 159, n. 4, p. 503-522, 2020.

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, jul. 2018.

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

CABRAL JUNIOR, J. B.; LUCENA, R. L. Analysis of precipitation using Mann-Kendall and Kruskal-Wallis non-parametric tests. **Mercator**, Fortaleza, v. 19, n. 1, p. 1-14, 2020.

CABRAL JÚNIOR, J. B.; SILVA, C. M. S.; ALMEIDA, H. A.; BEZERRA, B. G.; SPYRIDES, M. H. C. Detecting linear trend of reference evapotranspiration in irrigated farming areas in Brazil's semiarid region. **Theoretical And Applied Climatology**, v. 138, 2019.

CABRAL JÚNIOR, J. B.; SILVA, H. J. F. Classificação climática e repercussões ambientais no estado de Alagoas, Brasil. In: NUNES, A. B.; MARIANO, G. L. (orgs.). **Meteorologia em Tópicos**. 1. ed. Maceió: Clube dos Autores, 2020. p. 288-324.

CASSETTARI, G. A.; QUEIROZ, T. M. Balanço hídrico e classificação climática na bacia do rio Jauquara, região de transição entre o Cerrado e Amazônia brasileira. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 70-88, fev. 2020.

COSTA, R. L. *et al.* Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather Clim Extrem**, v. 28, p. 1-21, 2020.

FISHER, J. B.; WHITTAKER, R. H.; MALHI, Y. ET Come Home: A critical evaluation of the use of evapotranspiration in geographical ecology. **Global Ecology and Biogeography**, v. 20, n. 1, p. 1-18, 2011.

GOMES, H. B. *et al.* Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. **Climate Dynamics**, v. 53, p. 1393-1411, 2019.

HOLLIS, M. A. *et al.* A global climatology of tropical easterly waves. **Climate Dynamics**, v. 62, n. 3, p. 2317-2332, 2024.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil**: compatível com a escala 1:250.000. 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE. 2019. 164 p.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Brasil**: panorama. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>. Acesso em: 30 ago. 2023.

LIU, X.; ZHANG, D.; LUO, Y.; LIU, C. Spatial and temporal changes in aridity index in northwest China: 1960 to 2010. **Theoretical and applied climatology**, v. 112, n. 1-2, p. 307-316, 2013.

LUCAS, P. de O. *et al.* Reference evapotranspiration time series forecasting with ensemble of convolutional neural networks. **Computers and electronics in agriculture**, v. 177, n. 1, p. 1-15, out. 2020.

LYRA, G. B.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; ZERI, L. M. M. 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.

MARCUZZO, F. F. N. Bacias hidrográficas e regiões hidrográficas do Brasil: cálculo de áreas, diferenças e considerações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais[...]**. Florianópolis: ABRH, 2017. p. 1-8.

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, p. 103-115, 2015.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2017.

MARTINS, F. B. et al. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, p. 129-156, nov. 2018.

MEDEIROS, F. J.; OLIVEIRA, C. P.; GOMES, R. S.; SILVA, M. L.; CABRAL JÚNIOR, J. B. Hydrometeorological conditions in the semiarid and east coast regions of Northeast Brazil in the 2012-2017 period. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, p. 1-15, 2021.

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

MUTTI, P. R. et al. Assessment of gridded CRU TS data for long-term climatic water balance monitoring over the São Francisco Watershed, Brazil. **Atmosphere**, v. 11, n. 11, p. 1207, 2020.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. et al. Wet and dry periods in the state of Alagoas (Northeast Brazil) via Standardized Precipitation Index. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 224, p. 105746, 2021.

REBOITA, M. S. et al. Causas da semi-aridez do sertão nordestino. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, p. 254-277, 2016.

REFATI, D. C. et al. Influence of drought and anthropogenic pressures on land use and land cover change in the brazilian semiarid region. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 126, p. 104362, 2023.

ROCHA JÚNIOR, R. L. et al. Mudança de Longo Prazo e Regionalização da Evapotranspiração de Referência no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 891-902, 2020.

RODRIGUES, A. L. et al. Balanço hídrico climatológico e estudo da disponibilidade hídrica do reservatório da barragem de Santa Cruz para o município de Guanhães/MG-Brasil. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 6, p. e48911629238-e48911629238, 2022.

RODRIGUES, D. T. *et al.* Spatial distribution of the level of return of extreme precipitation events in Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 12, p. 5098-5113, 2020.

RODRIGUES, D. T. *et al.* Evaluation of the Integrated Multi-SatellitE Retrievals for the Global Precipitation Measurement (IMERG) Product in the São Francisco Basin (Brazil). **Water**, v. 13, p. 1-12, 2021.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

SABINO, M.; SOUZA, A. P. Global Sensitivity of Penman-Monteith Reference Evapotranspiration to Climatic Variables in Mato Grosso, Brazil. **Earth**, v. 4, n. 3, p. 714-727, 2023.

SANTOS, D. L. *et al.* Limiar de precipitação com potencial de gerar deslizamentos nos complexos de risco em uma zona urbana. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 16, n. 2019, 2019.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER N. P.; OLIVEIRA, L. F. C de. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.2, p.115–123, 2010.

SANTOS, J. S. *et al.* Effects of extreme phases of El Niño–Southern Oscillation on rainfall extremes in Alagoas, Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 43, n. 16, p. 7700-7721, 2023.

SILVA, A. D. G. *et al.* Balanço hídrico climatológico e classificação climática do estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 30, p. 798-816, 2022.

SILVA, B. F. P. *et al.* Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 323-338, 2011.

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. 01, p. 028-043, 2018.

SILVA, J. S.; CABRAL JÚNIOR, J. B.; RODRIGUES, D. T.; SILVA, F. D. S. Climatology and significant trends in air temperature in Alagoas, Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 151, p. 1-20, 2023.

SILVA JUNIOR, R. S. *et al.* Avaliação de eventos extremos de precipitação, associados a desastres naturais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 6, p. 2755–2767, 2022.

SOUZA, S. O. *et al.* Balanço hídrico da bacia hidrográfica do Rio Caravelas (BA) como subsídio ao planejamento agrícola. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 1, p. 83-92, 2014.

TAVARES, P. S. *et al.* Water balance components and climate extremes over Brazil under 1.5 C and 2.0 C of global warming scenarios. **Regional Environmental Change**, v. 23, n. 1, p. 40, 2023.

THORNTWHAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. 1. ed. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

THORNTWHAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

TIBURCIO, I. M. *et al.* Balanço Hídrico e Mudanças Climáticas no Semiárido Pernambucano: aplicabilidade do Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco (SUPer). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1657-1670, 2023.

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.

VILLA, B. *et al.* Balanço hídrico climatológico: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, p. e50211626669-e50211626669, 2022.

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.

ZHAO, M. *et al.* Evapotranspiration frequently increases during droughts. **Nature Climate Change**, v. 12, n. 11, p. 1024-1030, 2022.

ZOMER, R. J.; XU, J.; TRABUCCO, A. Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database. **Scientific Data**, v. 9, n. 1, p. 409, 2022.