



Variabilidade espaço-temporal das chuvas em função de índices climáticos na mesorregião leste do Maranhão, Brasil

Andreza Maciel de Sousa¹, Wellington Cruz Correa², Aldair de Souza Medeiros³, Plínio Antonio Guerra Filho⁴, Marcus Willame Lopes Carvalho⁵, Nítalo André Farias Machado⁶

¹ Bacharel em Engenharia Agrícola, Mestranda em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de Chapadinda, Chapadinda, Maranhão, 65500-000, Brasil, andreza.maci@discente.ufma.br (autor correspondente). ² Bacharel em Engenharia Agrícola, Mestrando em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de Chapadinda, Chapadinda, Maranhão, 65500-000, Brasil, wellington.cruz@discente.ufma.br. ³ Dr. em Agronomia, Professor nos Programas de Pós-Graduação na Rede BIONORTE e em Biodiversidade e Conservação, ambos na Universidade Federal do Maranhão, aldair.medeiros@ufma.br. ⁴ Dr. em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Professor Adjunto do Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de Chapadinda, Chapadinda, Maranhão, 65500-000, Brasil. ⁵ Dr. em Agronomia, Professor Adjunto do Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de Chapadinda, Chapadinda, Maranhão, 65500-000, Brasil. ⁶ Dr. em Engenharia Agrícola, Professor Adjunto do Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de Chapadinda, Chapadinda, Maranhão, 65500-000, Brasil.

Artigo recebido em 31/05/2024 e aceito em 12/11/2024

RESUMO

O clima global passa por constantes modificações, sobretudo nas últimas décadas, em função do efeito estufa antrópico, o que tem influenciado os ecossistemas ambientais, e o planejamento de atividades agropecuárias e socioeconômicas. Dessa forma, objetivou-se analisar a variabilidade espaço-temporal das chuvas na mesorregião leste do Maranhão, e a ocorrência de eventos extremos no período de 1991 a 2020 utilizando os índices Anomalia de Chuva (IAC) e Anomalia de Precipitação Padronizada (APP). Os dados de precipitação foram obtidos pela Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) no período de 30 anos de anos em 20 estações e mais três estações convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A precipitação mensal e anual foi espacializada a partir do método da distância inversa ponderada. Posteriormente, utilizou-se os dados pluviométricos para calcular os índices IAC e APP, com o intuito de compreender a variabilidade pluviométrica, identificar os períodos úmidos e secos. Os resultados obtidos indicam anos secos nos períodos de 1991-1993 e 2012-2016, em contrapartida, no ano de 2008 registrou-se anomalias positivas em grande maioria das estações do leste do Maranhão, sendo associadas aos fenômenos El Niño e La Niña no Nordeste do Brasil. A utilização do IAC e APP para análise eventos de extremos, permitiu a obtenção de informações que auxiliam na tomada de decisões, especialmente em setores mais sensíveis ao clima, como o abastecimento de água, geração de energia e agricultura.

Palavras-chave: Anomalia de Precipitação Padronizada. Índice de Anomalia de Chuva. Precipitação pluvial.

Spatio-temporal variability of rainfall as a function of climatic indices in the eastern mesoregion of Maranhão, Brazil

ABSTRACT

The global climate has undergone constant changes, especially in recent decades, due to anthropogenic greenhouse effects, which have influenced environmental ecosystems and the planning of agricultural and socioeconomic activities. Thus, the objective was to analyze the spatiotemporal variability of rainfall in the eastern mesoregion of Maranhão and the occurrence of extreme events from 1991 to 2020, using the Rainfall Anomaly Index (RAI) and the Standardized Precipitation Anomaly (SPA). Precipitation data were obtained from the National Water and Basic Sanitation Agency (ANA) over a 30-year period from 20 stations, along with data from three conventional stations of the National Institute of Meteorology (INMET). Monthly and annual precipitation was spatialized using the inverse distance weighting method. Subsequently, rainfall data were used to calculate the RAI and SPA indices to understand rainfall variability and identify wet and dry periods. The results indicate dry years in the periods from 1991-1993 and 2012-2016. In contrast, positive anomalies were recorded in most stations in eastern Maranhão in 2008, associated with the El Niño and La Niña phenomena in Northeast Brazil. The use of the RAI and SPA for analyzing extreme events provided

information that aids in decision-making, especially in sectors more sensitive to climate, such as water supply, energy generation, and agriculture.

Keywords: Standardized Rainfall Anomaly. Rainfall Anomaly Index. Rainfall.

Introdução

O clima do planeta passa por contínuas transformações devido à dinâmica natural e o aumento das atividades humanas (Silva et al., 2022). Neste aspecto, desde a revolução industrial (1850-1900), as emissões de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera aumentaram exponencialmente devido a queima de combustíveis fósseis, mudanças no uso e ocupação da terra, processos industriais, etc. (Medeiros, Santos & Maia, 2022; Duan et al., 2022). Essas concentrações de GEE potenciaram o fenômeno das mudanças climáticas globais (Medeiros, Cesário & Maia, 2023; Duan et al., 2022), afetando diretamente os sistemas ambientais e socioeconômicos, comprometendo a disponibilidade hídrica e contribuindo para eventos extremos como desmoronamento de encostas, secas prolongadas, inundações e alterações nas estações do ano (Brasil Neto et al., 2021; Nery & Siqueira, 2021; Duan et al., 2022; Medeiros & Oliveira, 2022), gerando impactos na segurança alimentar e hídrica, na sustentabilidade dos recursos naturais e na qualidade de vida humana.

Neste sentido, a irregularidade temporal e espacial das precipitações pluviométricas, acompanhadas por temperaturas elevadas e altas taxas de evapotranspiração, são aspectos que se destacam na região Nordeste brasileira, que abriga os estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, e é uma das regiões de terras mais secas (região semiárida) e densamente populosas do mundo (Medeiros & Oliveira, 2021; Medeiros & Oliveira, 2022; Medeiros, Lima & Santos, 2023; Silva et al., 2023). De acordo com Santos et al. (2024b), os estados do Maranhão, Piauí, Pernambuco e Bahia são regiões com secas moderadas, severas e extremas. No Maranhão, especialmente na região leste Maranhense, os padrões de precipitação favorecem a ocorrência de eventos extremos, influenciados por fatores fisiográficos e diversos sistemas atmosféricos (Brasil Neto et al., 2021; Brito et al., 2021; Sales et al., 2024; Carvalho et al., 2023; Silva et al., 2023). Esses fatores influenciam diversos aspectos relacionados a produção de alimentos, como por exemplo, o planejamento das safras, diminuição significativa da matéria orgânica do solo, redução da produtividade em regime de sequeiro, aumento dos custos nas safras em função da necessidade de sistemas de irrigação, etc. (Malik et al., 2021; Yang

et al., 2021; Jiang et al., 2022; Silva et al., 2023; Medeiros et al., 2023; Wang et al., 2023).

Portanto, diante deste cenário, o monitoramento do regime pluviométrico é útil por diversos aspectos, dentre eles, o planejamento no fornecimento de água em grandes, médios e pequenos municípios que dependem em sua grande maioria das chuvas para a reposição dos níveis dos rios ou do volume acumulado em barragens distribuídas na região Nordeste (Brito et al., 2021). Além disso, esse monitoramento é necessário para a produção agrícola, tanto nas áreas que produzem sob o regime de sequeiro quanto por irrigação, visto que necessitam diretamente da regularidade das precipitações pluviométricas (Nery & Siqueira, 2021; Sales et al., 2024).

Neste contexto, a compreensão das características climáticas da paisagem é essencial para o planejamento das atividades humanas, sobretudo a dinâmica espacial e temporal das chuvas de uma região. Sendo assim, é premente a necessidade do monitoramento de períodos de seca, que pode ser efetuado mediante a utilização de índices específicos direcionados a análise dos condicionantes climáticos, viabilizando, por conseguinte, a formulação de políticas públicas direcionadas, principalmente a gestão das condições semiáridas (Carvalho et al., 2023; Bewket et al., 2024).

De acordo com Pinto et al. (2022), muitos indicadores de anomalia de precipitação foram desenvolvidos e ajustados ao longo do tempo, com a finalidade de mensurar os aspectos climatológicos de uma determinada região. Dentre estes indicadores, o Índice de Anomalia de Chuva (IAC – Rooy, 1965), e a Anomalia de Precipitação Padronizada (APP - Agnew e Chappell, 1999), são métodos estatísticos de cálculos simplificados amplamente empregados em estudos que analisam a precipitação pluviométrica (Brasil Neto et al., 2021; Brito et al., 2021; Raziei, 2021; Carvalho et al., 2023; Santos et al., 2024a; Silva et al., 2024).

Sob a perspectiva climática, Silva et al. (2022) analisaram a variabilidade espaço-temporal das chuvas e a ocorrência de eventos extremos no estado de Pernambuco, Brasil, por meio da utilização dos índices de Concentração de Precipitação (PCI), Índice Padronizado de Precipitação (SPI), Índice de Anomalia de Chuva (IAC), Grau de Concentração de Precipitação (PCD) e Período de Concentração de Precipitação (PCP), e observaram maior ocorrência de

anomalias negativas utilizando o IAC, especialmente na década de 2010-2020, sugerindo uma possível mudança nos padrões de precipitação. Similarmente, Brito et al. (2021) estudando o monitoramento da seca meteorológica na bacia do rio Piranhas, Nordeste do Brasil, utilizando o sensoriamento remoto com dados do Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network – Climate Data Record (PERSIANN-CDR), Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS) e o Índice Padronizado de Precipitação (SPI), constataram maiores anomalias de secas em 1998, 2012 e meados de 2017. Carvalho et al. (2023), avaliando a variabilidade pluviométrica e anomalia de chuvas em municípios do Piauí nas últimas duas décadas utilizando o Índice de Anomalia de Chuva (IAC), verificaram que, entre o período de 2012 a 2016 houve predomínio de anos secos, especialmente nos municípios que se localizam no semiárido.

Portanto, em razão dos efeitos provocados pelas irregularidades das precipitações, potencializadas pelas mudanças climáticas, torna-se necessário a realização de pesquisas voltadas para a análise da extensão e tendências desses

eventos críticos. Sendo assim, a hipótese do presente estudo é que a análise da variabilidade espacial e temporal das chuvas na região leste do Maranhão utilizando índices climáticos permite identificar as áreas mais afetadas por eventos extremos de seca e chuva intensa. Neste contexto, objetivou-se analisar a variabilidade espaço-temporal das chuvas na região leste do Maranhão, e a ocorrência de eventos extremos no período de 1991 a 2020 utilizando índices climáticos (IAC e APP).

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido para a mesorregião leste Maranhense (Figura 1), que ocupa uma área de 70.535,00 km² e está situada entre as coordenadas -2°41'13,36" S e -7°0'4,19" S e, 41°47'45,83" W e 45°56'53,08" W, fazendo fronteira com o estado do Piauí e com o Oceano Atlântico (IBGE, 2022). A mesorregião é dividida em seis microrregiões, sendo elas: Baixo Parnaíba Maranhense, Chapadinha, Codó, Coelho Neto, Caxias, Chapadas do Alto Itapecuru (IBGE, 2022).

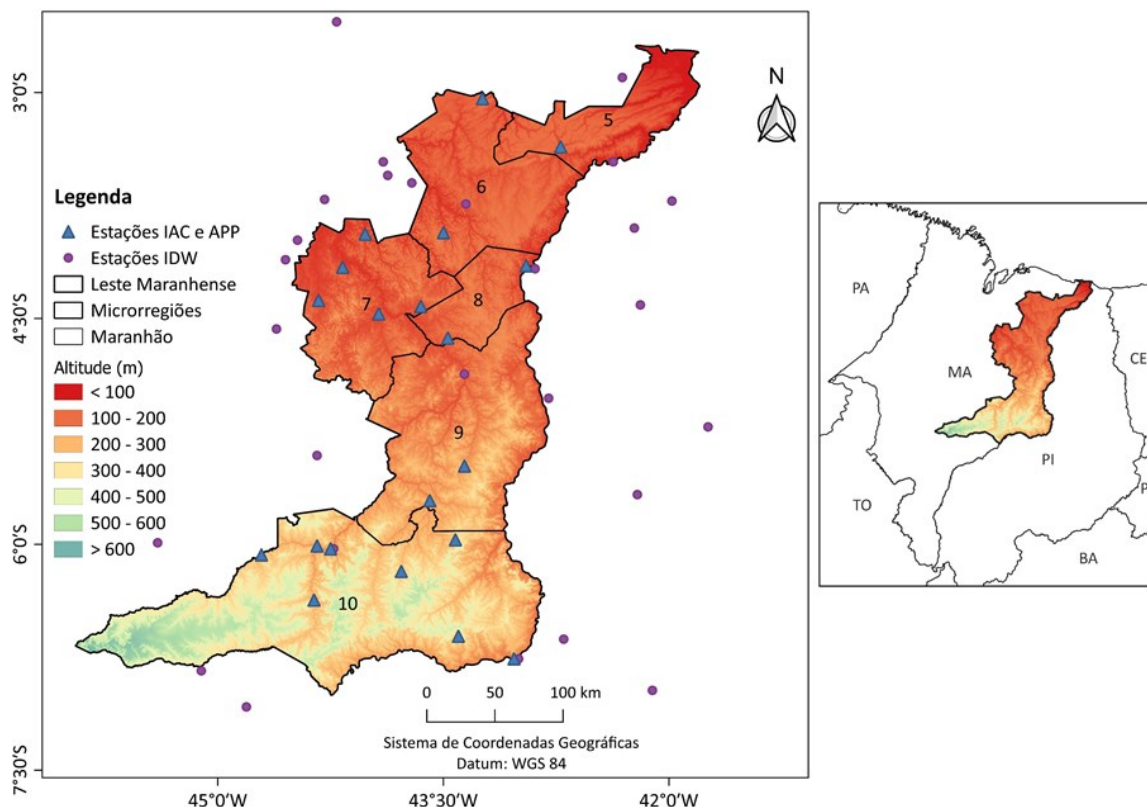


Figura 1. Microrregiões do leste do Maranhão: Baixo Parnaíba Maranhense (5), Chapadinha (6), Codó (7), Coelho Neto (8), Caxias (9) e Chapadas do Alto Itapecuru (10).

O leste Maranhense está situado no bioma Cerrado, com grande parte de seus limites

próximos às regiões de transição com os biomas Amazônia e Caatinga (IBGE, 2021). A região

apresenta climas tropicais de savana, sendo Aw e Aw', segundo a classificação climática de Köppen, e a precipitação pluviométrica variando de 1300 a 1600 mm, com temperaturas médias anuais oscilando entre 23 e 29 °C (Alvares et al., 2012, 2013, Corrêa, Carvalho & Mendes, 2023). O relevo varia entre altitudes abaixo de 100 m e um pouco

acima de 600 m (Figura 1), conforme o modelo digital de elevação com resolução espacial de 90 m disponibilizados pelo serviço geomorfológico do Brasil (INPE, 2023). Os índices climáticos foram calculados seguindo as etapas metodológicas descritas na Figura 2.

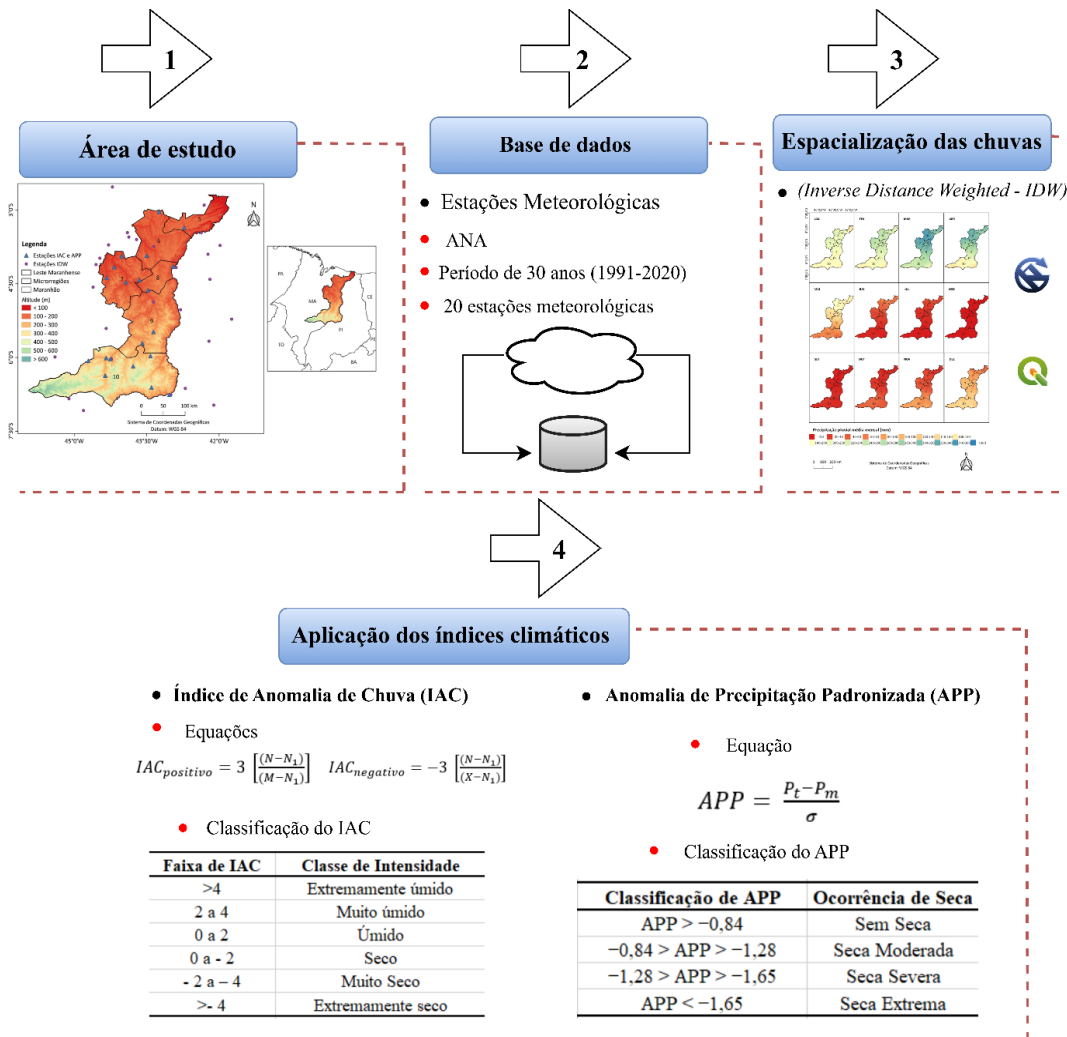


Figura 2. Fluxograma metodológico das etapas e construção dos resultados.

Conjunto de dados, análise de qualidade e preenchimento de lacunas

A base de dados climatológicos de séries históricas foi obtida a partir da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>) para a região

do leste Maranhense em um período de 30 anos (1991 a 2020). Os dados de precipitação correspondentes as 20 estações pluviométricas (Figura 1) estão descritos na Tabela 1. O controle e a garantia dos dados abrangem a última normal climatológica divulgada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022).

Tabela 1. Pluviômetros com seus respectivos municípios, códigos, microrregião em que se encontra instalado e suas coordenadas geográficas latitude, longitude e altitude.

Pluviômetro/Município	Código	Microrregião	o	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Aldeias Altas	443012	4		-4,63	-43,47	80
Barão de Grajaú	643013	6		-6,76	-43,03	107

Buriti Bravo	543004	5	-5,71	-43,59	149
Campo Largo	644015	6	-6,07	-44,71	211
Chapadinha	343010	2	-3,93	-43,5	53
Colinas	644003	6	-6,03	-44,25	70
Coroatá	444001	3	-4,16	-44,17	34
Duque Bacelar	442013	4	-4,15	-42,95	120
Fazenda Sobral	443007	3	-4,47	-43,93	82
Lages	643011	6	-6,61	-43,4	322
Mirador	644007	6	-6,37	-44,36	185
Palmeira do Norte	443011	3	-4,42	-43,65	140
Parnarama	543002	5	-5,48	-43,36	80
Passagem Franca	643012	6	-6,18	-43,78	231
Pedras	344008	3	-3,94	-44,02	32
Peritoró	344007	3	-4,38	-44,33	90
Porto do Lopes	644012	6	-6,01	-44,34	142
Santa Quitéria do Maranhão	342009	1	-3,36	-42,72	43
Urbano Santos	343011	2	-3,04	-43,24	90
Vereda Grande	543011	6	-5,97	-43,42	208

A região leste Maranhense conta, em parte, com a presença das bacias hidrográficas dos rios Itapecuru, Munim, Preguiças, Peria e Parnaíba situadas em seu território (UEMA, 2016). A bacia do rio Parnaíba é de domínio Federal e as demais de domínio estadual. Assim, sempre que necessário, o preenchimento de falhas nas séries históricas dos dados de um determinado pluviômetro foi realizado pela seleção de outros três pluviômetros mais próximos, instalados na mesma bacia hidrográfica ou região climatologicamente homogênea. Portanto, para o preenchimento de falhas nas séries históricas pluviométricas foi utilizado o método da razão normal (*normal-ratio method*), proposto por Paulhus e Kohler (1952), conforme a Equação (1).

$$P_x(m_i, a_i) = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \left(\frac{N_x}{N_3} \right) P_3 \right] \quad (1)$$

Em que: P_x é a precipitação pluvial faltante (em mm) do posto x num determinado mês m_i de um ano a_i , N_x é precipitação pluvial total anual do ano a_i no posto P_x , P_1 , P_2 e P_3 são os totais de chuvas mensais do mês m_i observados nos três postos vizinhos mais próximos, e N_1 , N_2 , N_3 são os totais anuais de chuva dos postos P_1 , P_2 e P_3 .

Espacialização de precipitação pluvial

A precipitação mensal e anual foi espacializada para a região do leste Maranhense por meio do método da distância inversa ponderada (*Inverse Distance Weighted - IDW*) no *software System for Automated Geoscientific Analyses - SAGA*, versão 9.0.2. O método consiste na interpolação espacial de um conjunto conhecido de

pontos distribuídos irregularmente. A partir dos valores dos pontos conhecidos calculam-se valores para pontos desconhecidos por meio da média ponderada pelo inverso da distância dentro de uma região de interesse (Santos et al., 2022; Workneh et al., 2024). Trata-se, portanto, de um método caracterizado em função da magnitude da potência utilizada, que comumente varia de 1 a 3, sempre visando não comprometer de forma significativa a contribuição para a estimativas de pontos mais afastados (Câmara et al., 1996).

Além dos 20 pluviômetros utilizados para a determinação do IAC e do APP, utilizou-se mais 26 pontos de observação de precipitação pluvial, sendo 23 pluviômetros da ANA instalados próximo dos limites do leste Maranhense, e mais três estações convencionais do INMET instaladas no leste Maranhense, nos municípios de Caxias, Chapadinha e Colinas (Figura 1). Foram utilizados pontos fora do leste Maranhense com o objetivo de não comprometer os resultados da interpolação pelo efeito de borda, conforme proposto por Silva Neto et al. (2021) e Baratto et al. (2022).

Por fim, os dados foram organizados em uma planilha eletrônica para o cálculo dos índices climáticos estudados — Índice de Anomalia de Chuva (IAC) e Anomalia de Precipitação Padronizada (APP).

Índice de Anomalia de Chuvas (IAC)

Objetivando a determinação do índice de precipitação, utilizou-se o IAC, proposto por Rooy (1965), para identificar anomalias positivas e negativa na série temporal de precipitação pluvial, e assim, identificar os períodos secos e chuvosos em diferentes níveis de intensidade (Carvalho et

al., 2023, Yao et al., 2023). A principal particularidade deste índice é sua facilidade processual, necessitando apenas de dados pluviométricos para ser calculado, tornando-o adequado para aplicação em regiões semiáridas e tropicais, principalmente para a região Nordeste brasileira (Nascimento & Medeiros, 2022). Neste sentido, para determinar o IAC, foram utilizadas as Equações (2) e (3).

$$IAC_{positivo} = 3 \left[\frac{(N-N_1)}{(M-N_1)} \right] \quad (2)$$

$$IAC_{negativo} = -3 \left[\frac{(N-N_1)}{(X-N_1)} \right] \quad (3)$$

Em que: N é a precipitação observada do ano que será gerado o IAC, N₁ é a precipitação média anual da série histórica (mm), M é a média das dez maiores precipitações anuais da série histórica (mm), e X é a média das dez menores precipitações anuais da série histórica (mm).

Em relação à classificação do IAC para as microrregiões da região leste Maranhense, adotou-se a metodologia adaptada por Freitas (2005) e Araújo et al. (2009) para os anos secos e úmidos, respectivamente. A classificação é determinada com base nos valores registrados de IAC (Tabela 2).

Tabela 2. Classes do Índice de Anomalia de Chuva.

	Faixa de IAC	Classe de Intensidade
Índice de Anomalia de Chuva (IAC)	>4	Extremamente úmido
	2 a 4	Muito úmido
	0 a 2	Úmido
	0 a - 2	Seco
	- 2 a - 4	Muito Seco
	>- 4	Extremamente seco

Fonte: Adaptado de Araújo et al. (2009).

Anomalia de Precipitação Padronizada (APP)

Utilizou-se a Anomalia de Precipitação Padronizada (APP) proposto por Agnew e Chappell (1999) para compreender a variabilidade pluviométrica, identificando os períodos úmidos e de seca e a frequência de dados da série temporal, permitindo a avaliação da frequência e a gravidade das secas meteorológicas (Teschfariam, Gessesse & Melgani, 2019). Nesse contexto, para determinar o APP, utilizou-se a Equação (4).

$$APP = \frac{P_t - P_m}{\sigma} \quad (4)$$

Onde: P_t = Precipitação total, P_m = precipitação média durante um período específico, normalmente 30 anos, σ = Desvio padrão da precipitação na mesma média período.

A classificação de APP foi avaliada conforme a escala de classificação de seca proposta por Agnew e Chappell (1999) para os períodos secos e úmidos, respectivamente. A determinação da classificação é determinada com base nos valores negativos de APP, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Classificação de Anomalia de Precipitação Padronizada.

	Classificação de APP	Ocorrência de Seca
Anomalia de Precipitação Padronizada (APP)	APP > - 0,84	Sem Seca
	-0,84 > APP > -1,28	Seca Moderada
	-1,28 > APP > -1,65	Seca Severa
	APP < -1,65	Seca Extrema

Fonte: Adaptado de Agnew e Chappell (1999)

Resultados e discussão

A Figura 3 apresenta a distribuição espacial da precipitação pluvial média mensal da mesorregião leste no estado do Maranhão no período de 1991 a 2020. Observa-se uma sazonalidade bem definida, com período chuvoso concentrado entre os meses de dezembro a abril, enquanto o período seco entre os meses de maio a novembro. As maiores e menores médias de precipitação mensais registradas chegaram a 363 mm (março) e 3 mm (setembro), respectivamente.

A mesorregião leste do Maranhão está localizada na região Nordeste Setentrional, a qual está submetida a interferência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). O período de precipitação nessa região, sobretudo na porção

norte dos estados do Ceará, Piauí e Maranhão, oeste do Rio Grande do Norte e centro do Pernambuco e da Paraíba, está concentrado entre os meses de fevereiro a maio, em função do deslocamento da ZCIT para latitudes mais ao sul (Carvalho et al., 2023). Portanto, esse fenômeno exerce influência direta na intensidade do período chuvoso do leste maranhense.

O mês de março apresenta maiores índices pluviométricos, como pode ser observado na variabilidade espacial das médias precipitação mensal (Figura 3). Esses resultados são informações importantes para diversas atividades humanas, desde o planejamento da agricultura, até a gestão e preservação do meio ambiente.

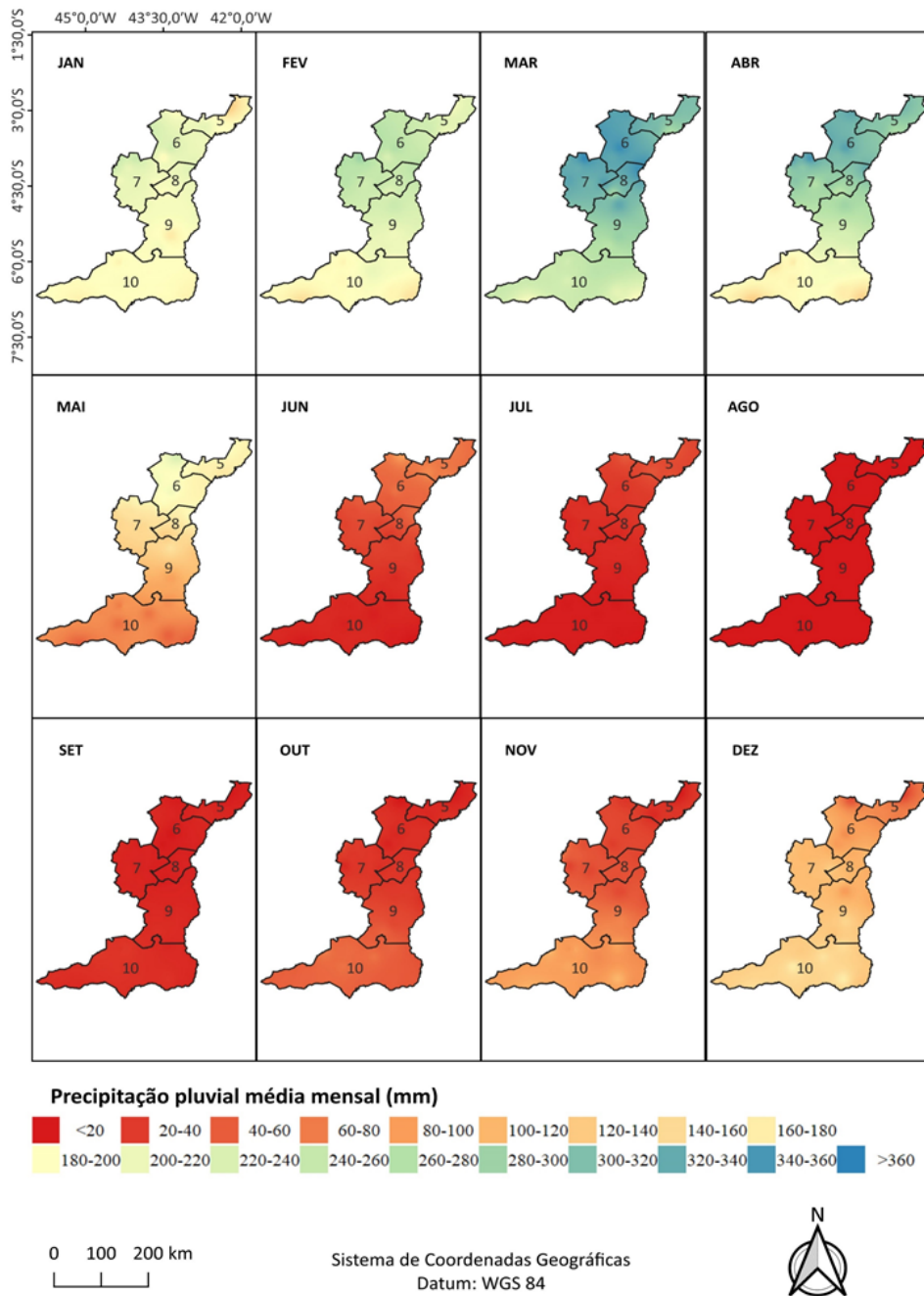


Figura 3. Precipitação média mensal no leste Maranhense no período de 1991 a 2020.

Índice de Anomalia de Chuva (IAC)

A Figura 4 mostra os resultados obtidos para o IAC da microrregião do Baixo Parnaíba, representada pelo município de Santa Quitéria, os

anos 1992 e 2015 foram classificados como extremamente secos e 2002, 2005 e 2011, 2016, 2019 como muito secos. Quanto às anomalias positivas, os anos de 2000, 2009 e 2019 foram extremamente úmidos.

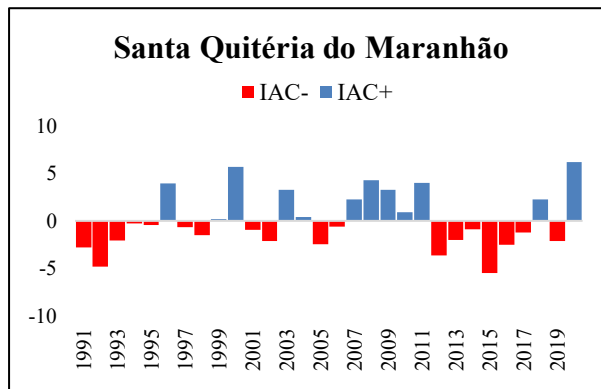


Figura 4. Índice de Anomalia de Chuva para as estações pluviométricas da microrregião do Baixo Parnaíba, de 1991 a 2020.

Na microrregião de Chapadinha, observou-se maior frequência de anos úmidos em comparação com os anos secos, respectivamente (Figura 5). No município de Chapadinha destaca-se os anos de 1991, 1992 e 2015 como

extremamente secos, enquanto 2003 e 2009 são classificados como extremamente úmidos. Já no município de Urbano Santos, o ano de 2011 foi extremamente úmido, ao passo que 2012 foi extremamente e seco.

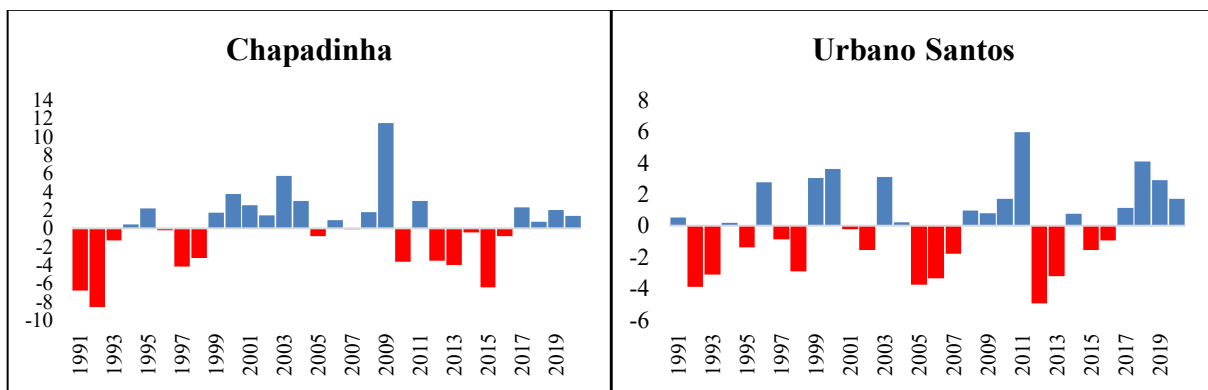
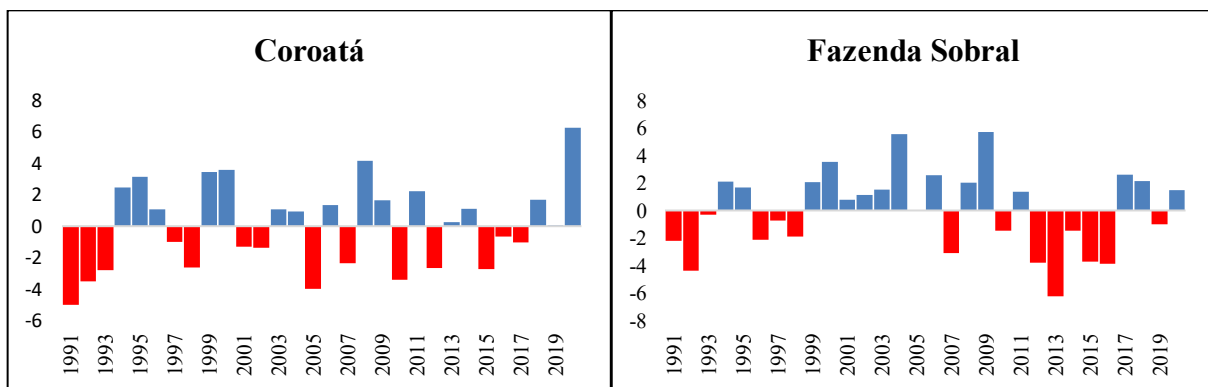


Figura 5. Índice de Anomalia de Chuva para as estações pluviométricas da microrregião de Chapadinha, de 1991 a 2020.

Para a microrregião de Codó, os anos de 1991, 1992, 2015 e 2016 receberam classificações de seco a extremamente seco em todos os pluviômetros. Em contrapartida, os anos de 2008 e 2009 foram classificados como úmidos a extremamente úmidos, com destaque para o município de Peritoró, com valor do IAC de 17,9

no ano de 2009, e 17,2 no ano de 2011, caracterizando assim anos com grandes volumes pluviométricos (Figura 6). Observa-se também, para o município citado, anos extremamente secos, com IAC's de -9,7, -13,3, -11,6 e -11,9 para os anos de 1991, 1993, 2012 e 2016, respectivamente.



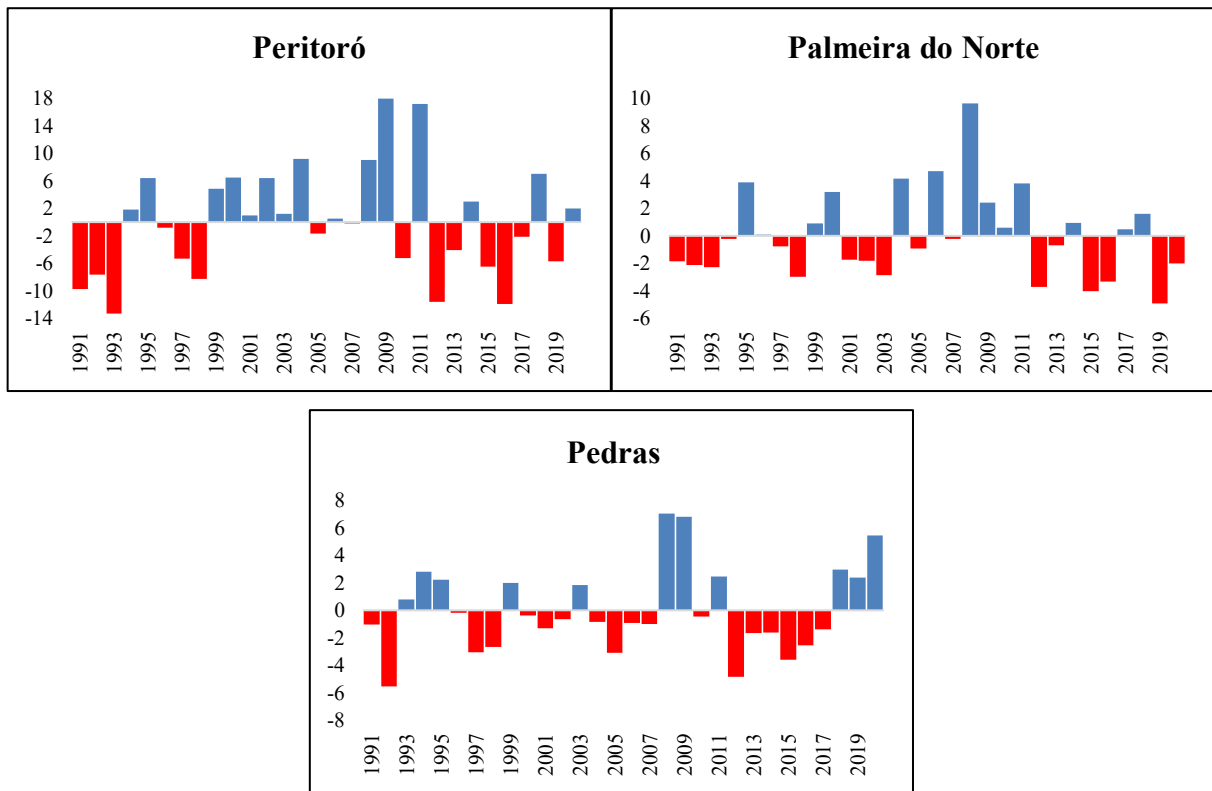


Figura 6. Índice de Anomalia de Chuva para as estações pluviométricas da microrregião de Codó, de 1991 a 2020.

Em relação a microrregião de Coelho Neto (Figura 7), os anos de 1992 (Aldeias Altas) e, 1993, 2013, 2015 e 2016 (Duque Bacelar) foram extremamente secos, com IAC's de -5,3, -7,3, -4,7,

-5,0 e -5,7, ao passo que, os anos de 2004, 2017, 2018, 2020 (Aldeias Altas) e, 2009 e 2020 (Duque Bacelar) foram extremamente úmidos, com IAC's de 4,0, 4,2, 4,8, 5,4, 6,8 e 4,6.

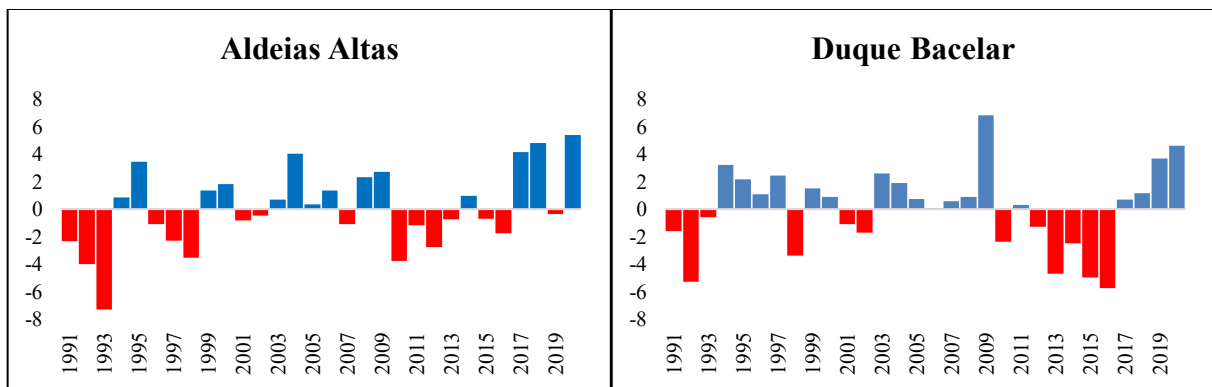


Figura 7. Índice de Anomalia de Chuva para as estações pluviométricas da microrregião de Coelho Neto, de 1991 a 2020.

Analisando o IAC da mesorregião de Caxias (Figura 8), observa-se que o ano de 2009 foi marcado por altos índices de precipitação pluviométrica, sendo extremamente úmido, com

IAC's de 8,1 (Buriti Bravo) e 10,0 (Parnarama). Por outro lado, os anos de 2012, 2015, 2016 (Buriti Bravo) e, 2007 (Parnarama) foram extremamente secos.

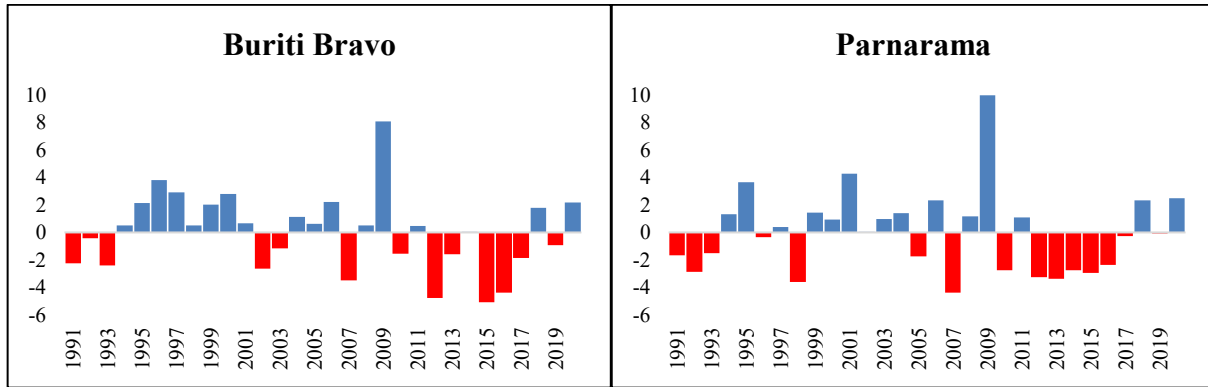
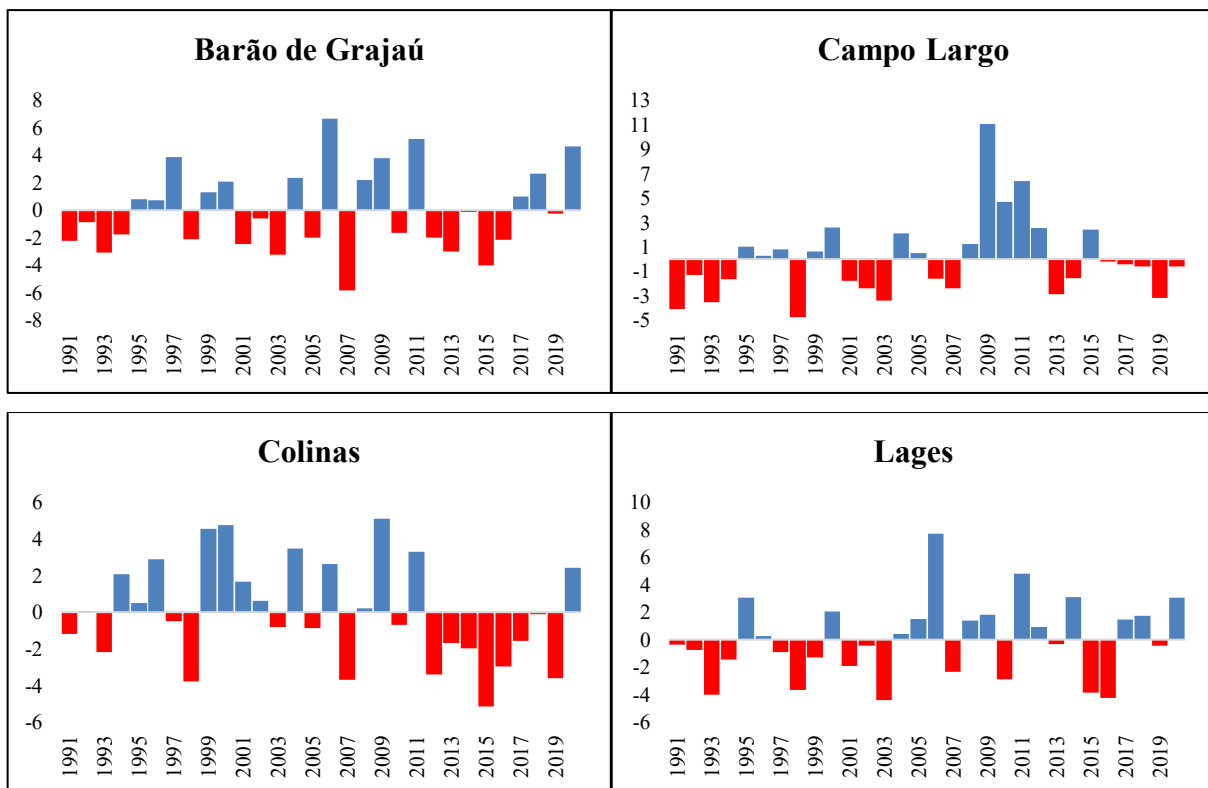


Figura 8. Índice de Anomalia de Chuva para as estações pluviométricas da microrregião de Caxias, de 1991 a 2020.

Para a microrregião de Chapadas do Alto Itapecuru (Figura 9), foram detectados vários anos como extremamente secos, com desta para os anos de 2007 (Barão de Grajaú e Mirador), 2012 (Porto do Lopes) e 2015 (Colinas), ambos com IAC's menores que -5,0. Referente aos anos

extremamente úmidos, 2006 (Barão de Grajaú e Lages), 2009 (Campo Largo, Mirador e Vereda Grande) e 1995 (Mirador e Passagem Franca) se destacaram como anos extremamente úmidos, com IAC's superiores a 6,0, respectivamente.



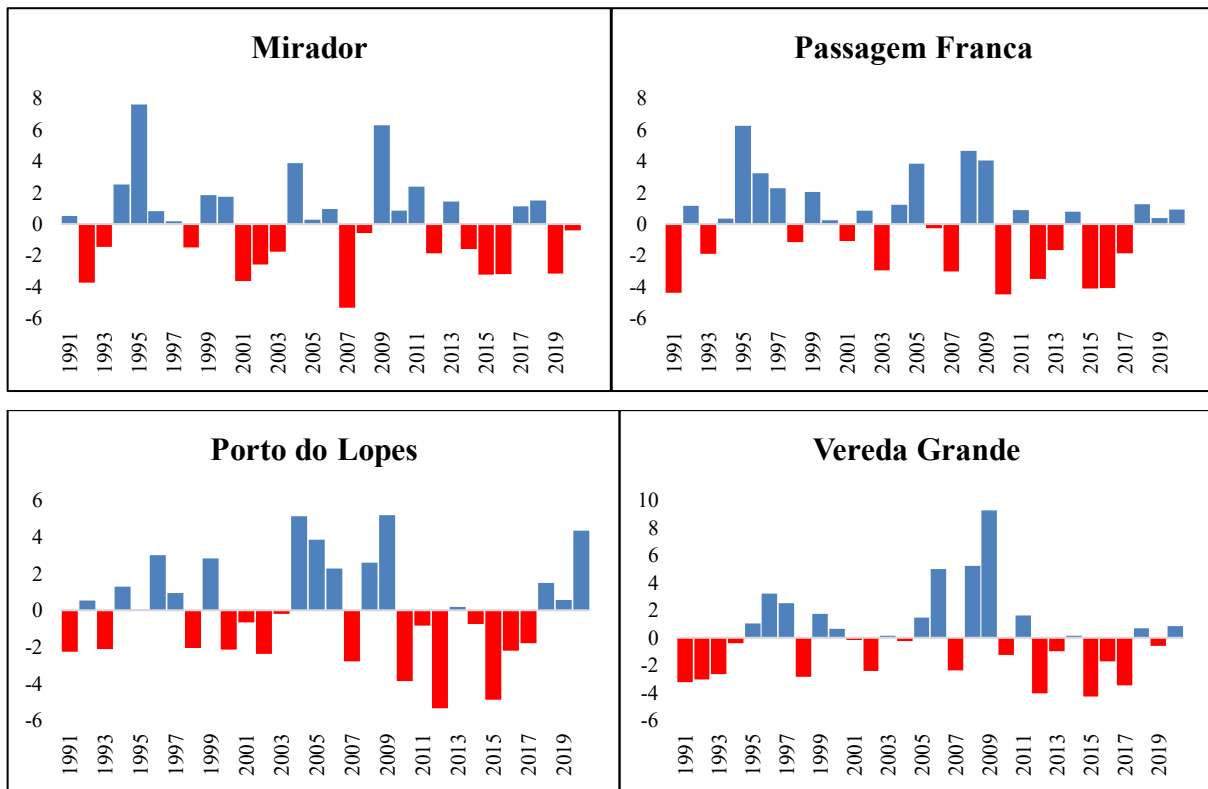


Figura 9. Índice de Anomalia de Chuva para as estações pluviométricas da microrregião de Chapadas do Alto Itapecuru, de 1991 a 2020.

O período de 1991 a 1993 foi caracterizado por anomalias negativas registradas em grande parte dos municípios estudados. Nesse período ocorreu o fenômeno climático El Niño, resultando em forte escassez de chuva na região Nordeste do Brasil (Silva et al., 2022, Santos et al., 2023). Esses resultados corroboram com os achados de Medeiros e Oliveira (2021), que observaram anomalias negativas de precipitação sobre o Nordeste do Brasil entre o período de 1991 a 1993, com maior intensidade no ano de 1993 (-253,8 mm), considerado um dos 5 anos mais secos entre o período de 1981 a 2016. De acordo com Souza et al. (2024), ao utilizarem o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) na região do MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), verificaram que, em 1993, a mesorregião do leste do Maranhão sofreu uma seca de intensidade moderada a severa.

Por outro lado, os anos de 2008 e 2009 apresentaram maiores IAC positivos para grande parte das microrregiões leste maranhense. As anomalias positivas são associadas ao evento La Niña de intensidade fraca a moderada e a fase positiva do Dipolo do Atlântico (Santos et al., 2023). Os resultados do estudo de Souza et al. (2024) reforçam os achados do presente estudo, pois constataram que para os anos de 2000, 2004 e 2009, foram caracterizados como anos chuvosos,

registrando regiões com precipitação acima da média e períodos extremamente chuvosos nas microrregiões do Maranhão. Carvalho et al. (2023) em sua pesquisa de anomalias de chuvas no estado do Piauí, região que faz divisa com o leste maranhense, observaram maiores desvios positivos em grande parte dos municípios piauienses estudados.

No presente estudo é possível observar que de 2012 a 2016 houve predominância de anos secos para a maioria das estações pluviométricas analisadas. Carvalho et al. (2023) enfatizam que esse período correspondeu a uma grande seca ocorrida na região Nordeste do Brasil, iniciando em 2012 e intensificado em 2015, considerado o mais grave das últimas décadas, que impactou significativamente o desenvolvimento dos estados da região semiárida do Nordeste brasileiro. Os resultados de Souza et al. (2024) ratificam essa tese, pois afirmam que no período de 2010 a 2016 o estado do Maranhão sofreu eventos de secas, com destaque para o ano de 2015, impactado fortemente pelo El Niño. Similarmente, Santos et al. (2024b) ao estudarem os períodos de secas no Nordeste brasileiro utilizando índices climáticos, observaram que entre o período de 2012 a 2019, houve um aumento de anomalias de chuva na região, sendo mais severo nos anos de 2012 e 2013, assim como de 2015 a 2019. Por fim, Medeiros e

Oliveira (2021), verificaram que os anos de 2012 e 2016 estiveram entre os 5 anos com as estações chuvosas mais secas no Nordeste brasileiro, sendo registrado anomalias negativas de -328,9 mm e -255,1 mm, respectivamente.

Anomalia de Precipitação Padronizada (APP)

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos para o APP em estações pluviométricas do leste

maranhense. Durante o período de 1991 a 2020, a estação pluviométrica Duque Bacelar apresentou maior percentagem de Seca Extrema de 10%, seguidas das estações de Buriti Bravo, Chapadinha e Peritoró que apresentaram 6,7%. Em relação a frequência de Seca Severa, a estação de Lages exibiu maior percentagem (16,7%). A frequência de Seca moderada apresentou maior percentagem (23,3%) na estação pluviométrica de Coroatá.

Tabela 4. Frequências de Seca (%) do leste maranhense no período de 1991 a 2020.

Precipitação Média	Estações Pluviométricas	Sem Seca	Seca Moderada	Seca Severa	Seca Extrema
1312,45	Aldeias Altas	83,3%	6,7%	6,7%	3,3%
984,05	Barão de Grajaú	83,3%	12,0%	3,3%	3,3%
1260,61	Buriti Bravo	80,0%	10,0%	3,3%	6,7%
1205,30	Campo Largo	80,0%	16,7%	3,3%	0,0%
1375,99	Chapadinha	76,7%	13,3%	3,3%	6,7%
1187,17	Colinas	80,0%	6,7%	10,0%	3,3%
1613,25	Coroatá	70,0%	23,3%	3,3%	3,3%
1549,52	Duque Bacelar	83,3%	3,3%	3,3%	10,0%
1360,50	Fazenda Sobral	80,0%	6,7%	10,0%	3,3%
1125,01	Lages	80,0%	3,3%	16,7%	0,0%
1178,51	Mirador	76,7%	16,7%	3,3%	3,3%
1447,29	Palmeira do Norte	80,0%	16,7%	3,3%	0,0%
1249,41	Parnarama	76,7%	20,0%	3,3%	0,0%
1200,37	Passagem Franca	73,3%	13,3%	10,0%	3,3%
1659,34	Pedras	80,0%	13,3%	3,3%	3,3%
1483,11	Peritoró	80,0%	10,0%	6,7%	3,3%
1079,84	Porto do Lopes	83,3%	6,7%	3,3%	6,7%
1400,18	Santa Quitéria	86,7%	6,7%	3,3%	3,3%
1557,32	Urbano Santos	76,7%	13,3%	6,7%	3,3%
1190,47	Vereda Grande	76,7%	16,7%	6,7%	0,0%

Os resultados do índice de APP mostraram que entre os anos de 1991 a 1993, teve predominância das estações pluviométricas na frequência de Seca Moderada (50%), seguida por Seca Extrema (29%) e Seca Severa (21%). Ademais, no período de 2012 a 2016, a análise do índice de APP apresentou 48% de frequência de

Seca Moderada, 31% Seca Severa e 21% de Seca Extrema.

Neste estudo, observou-se que os índices IAC e APP indicaram uma predominância de anos secos durante os períodos de 1991-1993 e 2012-2016. Além disso, nos últimos 10 anos houve uma maior frequência de anos considerados secos e que

isso pode indicar uma mudança nos padrões de precipitação da região. Esses intervalos correspondem a uma forte escassez de chuva na região Nordeste do Brasil, que influenciou significativamente os padrões de precipitação na região leste do Maranhão (Souza et al., 2024; Oliveira et al., 2022).

Medeiros e Oliveira (2021), Santos et al. (2023) e Souza et al. (2024) enfatizam que, durante o período de 1991 a 1993 ocorreu o fenômeno climático El Niño, causando deficiência de precipitação no Nordeste brasileiro. Esse impacto teve maior intensidade em 1993, um dos anos mais secos registrados entre o período de 1981 a 2016, o que pode ter contribuído para que 50% das estações pluviométricas do leste maranhense fossem classificadas como em condições de seca extrema a severa. Outrossim, Souza et al. (2024) ressaltam a ocorrência de uma grave seca no Nordeste do Brasil os anos de 2012 a 2016, atingindo o estado do Maranhão, sendo considerado um dos piores das últimas décadas.

Estudos recentes do IPCC, 2021, Gouveia et al. (2022) e Medeiros et al. (2022), indicam que a precipitação total no Nordeste brasileiro vem diminuindo nas últimas décadas, enquanto a intensidade de eventos diários de precipitação extrema está aumentando. Ademais, projeções de mudanças climáticas apontam que a frequência e a gravidade desses eventos extremos devem continuar nas próximas décadas, impulsionadas pelo aquecimento global. Marengo et al. (2019), em seu estudo de projeções futuras, verificou que aproximadamente 1.800 municípios do Nordeste brasileiro estão sujeitos a seca extrema e severa em 2040, 2070 e 2100.

Essa alteração climática tem estreita relação com as emissões exponenciais de gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera, sobretudo após a revolução industrial (Medeiros, Santos & Maia, 2022). Neste sentido, a queima de combustíveis fósseis e a expansão da agricultura, principalmente devido ao desmatamento, queima da vegetação nativa e constante revolvimento do solo são as principais atividades antrópicas que emitem quantidades significativas de GEE (Medeiros, Santos & Maia, 2022; Medeiros, Lima & Santos, 2023; Corrêa, Carvalho & Mendes, 2023). De acordo com o Projeto Anual do Uso e Cobertura da terra (MapBiomass, 2022) e o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito

Estufa (SEEG, 2023), no estado do Maranhão, durante 1985 a 2022 as mudanças de uso da terra, especialmente relacionadas à agricultura, como o desmatamento e a queima de florestas para a produção de grãos, juntamente com o setor de energia, emitiram 71,4 Gg CO₂e para a atmosfera, contribuindo para o aumento do aquecimento global, e conseqüentemente, para as mudanças climáticas (Lana et al., 2021). Além disso, no ano de 2023 o Maranhão apresentou a maior taxa de desmatamento do Brasil, sendo registrado redução de 161.423 hectares da área de vegetação nativa (MapBiomass, 2023). Essas ações antrópicas, impactam a regularidade das precipitações pluviométricas, que envolve chuvas intensas e veranicos em diferentes regiões, planejamento de safra e desenvolvimento agrícola das regiões (Silva et al., 2022, Ogunbode et al., 2022; Jiang et al., 2022; Silva et al., 2023).

Frente ao exposto, estudos climáticos como este, são fundamentais para avaliar os impactos das mudanças climáticas nos processos hidrológicos ao longo do tempo, e conseqüentemente, melhorar a compreensão das alterações nos regimes de precipitação pluvial em escala local e regional, com o objetivo de contribuir para a elaboração de políticas públicas voltadas para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental (Malik et al., 2021; Danielescu et al., 2022, Silva et al., 2022; Wang et al., 2023).

Conclusões

As análises a partir dos índices climáticos mostraram eventos de seca com maior intensidade e frequência, que afetam a grande maioria das microrregiões do leste maranhense nos períodos de 1991 a 1993 e 2012 a 2016, por outro lado, as anomalias positivas foram observadas em 2008 e 2009. Em ambos os casos, as anomalias puderam ser associadas aos fenômenos El Niño e La Niña.

Os resultados deste estudo demonstram a relevância da aplicação de metodologias baseadas em índices climáticos, como o Índice de Anomalia de Chuva e o Anomalia de Precipitação Padronizada, para o monitoramento de eventos de seca em uma região de interesse, permitindo a obtenção de informações que ajudem na tomada de decisões, afim de atenuar riscos socioambientais, especialmente em setores mais sensíveis ao clima, como o abastecimento de água, geração de energia e agropecuária.

Referências

- Agnew, C. T., & Chappell, A. (1999). Drought in the Sahel. *Geojournal*, 48, 299-311, 1999. <https://doi.org/10.1023/A:1007059403077>
- Alvares, C.A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M. (2012). Modeling monthly mean air temperature for Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 113, 407-427. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0796-6>
- Alvares, C.A., Stape, J. L., Sentelhas, P.C., Moraes, G. J. L., Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22, 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANA- Agência Nacional de Águas E Saneamento. Séries históricas de estações. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 03 de jan 2024.
- Araújo, L. E., Moraes Neto, J. M., & Sousa, F. de A. S. (2009) Análise climática da bacia do Rio Paraíba - Índice de Anomalia de Chuva (IAC). *Engenharia Ambiental*, 6, 508-523.
- Baratto, P. F. B., Cecílio, R. A., Teixeira, D. B. de S., Zanetti, S. S., Xavier, A. C. (2022) Espacialização da precipitação diária em bacias hidrográficas do Sul do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37, 385-404. <https://doi.org/10.1590/0102-77863730034>
- Bewket, W., Tibebe, D., Teferi, E., Degefu, M.A. (2024). Changes in mean and extreme rainfall indices over a problemscape in central Ethiopia. *Environmental Challenges*, 15, 100883. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100883>
- Brasil Neto, R. M., Santos, C. A. G., Silva, J. F. C. B. D. C., Da Silva, R. M., Dos Santos, C. A. C., Mishra, M. (2021). Evaluation of the TRMM product for monitoring drought over Paraíba State, northeastern Brazil: a trend analysis. *Scientific Reports*, 11, 1097. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80026-5>
- Brito, C. S. D., Silva, R. M. D., Santos, C. A. G., Brasil Neto, R. M., Coelho, V. H. R. (2021). Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-estimated rainfall datasets: A case study of the Piranhas River basin, northeastern Brazil. *Atmospheric Research*, 250, 105380. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105380>
- Câmara, G., Souza, R. C. M., Freitas, U. M., & Garrido, J. C. P. (1996). SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, 20 (3), 395-403. [http://dx.doi.org/10.1016/0097-8493\(96\)00008-8](http://dx.doi.org/10.1016/0097-8493(96)00008-8)
- Carvalho, M. W. L., Corrêa, W. C., Teixeira, M. A. C. M., Teixeira C. C., Silva, A. C. (2023). Variabilidade pluviométrica e índice de anomalia de chuvas em municípios do Piauí. *Geografia Ensino & Pesquisa*, 27, e71043. <https://doi.org/10.5902/2236499471043>
- Corrêa, W., Carvalho, M. W. L., & Mendes, T. J. (2023). Atualização da classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado do Maranhão. *Revista Brasileira De Climatologia*, 32, 517-543. <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16727>
- Danielescu, S., Adamescu, M. C., Cheval, S., Dumitrescu, A., Cazacu, C., Borcan, M., Postolache, C. (2022). Climate Change Impacts on Hydrological Processes in a South-Eastern European Catchment. *Water*, 14, 2325. <https://doi.org/10.3390/w14152325>
- Duan, W., Zou, S., Christidis, N., Schaller, N., Chen, Y., Sahu, N., Li, Z., Fang, G., Zhou, B. (2022). Changes in temporal inequality of precipitation extremes over China due to anthropogenic forcings. *npj Climate and Atmospheric Science*, 5, 33. <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00255-5>
- Freitas, M. A. S. (2005). Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas. *Revista Tecnologia*, 19, 84-95.
- Gouveia, C. D., Torres, R. R., Marengo, J. A., Avila-Diaz, A. (2022). Incertezas em projeções de extremos climáticos na América do Sul via inferência bayesiana. *International Journal of Climatology*, 42, 7362-7382. <https://doi.org/10.1002/joc.7650>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Portal de Mapas do IBGE. 2022. Disponível em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>>. Acesso em: 3 fev. 2024.
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Portal de Mapas do IBGE. 2021. Disponível em:

- <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>. Acesso em: 3 jan. 2024.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Estações pluviométricos do Maranhão (1991-2020). 2022. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>. Acesso em: 09 mar 2022.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2023. TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. Disponível: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Acesso em: 25 fev 2024.
- INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2023. Banco de dados geomorfométricos do Brasil. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acesso em: 15 jan. 2024.
- IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In Press.
- Jiang, T., Sun, S., Li, Z., Li, Q., Lu, Y., Li, C., Wang, Y., Wu, P. (2022). Vulnerability of crop water footprint in rain-fed and irrigation agricultural production system under future climate scenarios. *Agricultural and Forest Meteorology*, 326, 109164. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109164>
- Lana, X., Casas-Castillo, M. C., Rodríguez-Solà, R., Sera, C., Kirchner, R. (2021). Rainfall regime trends at annual and monthly scales in Catalonia (NE Spain) and indications of CO₂ emissions effects. *Theoretical and Applied Climatology*, 146, 981–996. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03773-z>
- Malik, A., Kumar, A., Rai, P., Kuriqi, A. (2021). Prediction of multi-scalar standardized precipitation index by using artificial intelligence and regression models. *Climate*, 9,28. <https://doi.org/10.3390/cli9020028>
- MAPBIOMAS - Relatório Anual do Desmatamento do Brasil em 2023. 2024. Disponível em: <https://alerta.mapbiomas.org/relatorio/>. Acesso: 29 de mai. 2024.
- MAPBIOMAS- Projeto MapBiomas – Coleção [8] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil (2022). < <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>>. Acesso em: 31 de mar 2024.
- Marengo, J. A., Cunha, A. P. C., Soares, W. R., Torres, R. R., Alves, L. M., Brito, S. S. B., Cuartas, L. A., Leal, K., Neto, G. R., Alvalá, R. C. S. Magalhaes, A. R. (2019). Increase Risk of Drought in the Semi-arid Lands of Northeast Brazil Due to Regional Warming above 4 °C. In: Nobre, C., Marengo, J., Soares, W. (eds) *Climate Change Risks in Brazil*. Cham, Switzerland: Springer, pp 181–200. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92881-4_7
- Medeiros, A. S., Cesário, F. V., Maia, S. M. F. (2023). Long-term impact of conventional management on soil carbon and nitrogen stocks in the semi-arid region of Brazil: A meta-analysis. *Journal of Arid Environments*, 218, 105052. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.105052>
- Medeiros, A. S., Gonzaga, G. B. M., Da Silva, T. S., Barreto, B. S., Santos, T. C., De Melo, P. L. A., De Araújo Gomes, T. C., Maia, S. M. F. (2023). Changes in soil organic carbon and soil aggregation due to deforestation for smallholder management in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma Regional*, 33, e00647. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00647>
- Medeiros, A. S., Santos, T. C., & Maia, S. M. F. (2022). Effect of long-term and soil depth on soil organic carbon stocks after conversion from native vegetation to conventional tillage systems in Brazil. *Soil and Tillage Research*, 219, 105336. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105336>
- Medeiros, E. S., Lima, R. R., & Santos, C. A. C. (2023) Spatiotemporal Kriging for Days without Rainfall in a Region of Northeastern Brazil. *Climate*, 11, 21. <https://doi.org/10.3390/cli11010021>
- Medeiros, F. J., & Oliveira, C.P. (2022). Assessment of dry and heavy rainfall days and

- their projected changes over Northeast Brazil in Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 models. *International Journal of Climatology*, 42, 8665–8686. <https://doi.org/10.1002/joc.7759>
- Medeiros, F. J., Gomes, R. S., Coutinho, M. D. L. Lima, K. L. (2022) Meteorological drought and water resources: historical and future perspective for Rio Grande do Norte state, Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, 42, 6976-6995. <https://doi.org/10.1002/joc.7624>.
- Medeiros, F. J., & Oliveira, C. P. (2021). Dynamical Aspects of the Recent Strong El Niño Events and Its Climate Impacts in Northeast Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, 178, 2315–2332. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02758-3>
- Nascimento, M. B. D., & Medeiros, M. D. D. (2022). Índices de severidade da seca no semiárido, Paraíba. *Revista Mercator*, 21, 1–14. <https://doi.org/10.4215/rm2022.e21024>
- Nery, J. T., Siqueira, B. (2021). Índice de anomalia de chuva aplicado ao estudo das precipitações no estado do Paraná. *Revista Brasileira de Climatologia*, 27, 772–788. <https://doi.org/10.5380/abclima.v27i0.65691>
- Ogunbode, T. O., Esan, V. I., Samson, T. K., Oyelowo, O. J., Asifat, J. T. (2022). Rainfall trend and its implications for sustainable crop production and water resources management: A case study of Iwo, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 26, 1415-1422. <https://doi.org/10.4314/jasem.v26i8.15>
- Oliveira, M. L., Santos, C. A. C., Oliveira, G., Silva, M. T., Silva, B. B., Cunha, J. E. B. L., Ruhoff, A., Santos, C. A. G. (2022). Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. *Science of The Total Environment*, 835. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155490>.
- Paulhus, J. L. H., Kohler, M. A. (1952). Interpolation of missing precipitation records. *Monthly Weather Review*, 80, 129-133. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1952\)080%3C0129:IOMPR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1952)080%3C0129:IOMPR%3E2.0.CO;2)
- Pinto, C. A. D., Silva Júnior, J. A., Cavalcanti, A. C., Silva, J. F. B. R., Farias D'Oliveira, F. A., Sousa, L. H., Costa, A. C. L., Nunes, H. G. G. C., Ataíde, W. L. S., Silva, S. P. A., Rodrigues, H. J. B., Souza Filho, J. D. C. (2022). Índice de anomalia de chuva (IAC) e sua relação com os desastres naturais no leste da Amazônia. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15, 2544–257. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2544-2572>
- Raziei, T. (2021). Revisiting the Rainfall Anomaly Index to serve as a Simplified Standardized Precipitation Index. *Journal of Hydrology*, 602, 126761. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126761>
- Rooy, M. P. V. (1965). A Rainfall Anomaly Index (RAI), Independent of the Time and Space. *Notos*, 14, 43-48.
- Sales, E. S. G., Matsunaga, W. K., Braga, C. C., Sakamoto, M. S., Lucena, D. B., Barbosa De Brito, J. I. (2024). Climate classification for Northeast Brazil using reanalysis data and the Absolute Aridity Index. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17, 1478–1500. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.3.p1478-1500>
- Santos, A. R. et al. Curso Espacialização de Dados Meteorológicos no QGIS (EDM-QGIS). In: Santos, A. R., Aragão, A. M., Fiedler, N. C., Lucas, F. M. F., Guanaes, G. M. S., Ramalho, A. H. C., Biazatti, L. D., Santos, E. C., Pautz, C., Mardeni, V. D. N., Curty, T. A., Carvalho, R. C. F. et al. Vídeo aulas Descritas Passo a Passo – Volume 1. Alegre: CAUFES, 2022. <https://doi.org/10.29327/589504>
- Santos, C. A. G., Santos, D. C. D., Brasil Neto, R. M., De Oliveira, G., Dos Santos, C. A. C., Silva, R. M. D. (2024a). Analyzing the impact of ocean-atmosphere teleconnections on rainfall variability in the Brazilian Legal Amazon via the Rainfall Anomaly Index (RAI). *Atmospheric Research*, 307, 107483. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107483>
- Santos, D. C., Santos, C. A. G., Brasil Neto, R. M., Silva, R. M., Santos, C. A. C. (2023). Precipitation variability using GPCC data and its relationship with atmospheric teleconnections in Northeast Brazil. *Climate Dynamics*, 61, 5035–5048. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06838-z>

- Santos, J. A. S., Wanderley, H. S., Amorim, C. R. F., Delgado, R. C., Fernandes, R.C. (2024b). The longest multiannual drought in Northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 143, 104976. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104976>
- SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. 2023. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission. Acesso em: 31 mar. 2024.
- Silva Neto, V. L., Souza, L. B. E, Viola, M. R., Morais, M. A. V. (2021). Variabilidade espacial e temporal da precipitação no Estado do Tocantins, Brasil. *Research, Society and development*, 10, 1-20. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13545>
- Silva, A. S. A., Stosic, T., Arsenić, I., Menezes, R. S. C., Stosic, B. (2023). Multifractal analysis of standardized precipitation index in Northeast Brazil. *Chaos, Solitons & Fractals*, 172, 113600. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2023.113600>
- Silva, T. R. B. F., Santos, C. A. C., Silva, D. J. F., Santos, C. A. G., Silva, R. M., Brito, J. I. B. (2022). Climate Indices-Based analysis of rainfall spatiotemporal variability in Pernambuco State, Brazil. *Water*, 14, 2190. <https://doi.org/10.3390/w14142190>
- Souza, W. G. S., Silva, M. T., Siqueira, M. T., Siqueira, M.S., Gomes, H. B., Oliveira, G., Silva, T. G. F., Cavalcanti, E. P. (2024). Variabilidade espaço temporal da seca meteorológica nas microrregiões do MATOPIBA. *Revista Brasileira de Geografia e Física*, 17. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p01-21>
- UEMA - Universidade Estadual do Maranhão. Bacias hidrográficas e climatologia no Maranhão. São Luís, 165 p. 2016.
- Wang, T., Xinjun T., Vijay, P. S., Chen, X., Lin, K., Zhou, Z., Zhu, J. (2023). A CMIP6-based framework for propagation from meteorological and hydrological droughts to socioeconomic drought. *Journal of Hydrology*, 623. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129782>
- Workneh, H. T., Chen, X., Ma, Y., Bayable, E., Dash, A. (2024). Comparison of IDW, Kriging and orographic based linear interpolations of rainfall in six rainfall regimes of Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52, 101696. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101696>
- Yang, K., Wang, K., Zhang, X., Chang, X., Bai, G., Zheng, J., Wu, G. L. (2021). Change in soil water deficit and soil organic matter consumption over time in rain-fed apricot orchards on the semi-arid Loess Plateau, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 314, 107381. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107381>
- Yao, K. M. A., Kola, E., Morenikeji, W., Leal Filho, W. 2023. Time series analysis of temperature and rainfall in the Savannah Region in Togo, West Africa. *Water*, 15, 1656. <https://doi.org/10.3390/w15091656>