



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS DE CHAPADINHA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

WELLINGTON CRUZ CORRÊA

DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DE VERANICOS DURANTE A ESTAÇÃO
CHUVOSA NO ESTADO DO MARANHÃO, BRASIL

Chapadinha - MA

2025

WELLINGTON CRUZ CORRÊA

Dinâmica espaço-temporal de veranicos durante a estação chuvosa no estado do Maranhão, Brasil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Centro de Ciências de Chapadinha, da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Meio Ambiente e Recursos Naturais

Linha de pesquisa: Produção Agrícola e Desenvolvimento Sustentável

Orientador(a): Dr. Nítalo André Farias Machado

Coorientador: Dr. José Oscar Lustosa de Oliveira Júnior

Chapadinha - MA

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a)
autor(a). Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Corrêa, Wellington Cruz. Dinâmica espaço-temporal de
veranicos durante a estação chuvosa no estado do Maranhão,
Brasil / Wellington Cruz Corrêa. - 2025.
115 f.

Coorientador(a) 1: José Oscar Lustosa de Oliveira
Júnior.

Orientador(a): Nítalo André Farias Machado.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Ciências Ambientais/CCCh, Universidade Federal do
Maranhão, Chapadinha, 2025.

1. Precipitação Diária. 2. Veranicos. 3.
Variabilidade Espaço-temporal. 4. Análise Multivariada.
5. Frequência Regional. I. Machado, Nítalo André Farias.
II. Oliveira Júnior, José Oscar Lustosa de. III. Título.

WELLINGTON CRUZ CORRÊA

Dinâmica espaço-temporal de veranicos durante a estação chuvosa no estado do Maranhão, Brasil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Centro de Ciências de Chapadinha, da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Aprovado(a) em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nítalo André Farias Machado (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão

Dr. Edvaldo Sagrilo (interno)
Embrapa Meio-Norte

Dr. José Francisco de Oliveira-Júnior (externo)
Universidade Federal de Alagoas

Chapadinha-MA

2025

AGRADECIMENTOS

Foram dois anos de mestrado em que tive a oportunidade e liberdade para aprender muito. Foram dias e dias lendo um punhado de livros e artigos, conhecendo das mais variadas técnicas matemáticas e estatísticas que, para além da atual pesquisa, me deram ideias para inúmeras outras futuras.

Agradeço primeiramente a Deus por toda a sua providência na minha vida. Não foi coincidência de minha pesquisa envolver uma das áreas da matemática que me fez mudar de postura acadêmica desde o ensino médio, a famosa Álgebra de Matrizes, o fundamento matemático por trás da técnica de Análise de Componentes Principais, a qual foi o cerne do primeiro artigo científico desta Dissertação.

Também, durante minhas leituras, me interessei pela modelagem de eventos climáticos extremos, que pode ser realizada por um gama de distribuições de probabilidade, e comecei aplicando o conhecimento de uma forma não tão eficiente. Contudo, graças a Deus, conheci a técnica de Análise de Frequência Regional baseada em momentos L, a qual engloba, além das distribuições de probabilidade, a Análise de Agrupamento e experimentos de simulação de Monte Carlo. Tudo isso foi aplicado no segundo artigo científico da minha pesquisa.

Não poderia deixar de destacar meu fascínio por técnicas de interpolação espacial, que foram parte fundamental dos dois artigos desenvolvidos.

Tudo isso considero como providência de Deus para mim, mas agradeço principalmente por Ele me proporcionar vida e saúde, e uma verdadeira paixão que tenho pela pesquisa científica.

Agradeço aos meus pais, Maria Clenilce Cruz Corrêa e Antunes Ribeiro Cirino, meus verdadeiros heróis, tudo na minha vida.

Agradeço aos meus avós, Aluizio Ribeiro Corrêa, Anolda Maria Cruz Corrêa e Maria do Socorro Almeida Ribeiro, que também são tudo na minha vida.

Agradeço ao Prof. Dr. Nítalo André Farias Machado, meu orientador durante essa jornada no mestrado, sempre disponível e me repassando conhecimentos e conselhos valiosos essenciais para a realização desta pesquisa. Serei eternamente grato!

Agradeço ao Dr. José Oscar Lustosa de Oliveira Júnior, meu coorientador, que também deu dicas valiosas para melhorar o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço aos Drs. José Francisco de Oliveira-Júnior e Edvaldo Sagrilo, por terem aceitado o convite para participar da banca de defesa e pelo tempo dedicado à leitura da minha Dissertação, com correções e sugestões valiosas para o melhoramento da mesma.

Agradeço aos Drs. Gustavo André de Araújo Santos e Marcos Vinicius da Silva por aceitarem ser os membros suplentes da banca de defesa.

Agradeço de forma especial a minha companheira, Janaiane Ferreira dos Santos, por todo o amor, paciência, companheirismo, carinho e incentivo.

Agradeço a todos os meus colegas de mestrado, que começamos essa jornada juntos: Alayne Rodrigues, Antônia Gomes, Daniel Andrade, Fernanda dos Santos, Fernando Pinto Júnior, Gilcyvan de Sousa, Janine Castro, Joany Viana, Karolline Silva, Maria Camilo, Matheus Oliveira, Shyrlei Viana e Vinicius Sampaio.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCAM) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) no Centro de Ciências de Chapadinha (CCCh) pela oportunidade concedida de realizar o mestrado.

Agradeço a todo o corpo docente do PPGCAM, especialmente aqueles professores com quem cursei disciplinas durante o curso.

Agradeço ao Prof. Dr. Gustavo André de Araújo Santos, por ter concedido a oportunidade de realizar o Estágio Docência em sua turma de Agronomia na UFMA/CCCh.

Agradeço ao grupo de pesquisa INOVAR, do qual faço parte e que têm contribuído para o meu crescimento acadêmico.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Finalizo agradecendo novamente a Deus, que até aqui têm me ajudado.

*“Não importa quanto a vida possa ser ruim,
sempre existe algo que você possa fazer, e
triunfar. Enquanto há vida, há esperança”.*

Stephen Hawking

RESUMO

Os veranicos causam perdas na produção de alimentos, especialmente quando prolongados e coincidem com a fase reprodutiva das culturas agrícolas. Também podem impactar os setores de recursos hídricos e ecologia. No estado do Maranhão, apesar dos riscos associados, os veranicos são pouco estudados. Portanto, o objetivo deste estudo foi analisar a ocorrência de veranicos no Maranhão. No primeiro capítulo apresenta-se uma revisão de literatura sobre os padrões climáticos, as características e causas de ocorrência de veranicos no Maranhão, os impactos de veranicos na agricultura, dentre outros temas de apoio teórico. Nos dois capítulos seguintes apresenta-se uma análise da dinâmica espaço-temporal dos veranicos durante a estação chuvosa (dezembro–maio) usando dados diários de precipitação de 123 estações meteorológicas distribuídas no Maranhão (93) e regiões circunvizinhas (30). No segundo capítulo, veranicos foram definidos como ≥ 3 dias consecutivos com precipitação < 1 mm (1994–2023), categorizados em classes A (3–6 dias), B (7–10 dias), C (11–14 dias) e D (≥ 15 dias), e espacializados utilizando o método de Ponderação pelo Inverso da Distância. A análise de componentes principais (ACP) foi aplicada às classes A ($>$ frequência) e D ($>$ duração) para identificar padrões de variabilidade em suas frequências relacionados a variáveis geográficas e atmosféricas, e sob quais características climáticas ocorrem. A classe A representou 62.29% dos veranicos, seguida pelas classes B (21.09%), C (8.55%) e D (8.07%). Esses eventos foram mais frequentes no início e no final da estação chuvosa na região centro-sul do Maranhão. Na ACP, a maior parte da variação foi explicada pela combinação de latitudes e altitudes mais elevadas (centro-sul), maior (menor) cobertura de nuvens em dezembro (março a maio), com: maior frequência de veranicos da classe A de dezembro a abril; e menor (maior) frequência de veranicos da classe D em dezembro (abril e maio). Em ambos os casos, essas relações ocorreram em ambientes mais frios e secos. No terceiro capítulo, as séries temporais (entre 1963 e 2023) de veranicos extremos foram submetidas à análise de frequência regional pelo método dos momentos L. Com base nos atributos geográficos e na média de duração dos veranicos extremos, foram identificadas cinco sub-regiões homogêneas no Maranhão. A medida de qualidade de ajuste (Z^{DIST}) e os diagramas de momentos L indicaram que para as sub-regiões 1 (a leste) e 3 (a centro-oeste) a distribuição do valor extremo generalizado é o melhor ajuste, enquanto para as sub-regiões 2 (a sul), 4 (a sul-sudoeste) e 5 (a norte) são as distribuições logística generalizada, tipo III de Pareto e normal generalizada, respectivamente. Todas as distribuições apresentaram precisão satisfatória nas estimativas de quantis regionais e em cada estação para diferentes períodos de retorno. A norte (sul) do Maranhão, a sub-região 5 (2) apresenta maior suscetibilidade a ocorrência de veranicos extremos, em grande parte devido a inconsistência das chuvas no início (fim) da estação chuvosa. Portanto, o centro-sul do Maranhão é mais propenso a veranicos, e a escassez de chuvas no início (fim) da estação chuvosa contribui para maior frequência de veranicos extremos no norte (sul) do Maranhão.

Palavras-chave: Precipitação diária, Veranicos, Variabilidade espaço-temporal, Análise multivariada, Frequência regional.

ABSTRACT

Dry spells cause losses in food production, especially when prolonged and coinciding with the reproductive phase of agricultural crops. They can also impact the water resources and ecology sectors. In the state of Maranhão, despite the associated risks, dry spells are poorly studied. Therefore, the objective of this study was to analyze the occurrence of dry spells in Maranhão. The first chapter presents a literature review on climatic patterns, characteristics and causes of dry spells in Maranhão, the impacts of dry spells on agriculture, among other supporting theoretical topics. The following two chapters present an analysis of the spatiotemporal dynamics of dry spells during the rainy season (December–May) using daily precipitation data from 123 meteorological stations distributed in Maranhão (93) and surrounding regions (30). In the second chapter, dry spells were defined as ≥ 3 consecutive days with precipitation < 1 mm (1994–2023), categorized into classes A (3–6 days), B (7–10 days), C (11–14 days), and D (≥ 15 days), and spatially represented using the Inverse Distance Weighting method. Principal component analysis (PCA) was applied to classes A ($>$ frequency) and D ($>$ duration) to identify patterns of variability in their frequencies related to geographic and atmospheric variables, and under which climatic characteristics they occur. Class A represented 62.29% of the dry spells, followed by classes B (21.09%), C (8.55%), and D (8.07%). These events were more frequent at the beginning and end of the rainy season in the south-central region of Maranhão. In PCA, most of the variation was explained by the combination of higher latitudes and altitudes (south-central), greater (lesser) cloud cover in December (March to May), with: a higher frequency of class A dry spells from December to April; and a lower (greater) frequency of class D dry spells in December (April and May). In both cases, these relationships occurred in colder and drier environments. In the third chapter, the time series (between 1963 and 2023) of extreme dry spells were subjected to regional frequency analysis using the L-moment method. Based on geographic attributes and the average duration of extreme dry spells, five homogeneous sub-regions were identified in Maranhão. The goodness-of-fit measure (Z^{DIST}) and L-moment diagrams indicated that, for sub-regions 1 (east) and 3 (west-central), the generalized extreme value distribution is the best fit, while for sub-regions 2 (south), 4 (south-southwest), and 5 (north), the generalized logistic, Pareto type III, and generalized normal distributions are the best fit, respectively. All distributions showed satisfactory accuracy in the estimates of regional quantiles and in each station for different return periods. North (south) of Maranhão, sub-region 5 (2) shows greater susceptibility to the occurrence of extreme dry spells, largely due to the inconsistency of rainfall at the beginning (end) of the rainy season. Therefore, south-central Maranhão is more prone to dry spells, and the scarcity of rain at the beginning (end) of the rainy season contributes to a higher frequency of extreme dry spells in northern (southern) Maranhão.

Keywords: Daily precipitation, Dry spells, Spatiotemporal variability, Multivariate analysis, Regional frequency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Pág.
CAPÍTULO II	44
Fig. 1. 1 Mapa do Maranhão, destacando as mesorregiões Centro, Leste, Norte, Oeste e Sul, altitude (m) e localização das estações meteorológicas da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).	48
Fig. 1. 2 Diagramas de caixa da precipitação mensal durante as estações chuvosa (a) e seca (b) no estado do Mara-nhão entre 1994 e 2023, com base em dados de 93 estações meteorológicas no estado. Os pontos azuis representam a média de precipitação individual para cada uma das 93 estações; os pontos vermelhos representam a média da precipitação calculada a partir das médias das 93 estações; a base e o topo das caixas representam, respectivamente, o 1º e o 3º quartis das médias de precipitação; as linhas pretas nas caixas representam a mediana das médias de precipitação; as linhas verticais (bigodes) da base e do topo das caixas representam os limites das médias de precipitação que não são outliers; e os pontos pretos representam os outliers das médias de precipitação.....	52
Fig. 1. 3 Distribuição espacial da precipitação média durante a estação chuvosa (dezembro–maio; a) e estação seca (junho–novembro; b) no Maranhão, 1994–2023.	53
Fig. 1. 4 Total e percentagem (%) de veranicos das classes A (3–6 dias), B (7–10 dias), C (11–14 dias) e D (≥ 15 dias) (a), e total de veranicos de cada classe em cada mês da estação chuvosa (b) no Maranhão entre 1994–2023	54
Fig. 1. 5 Diagramas de caixa da variabilidade mensal do total de veranicos para as classes A (a), B (b), C (c) e D (d) durante as 29 estações chuvosas avaliadas (dezembro de 1994/maio de 1995 a dezembro de 2022/maio de 2023) no estado do Maranhão. Os pontos azuis representam o total de veranicos registrados em cada uma das 29 estações chuvosas; os pontos vermelhos representam a média do total de veranicos ao longo das 29 estações chuvosas; e os pontos pretos representam totais de veranicos discrepantes em uma das estações chuvosas	55
Fig. 1. 6 Distribuição espacial da frequência de veranicos (totais entre 1994 e 2023) das classes A (a), B (b), C (c) e D (d) durante a estação chuvosa (dezembro a maio) no Maranhão.	56
Fig. 1. 7 Distribuição espacial dos escores dos componentes (PC1, PC2, PC3) para veranicos das classes A (a–c) e D (d–f) no Maranhão.	59
CAPÍTULO III	69

Fig. 2. 1 Mapa do estado do Maranhão, com destaque para as mesorregiões Centro, Leste, Norte, Oeste e Sul, elevação (m) e localização das estações meteorológicas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).....	72
Fig. 2. 2 Distribuição espacial da precipitação média (1994-2023) para cada mês da estação chuvosa – dezembro (a), janeiro (b), ..., maio (f) – no estado do Maranhão.	79
Fig. 2. 3 Divisão de cinco sub-regiões homogêneas do estado do Maranhão com base nos atributos de latitude, longitude, altitude e duração média de veranicos extremos das estações meteorológicas, via agrupamento <i>K</i> -means e ajustes subjetivos.....	80
Fig. 2. 4 Valores da medida de discordância D_i das estações que compõem as cinco sub-regiões homogêneas identificadas no Maranhão.	81
Fig. 2. 5 Diagrama da razão dos momentos <i>L</i> para a sub-região 1 (a), sub-região 2 (b), sub-região 3 (c), sub-região 4 (d) e sub-região 5 (e) no estado do Maranhão. Os pontos azuis e o ponto vermelho representam, respectivamente, as razões dos momentos <i>L</i> de cada es estação e a <i>L</i> -assimetria e <i>L</i> -curtose médias regionais.....	83
Fig. 2. 6 Curvas de crescimento regional para a sub-região 1 (a), sub-região 2 (b), sub-região 3 (c), sub-região 4 (d) e sub-região 5 (e), estimadas por meio das funções quantílicas das distribuições selecionadas para cada sub-região. Os valores no eixo <i>x</i> representam os períodos de retorno em forma de variável reduzida de Gumbel, enquanto no eixo <i>y</i> representam os quantis regionais de veranicos extremos.	85
Fig. 2. 7 Distribuição espacial dos quantis de veranicos extremos durante a estação chuvosa no Maranhão, para os períodos de retorno (<i>T</i>) de 2 (a), 5 (b), 10 (c), 25 (d), 50 (e) e 100 anos (f), associados às probabilidades de não-excedência <i>F</i> de 0.50, 0.80, 0.90, 0.96, 0.98 e 0.99, respectivamente.	86
Fig. 2. 8 Medidas de precisão das estimativas de quantis de períodos máximos de seca para a sub-região 1 (a), sub-região 2 (b), sub-região 3 (c), sub-região 4 (d) e sub-região 5 (e). As probabilidades de não-excedência <i>F</i> consideradas foram: $0.01 \leq F \leq 0.99$, em incrementos de 0.01.....	87

LISTA DE TABELAS

	Pág.
CAPÍTULO II	44
Tabela 1. 1 Resumo da ACP aplicada aos veranicos das classes A e D: valores de KMO, cargas fatoriais e contribuições (ctr) das variáveis principais nos três componentes (PC1, PC2, PC3), com respectivos autovalores, variância explicada e acumulada, bem como cargas fatoriais das variáveis suplementares nos três componentes.....	57
CAPÍTULO III	69
Tabela 2. 1 Sub-regiões com seus totais de estações, estatísticas descritivas de veranicos extremos e valores de heterogeneidade (H_I).	81
Tabela 2. 2 Valores da estatística de qualidade de ajuste, Z^{DIST} , para as cinco distribuições candidatas avaliadas em cada sub-região. Os valores em negrito indicam a distribuição de probabilidade selecionada.....	82
Tabela 2. 3 Parâmetros de localização, escala e forma das distribuições de probabilidade selecionadas para as sub-regiões homogêneas identificadas no Maranhão, estimados pelo método dos momentos L.	83

LISTA DE SIGLAS

ACP – Análise de Componentes Principais
ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BMs – brisas marítimas
CCMs – Complexos Convectivos de Mesoescala
CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CPs – Componentes Principais
ENOS – El Niño-Oscilação Sul
ETP – evapotranspiração potencial
EUA – Estados Unidos da América
FFs – Frentes Frias
GEV – Valor Extremo Generalizado (do inglês: *Generalized Extreme Value*)
GLO – Logística Generalizada (do inglês: *Generalized Logistics*)
GNO – Normal Generalizada (do inglês: *Generalized Normal*)
GPA – Pareto Generalizada (do inglês: *Generalized Pareto*)
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW – Inverse Distance Weighting
IMESC – Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
KMO – Kaiser-Meyer-Olkin
LIs – linhas de instabilidade
mEa – massa equatorial atlântica
mEc – massa equatorial continental
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NCEI – National Centers for Environmental Information
NEB – Nordeste do Brasil
NUGEO – Núcleo Geoambiental
PE3 – tipo III de Pareto (do inglês: *Pareto type III*)
POWER – Prediction Of Worldwide Energy Resources
PPB – Produção Primária Bruta
SSP – Shared Socioeconomic Paths
TSM – Temperatura da Superfície do Mar

UNCCD – United Nations Convention to Combat Desertification

VCANs – Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

	Pág.
CAPÍTULO I	18
CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	18
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
1.1 Clima do estado do Maranhão	19
1.2 Veranicos: características e causas de ocorrência	21
1.3 Mudanças climáticas antropogênicas: influência sobre secas de curta duração	24
1.4 Impactos de secas rápidas (veranicos ou secas repentinas) em diferentes regiões do mundo.....	27
1.5 Impactos dos veranicos na agricultura do Brasil	30
1.6 Alertas para veranicos e resiliência da agricultura no Maranhão.....	31
1.7 Monitoramento da seca no Brasil	32
2 OBJETIVOS	34
2.1 Geral	34
2.2 Específicos	34
REFERÊNCIAS	35
 CAPÍTULO II.....	 44
Dinâmica espaço-temporal de veranicos durante a estação chuvosa no estado do Maranhão, Brasil.....	45
Resumo	45
1. Introdução	45
2. Material e métodos	47
2.1. Caracterização da área de estudo	47
2.2. Processo de coleta de dados e preenchimento de falhas.....	48
2.3. Categorização e contagem de veranicos	49
2.4. Mapeamento e análises estatísticas	50
3. Resultados	51
3.1. Distribuição das chuvas no Maranhão	51
3.2. Análise exploratória e distribuição espacial de veranicos	54
3.3. ACP aplicada às classes de veranicos mais frequentes e de maior duração	57
4. Discussão	60
4.1. Padrões de precipitação no Maranhão	60
4.2. Frequência e distribuição espacial dos veranicos no Maranhão.....	61

4.3. Veranicos de classe A e D: relações com variáveis geográficas e atmosféricas	62
4.5. Implicações para a adaptação climática no Maranhão.....	63
5. Conclusões	64
Referências	65
 CAPÍTULO III	69
Análise de frequência regional de veranicos extremos durante a estação chuvosa no Maranhão, Brasil.....	70
Resumo	70
1 Introdução	70
2 Material e métodos	71
2.1 Caracterização da área de estudo	72
2.2 Coleta de dados e preenchimento de falhas.....	73
2.3 Estação chuvosa e identificação de veranicos extremos.....	73
2.4 Análise de Frequência Regional	73
2.4.1 Momentos L: uma breve introdução.....	73
2.4.2 Etapas da Análise de Frequência Regional.....	74
2.4.2.1 Triagem dos dados.....	74
2.4.2.2 Identificação de regiões homogêneas	75
2.4.2.3 Escolha da distribuição de frequência	76
2.4.2.4 Estimativa da distribuição de frequência.....	77
2.5 Mapeamento das estimativas de veranicos extremos	78
3 Resultados	78
3.1 Precipitação média mensal e triagem das séries de veranicos extremos ...	78
3.2 Identificação de regiões homogêneas no Maranhão.....	79
3.3 Seleção de distribuição de probabilidade regional	82
3.4 Estimativas das distribuições de probabilidade selecionadas	83
3.5 Avaliação da precisão dos quantis estimados	86
4 Discussão	87
4.1 Análise preliminar das séries de veranicos extremos.....	88
4.2 Sub-regiões homogêneas	88
4.3 Distribuição de probabilidade apropriada.....	89
4.4 Qualidade das estimativas	89
4.5 Desafios para a resiliência climática no Maranhão.....	89

5 Conclusão	91
Recomendação	91
Referências	91
CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	95

APÊNDICES

APÊNDICE A	97
APÊNDICE B.....	100
APÊNDICE C	101
APÊNDICE D	104
APÊNDICE E.....	105
APÊNDICE F.....	107
APÊNDICE G	108
APÊNDICE H	109

CAPÍTULO I

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conhecer a variabilidade espaço-temporal das chuvas pluviais em regiões de clima tropical é essencial para o bom planejamento em diversos setores, dentre eles os de agricultura, recursos hídricos e ecológico. Por exemplo, para o agricultor, o entendimento da variabilidade das chuvas, tanto no tempo quanto no espaço, é um diferencial para a obtenção de maiores produtividades das lavouras.

O estado do Maranhão conta com formações vegetais do bioma Cerrado e Amazônia, onde ocorrem duas estações climáticas diferentes, uma quente e úmida e a outra quente e seca. Os volumes pluviais ao longo da estação chuvosa favorecem a exploração de culturas agrícolas no estado, sobretudo culturas anuais como soja, milho, arroz e feijão. No entanto, a forma como as chuvas se distribui temporal e espacialmente é um fator de grande preocupação para o setor agrícola, em função da ocorrência de estiagens durante a estação chuvosa, muitas vezes coincidentes com estágios fenológicos sensíveis das culturas ao déficit hídrico.

Tais períodos de estiagens durante a estação chuvosa é comumente chamado de “veranico” no Brasil (Walker *et al.*, 2024). Além dos déficits de chuva, os veranicos também são geralmente acompanhados por altas temperaturas, promovendo a rápida dessecação do solo, e são muito frequentes nas regiões tropicais. Neste contexto, os veranicos representam um fator de grande risco para a agricultura no Maranhão, uma vez que o estado é totalmente situado em uma região tropical, e grande parte de seu território faz parte da fronteira agrícola denominada MATOPIBA (Daltio; Martinho; Magalhães, 2016). Isto então exige atividades agrícolas com um melhor planejamento, além de maiores investimentos para minimizar os efeitos danosos dos veranicos sobre o desenvolvimento das culturas.

Adicionalmente, em relação aos recursos hídricos, o Maranhão possui sete bacias hidrográficas de domínio estadual, três de domínio federal e dois sistemas hidrográficos em suas regiões litorâneas (Núcleo Geoambiental – NUGEO, 2016). Veranicos extremos durante a estação chuvosa podem ser o “gatilho” para secas hidrológicas, por contribuir para a redução da recarga dos aquíferos e da vazão dos rios. Van Loon (2015) destaca que, em climas sazonais quentes, a maior parte da recarga ocorre principalmente durante a estação chuvosa, e que um déficit prolongado de chuvas ao longo da estação provoca a

redução do armazenamento de água e pode agravar as condições na estação seca subsequente. Durante a estação seca, a precipitação geralmente é inferior (ou muito inferior) a evapotranspiração, contribuindo para o desenvolvimento da seca. Van Loon e Van Lanen (2012) designaram este fenômeno específico como "seca da estação chuvosa para a estação seca". Por conseguinte, Van Loon *et al.* (2014) o identificaram principalmente em climas mediterrâneos, de savana e de monções – inclusive no Maranhão. Seus impactos podem ser sentidos na agricultura de sequeiro (totalmente dependente das chuvas) e irrigada, nos ecossistemas aquáticos, na distribuição de energia hidrelétrica, na disponibilidade de água potável etc. (Van Loon, 2015).

Portanto, diante da significativa ameaça que os veranicos representam para a agricultura, os recursos hídricos e os ecossistemas do Maranhão, este estudo se propõe a servir como uma base científica fundamental. Seus resultados visam subsidiar o desenvolvimento de medidas estratégicas para mitigar os impactos adversos dos veranicos. Tais medidas são urgentes e incluem, por exemplo, a promoção de sistemas agrícolas conservacionistas, como plantio direto, retenção de resíduos, rotação de culturas e a integração lavoura-pecuária-floresta, que aumentam a resiliência dos cultivos frente aos desafios climáticos emergentes (Kassam *et al.*, 2022). Adicionalmente, é crucial o aprimoramento do monitoramento da seca em escalas temporais e espaciais mais refinadas, permitindo alertas precoces e ações mais direcionadas (Walker; Van Loon, 2023; Walker *et al.*, 2024). Dessa forma, o estudo busca contribuir para um planejamento setorial mais robusto, garantindo maior segurança hídrica, produtiva e ambiental para o Maranhão.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Clima do estado do Maranhão

O estado do Maranhão pertence à Região Nordeste do Brasil (NEB). A oeste faz limite com o estado do Pará, a sul e sudoeste com o estado do Tocantins, a leste e sudeste com o estado do Piauí e a norte com o Oceano Atlântico (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2022). Conta com duas estações bem definidas ao longo do ano, sendo uma estação chuvosa e outra seca. O centro-norte do estado apresenta as maiores médias anuais de precipitação, com valores superiores a 2.200 mm, ao passo que regiões no centro-sul com médias inferiores a 1.100 mm (Alvares *et al.*, 2013a; Corrêa; Carvalho; Mendes, 2023).

Localizado em uma zona de transição e contando com uma grande extensão territorial, o Maranhão conta com a influência do clima semiárido nordestino, da Amazônia

quente e úmida e dos chapadões do Brasil central (Menezes, 2009). No sul do estado, as primeiras chuvas ocorrem a partir do mês de outubro, se tornando mais frequentes e intensas a partir do mês de novembro, sob a atuação de Frentes Frias (FFs), da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) (Ferreira; Mello, 2005; Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos – IMESC, 2022; Marengo *et al.*, 2011; Menezes, 2009; Reboita *et al.*, 2010). No entanto, no estado como um todo, a estação chuvosa ocorre principalmente entre os meses de dezembro e maio, que historicamente concentram mais de 80% do registro total anualmente, com fevereiro, março e abril destacando-se como o trimestre mais chuvoso, enquanto julho, agosto e setembro representam o oposto desse padrão (Corrêa; Carvalho; Mendes, 2023).

Durante a estação chuvosa, o principal sistema meteorológico causador de chuvas no Maranhão, principalmente em sua parte centro-norte, é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), derivada da confluência dos ventos alísios de sudeste (Hemisfério Sul) e nordeste (Hemisfério Norte), com variação sazonal, com sua posição mais austral ($\sim 4^{\circ}\text{S}$) entre os meses de fevereiro e abril (Ferreira; Mello, 2005; Marengo *et al.*, 2011; Menezes, 2009; Reboita *et al.*, 2010). Sistemas como Complexos Convectivos de Mesoescala tropical, brisas marítima e terrestre, linhas de instabilidade (Ferreira; Mello, 2005; Reboita *et al.*, 2010), massa de ar equatorial atlântica e continental (Mendonça; Danni-Oliveira, 2007) e Distúrbios Ondulatórios de Leste (Barry; Chorley, 2012; Ferreira; Mello, 2005) também são responsáveis pela ocorrência de chuvas no estado.

Também, a distribuição espaço-temporal das chuvas no Maranhão é fortemente influenciada pelas teleconexões oceano-atmosfera (IMESC, 2022). Havendo o aquecimento anormal da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e o enfraquecimento dos ventos alísios na região do Pacífico Equatorial (entre a costa do Peru e o Pacífico Oeste), configura-se o fenômeno El Niño (fase do modo de variabilidade climática - El Niño-Oscilação Sul), responsável por chuvas inferiores à média climatológica em regiões tropicais (Ferreira; Mello, 2005; Marengo *et al.*, 2011; Menezes, 2009). Em contraste, havendo o resfriamento anormal da TSM no Pacífico Equatorial com intensificação dos alísios, configura-se o fenômeno La Niña, geralmente provocando anomalias climáticas inversas às do El Niño (Ferreira; Mello, 2005; Marengo *et al.*, 2011; Menezes, 2009). Contudo, a relação entre ambos não é essencialmente linear (Marengo *et al.*, 2011).

Em relação à temperatura média anual, esta varia entre 23°C a 29°C, com as maiores médias observadas principalmente em grande parte do centro-norte, enquanto as menores são observadas no centro-sul do Maranhão (Alvares *et al.*, 2013b). Ao longo do ano, os meses de setembro, outubro e novembro registraram as maiores médias de temperatura, enquanto fevereiro e março apresentam temperaturas amenas (Corrêa; Carvalho; Mendes, 2023).

Com essas características climáticas supracitadas, o Maranhão conta com os seguintes regimes climáticos: Aw, As e Am, de acordo com a última versão da classificação climática de Köppen (Alvares *et al.*, 2013a). Os climas Aw e As são caracterizados como climas tropicais de savana, enquanto Am como clima tropical de monção, ambos com temperatura média do mês mais frio $> 18^{\circ}\text{C}$. Aw denota climas com chuvas concentradas no verão, As no inverno e, Am, clima com chuvas mais distribuídas ao longo do ano, com aproximadamente quatro meses mais secos, somente (Alvares *et al.*, 2013a).

No ano de 2023, Corrêa; Carvalho e Mendes atualizaram a classificação climática para o estado do Maranhão pela versão metodológica de Köppen (1931), além da proposta por Thornthwaite (1948), com base nas definições de solstícios e equinócios. Assim como Alvares *et al.* (2013a), os autores identificaram os climas Aw e Am. Porém, em vez do clima As, foi identificado o clima Aw', que caracteriza climas tropicais com chuvas distribuídas entre as estações de verão e outono. Pela metodologia de Thornthwaite, foram identificados os climas C1dA'a', C1sA'a', C1wA'a', C1w2A'a', C2wA'a', C2w2A'a' e B1wA'a', ambos megatérmicos, com concentração da evapotranspiração potencial (ETP) de verão inferior a 48% e com condições específicas de excedentes e déficits hídricos.

1.2 Veranicos: características e causas de ocorrência

Nos países que contam com clima tropical, tais como o Brasil, ocorrem registros de chuvas consideráveis ao longo do ano (Alvares *et al.*, 2013a; Corrêa; Carvalho; Mendes, 2023). No entanto, seja temporal ou espacialmente, tais registros não são regulares, devido à existência de uma estação chuvosa e outra seca, principalmente nas áreas de Cerrado (Assad *et al.*, 1993; Roldão, 2020). Ainda que a maioria do acumulado anual ocorra na estação chuvosa, é comum haver a ocorrência de veranicos nessa estação, com dias consecutivos de precipitação inferior a um determinado limite, considerados como dias secos (Assad *et al.*, 1993; Roldão, 2020; Walker; Van Loon, 2023; Walker *et al.*, 2024). A nomenclatura “veranico” é particularmente usada no Brasil, mas em outras regiões do mundo e muitos estudos publicados em língua inglesa utiliza-se a denominação

“período seco” para o mesmo fenômeno (ver Walker et al. 2024 para informações detalhadas).

Os veranicos geralmente são acompanhados por altas temperaturas e alta demanda evaporativa (Walker; Van Loon, 2023; Walker *et al.*, 2024), em que esta última pode ser intensificada, também, por condições atmosféricas persistentes como intenso brilho solar, déficit de pressão de vapor, baixa presença de nuvens e alta velocidade do vento, que provocam o aumento da ETP e o estresse evaporativo (Magalhães *et al.*, 2019; Walker; Van Loon, 2023). Adicionalmente, as condições atmosféricas e oceânicas controlam a duração e a quantidade de eventos de veranicos, sendo responsáveis pela distribuição e intensidade anual das precipitações pluviais. Exemplos incluem os anos de El Niño e La Niña, além das fases positivas e negativas do Dipolo de anomalias de TSM do Atlântico (Philander, 1990), que influenciam a ocorrência de chuvas, como no NEB, afetando ano após ano a ocorrência de veranicos (Rodrigues *et al.*, 2011).

Cunningham (2020) destaca que não há consenso sobre a definição de um limite de precipitação que separa um dia chuvoso de um dia seco. Por exemplo, Assad *et al.* (1993), Anandhi *et al.* (2016), Froidurot e Diedhiou (2017), Bako *et al.* (2020) e Oliveira *et al.* (2021) consideraram um dia seco como aquele com precipitação inferior a 1 mm, e um veranico foi caracterizado pela ocorrência de dias secos consecutivos. No Sul da Itália, Caloiero *et al.* (2015) caracterizaram veranicos (período seco) como a ocorrência de pelo menos um dia com precipitação menor que 0,1 mm. No Monitor de Secas do Brasil, um veranico é caracterizado pela ocorrência de pelo menos 3 dias consecutivos com precipitação menor que 2 mm (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE, 2016). Para a Região Sudeste do Brasil, Cunningham (2020) caracterizou os veranicos (período seco) como um ou mais dias consecutivos com precipitação igual a 0 mm. Na Bacia do Lago Kyoga em Uganda, África Oriental, Ojara *et al.* (2020) caracterizaram veranico (período seco) como a sequência de dias com precipitação inferior a 0,85 mm. Para o estado do Tocantins, Brasil, Roldão (2020) considerou dia seco como aquele em que a precipitação foi igual ou inferior à ETP diária média, e os veranicos foram caracterizados como pelo menos 5 dias secos consecutivos.

Walker *et al.* (2024) enfatizam que durante a ocorrência de um veranico, o déficit de precipitação e o calor associado fazem com que o solo perca umidade rapidamente, podendo resultar em impactos agrícolas e socioeconômicos semelhantes aos de secas mais longas. Para o NEB, os autores ainda destacam que a perda rápida de umidade do solo também se deve à predominante geologia cristalina da região, onde grande parte dos

solos são pobres em nutrientes, pedregosos e rasos (0,5 m), sendo isto responsável por uma baixa capacidade de retenção de água.

Em países como EUA e China, um fenômeno bastante estudado e que também se deve aos déficits de precipitação durante a estação chuvosa, recebe o nome de “seca repentina” (Lisonbee; Woloszyn; Skumanich, 2022; Otkin *et al.*, 2018; Svoboda *et al.*, 2002; Walker; Van Loon, 2023; Walker *et al.*, 2024). Tal fenômeno é caracterizado por uma taxa de início rápida – geralmente medida em pântada (5 dias) – de perda de umidade do solo – a parte repentina –, seguida por um período mínimo de múltiplas pântadas em que tal umidade se mantém anormalmente baixa – a seca (Walker *et al.*, 2024). Contudo, não há uma taxa padrão de perda rápida de umidade do solo e um período mínimo padrão subsequente em que a umidade se mantém anômala, sendo encontrado na literatura uma ampla gama de definições, que envolvem também outros indicadores, como a ETP (ver Lisonbee; Woloszyn; Skumanich, 2022 para detalhes).

Neste contexto, as secas repentinas se devem à ocorrência de veranicos extremos, ou mesmo veranicos de curta duração ocorrendo com alta frequência durante uma estação chuvosa em uma região. Por exemplo, no ano de 2012, as Grandes Planícies centrais dos EUA experimentaram uma seca repentina severa, devida à falta de chuvas e temperaturas elevadas entre maio e agosto, período da estação chuvosa na região (Hoerling *et al.*, 2014).

Autores como Basara *et al.* (2019), Christian *et al.* (2019) e Christian *et al.* (2020) enfatizam que as secas repentinas são fortemente influenciadas pelo acoplamento terra-atmosfera em regiões propensas à sua ocorrência, em que a diminuição da evapotranspiração devido ao esgotamento da umidade do solo limita a moderação das temperaturas da superfície, aumentando a demanda evaporativa. Com o fluxo de umidade reduzido da superfície, configura-se uma coluna atmosférica mais seca, que inibe a geração de precipitação e favorece o desenvolvimento de secas repentinas, especialmente em zonas de transição climática sensíveis à dinâmica de acoplamento (Christian *et al.*, 2021). Menezes (2009) destaca que o Maranhão está situado em uma zona de transição climática, o que o configura como propenso à ocorrência de secas repentinas, e isto pode ser observado no estudo de Christian *et al.* (2021), especialmente no centro-sul do estado.

Também, Christian *et al.* (2021) destacam que, além das contribuições do acoplamento terra-atmosfera, as características climáticas podem influenciar a distribuição espacial de secas repentinas. Esses autores identificaram que, em regiões tropicais, a ETP média diária excede 5 mm, sendo as mais altas em relação a outras regiões terrestres de

latitudes médias. Além disso, observaram uma elevada variabilidade da precipitação interanual, principalmente na América do Sul equatorial e na África. Assim, segundo os autores, a associação entre alta demanda evaporativa e alta variabilidade da precipitação pode contribuir para uma maior frequência de secas repentinas nessas regiões, ainda que a precipitação anual em algumas de suas partes seja considerável.

1.3 Mudanças climáticas antropogênicas: influência sobre secas de curta duração

Walker e Van Loon (2023) destacam que o termo “seca repentina” teve origem nos EUA no início do século XXI, mas as secas repentinas ocorrem em todo o mundo, com características variadas e recebem diferentes nomenclaturas pelas populações locais. Walker *et al.* (2024) classificam as secas repentinas em cinco tipos, categorizando os veranicos como secas repentinas do Tipo 2, caracterizadas por curta duração (dias a semanas) durante a estação chuvosa.

Walker *et al.* (2024) enfatizam que os veranicos são um tipo controverso de seca repentina porque não se enquadram na maioria das definições publicadas, que, como já mencionado, medem uma taxa de intensificação durante um número mínimo de pântadas e um subsequente período seco com um número mínimo de pântadas de duração. Estas se tratam das secas repentinas Tipo 1 (Walker *et al.*, 2024), enquadradas na definição “clássica” que, segundo Svoboda *et al.* (2002), “seca repentina... refere-se à rápida deterioração das colheitas devido aos efeitos adversos de uma onda de calor severa e à seca de curto prazo, levando ao rápido início da seca e impactos associados na agricultura, potencial de incêndio, saúde do gado e outras áreas”.

Contudo, estudos sobre ou que mencionam secas repentinas do Tipo 1 (por exemplo: Christian *et al.*, 2020, 2021; Gerken *et al.*, 2018; Hoerling *et al.*, 2014; Yuan; Wang; Wood, 2018; Yuan *et al.*, 2019, 2023) sempre mencionam a deficiência de precipitação durante a estação chuvosa como um dos ou principal fator de seu desenvolvimento, juntamente com alta demanda evaporativa. Estes fatores são as principais características das secas repentinas do Tipo 2 (veranicos), levando a “concluir” que estas são a causa primeira das secas repentinas Tipo 1. Assim, estudos sobre secas repentinas Tipo 1 que abordem seu comportamento histórico e futuro podem trazer informações sobre o comportamento histórico e futuro das secas repentinas Tipo 2 e vice-versa.

Exemplos marcantes da ocorrência de secas rápidas (veranicos ou secas repentinas Tipo 2) no passado recente e que resultaram em grandes perdas ambiental e socioeconômica incluem aquelas no sul do Brasil em 2004/2005 (Farias; Nepomuceno; Neumaier,

2007), oeste da Rússia em 2010 (Christian *et al.*, 2020), centro dos EUA em 2012 (Hoerling *et al.*, 2014), sul da China em 2013 (Yuan *et al.*, 2015), sul da África em 2015 (Yuan; Wang; Wood, 2018) e norte dos EUA em 2017 (Gerken *et al.*, 2018). Neste contexto, autores como Yuan *et al.* (2019), Mishra; Aadhar e Mahto (2021), Sreeparvathy e Srinivas (2022), Christian *et al.* (2023), Yuan *et al.* (2023) e Barbosa; Buriti e Kumar (2024) desenvolveram estudos para investigar como as mudanças climáticas antropogênicas e os fatores subjacentes influenciam e influenciarão a variabilidade espaço-temporal e intensidade das secas repentinas Tipo 1 em diversas partes do mundo. Os principais resultados desses estudos, descritos a seguir, podem ser um indicativo do comportamento dos veranicos nesses países ou regiões. As secas repentinas Tipo 1 serão mencionadas somente como “secas repentinas”.

Para a China, Yuan *et al.* (2019) descobriram que o risco de exposição às secas repentinas aumentará em cerca de $23\% \pm 11\%$ por volta de 2050 em um cenário socioeconômico com desafio médio. As mudanças climáticas antropogênicas, desencadeadas pelo aumento das concentrações de gases de efeito estufa, são responsáveis por $77\% \pm 26\%$ da tendência ascendente da frequência de secas repentinas. Além disso, o aumento da população também é um fator importante para ampliar o risco de exposição à seca repentina nas regiões úmidas mais ao sul do país.

Para a Índia, Mishra *et al.* (2021) observaram que as secas repentinas ocorrem predominantemente durante a estação das monções de verão (junho a setembro), impulsionadas pela variabilidade intrasazonal das chuvas de monção. No período de dados analisados (1951-2016), a seca repentina mais severa (indicativo de um veranico extremo) ocorreu em 1979, afetando mais de 40% do país. A frequência de extremos quentes e secos simultâneos deve aumentar cerca de cinco vezes, causando um aumento de aproximadamente sete vezes nas secas repentinas até 2100. O aumento do risco de secas repentinas no futuro é atribuído à variabilidade intrasazonal das chuvas de monção de verão e às emissões antropogênicas de gases de efeito estufa.

No Brasil, especificamente na Região Nordeste, Barbosa; Buriti e Kumar (2024) descobriram que, entre 2024 e 2050, no cenário SSP5-8.5 (cenários de forçamento dos Caminhos Socioeconômicos Compartilhados – do inglês: *Shared Socioeconomic Pathways*), as secas repentinas se tornarão mais intensas e com grande variabilidade espacial, principalmente na bacia do Rio São Francisco. Isso representa sérios desafios para os recursos hídricos, agricultura e ecossistemas nessas áreas que, historicamente e com

frequência, são afetadas pelos mais variados tipos ou graus de seca (Barbosa, 2023, 2024; Barbosa; Buriti; Kumar, 2024; Marengo *et al.*, 2011; Marengo; Torres; Alves, 2017).

Em escala global, continental e regional, Sreeparvathy e Srinivas (2022) observaram que: a frequência, duração e gravidade das secas repentinas devem aumentar globalmente ~20-50%, 20-58% e 26-62%, respectivamente, com maior probabilidade de ocorrência durante a temporada de verão; as regiões propensas à ocorrência de secas repentinas apareceram proeminentemente em zonas áridas e semiáridas; o risco de exposição às secas repentinas é projetado para exceder ~1,5 vezes na maioria dos continentes, com o maior risco no subcontinente indiano; na Europa e na América do Sul, que atualmente são menos impactadas por secas repentinas, um aumento considerável nas regiões de pontos quentes (~122-127%) é projetado sob o cenário mais quente, SSP5-8.5.

Christian *et al.* (2023) quantificaram as mudanças projetadas na frequência e risco de secas repentinas em terras agrícolas usando simulações de modelos climáticos globais considerando diferentes SSPs. Os autores descobriram que a ocorrência de secas repentinas deve aumentar globalmente em todos os cenários, com os aumentos mais acentuados observados em cenários com maior forçamento radiativo e maior uso de combustíveis fósseis. Espera-se um aumento no risco de seca repentina nas terras agrícolas em todo o mundo, com os maiores aumentos projetados na América do Norte (saindo de um risco anual de 32% em 2015 para 49% em 2100) e na Europa (32% para 53%) no SSP5-8.5.

Também em nível global, Yuan *et al.* (2023) mostraram que as taxas de intensificação da seca aceleraram em escalas de tempo subsazonais e que houve uma transição para mais secas repentinas em 74% das regiões globais identificadas pelo Relatório Especial do IPCC sobre Eventos Extremos durante os últimos 64 anos (Seneviratne *et al.*, 2012). A transição está associada a anomalias amplificadas de evapotranspiração e déficit de precipitação causadas por mudanças climáticas antropogênicas. No futuro, a transição deve se expandir para a maioria das áreas terrestres, com aumentos maiores em cenários de emissões mais altas.

Ohba *et al.* (2022) investigaram o impacto das mudanças climáticas e períodos de seca (veranicos) no Japão por meio de projeções climáticas regionais. Os autores descobriram que haverá redução na disponibilidade hídrica no arquipélago japonês, além de um aumento na quantidade de períodos de seca no verão para a maior parte do país, especialmente em áreas litorâneas. Na Rússia, Ye e Fetzer (2019) analisaram os dados de 517 estações meteorológicas com séries históricas de 1966 a 2010 e descobriram que os

verões registraram, respectivamente, subidas e quedas significativas na frequência de períodos de seca de 7 dias ou mais (+6,1% para cada 1°C de aquecimento) e 3 dias ou menos (-2,4% para cada 1°C de aquecimento). Para a Bacia do Mediterrâneo, Raymond *et al.* (2019) investigaram a evolução dos períodos de seca e suas projeções climáticas futuras regionais, identificando um aumento no número, na duração média e na extensão espacial de períodos de seca muito longos durante a estação chuvosa.

1.4 Impactos de secas rápidas (veranicos ou secas repentinas) em diferentes regiões do mundo

Walker e Van Loon (2023) destacam que os veranicos ou secas repentinas se manifestam na umidade do solo, sendo a agricultura e os ecossistemas os primeiros a sentir os efeitos do rápido esgotamento dessa umidade. De acordo com estes autores, os efeitos desses eventos dependem de vários fatores, como por exemplo: da velocidade de dessecação do solo – pois alguns solos dessecam mais rapidamente do que outros; da disponibilidade de recursos hídricos – sendo que algumas áreas possuem recursos abundantes que poderiam fornecer irrigação suplementar; da resistência das culturas ao estresse hídrico e térmico – já que algumas culturas são mais resistentes a esses tipos de estresse; da proporção da população dependente da agricultura – uma vez que a dependência da agricultura para subsistência varia muito entre as regiões; e, da velocidade de recuperação da seca – considerando se a seca se recupera tão rapidamente quanto começou ou se transforma em uma longa seca normal.

Além das condições descritas acima, o efeito de um veranico sobre as culturas também depende do estágio de desenvolvimento em que coincidem (Assad *et al.*, 1993; Carvalho *et al.*, 2000; Walker; Van Loon, 2023; Walker *et al.*, 2024). Por exemplo, se um veranico de apenas alguns dias coincide com o estágio de floração ou polinização da cultura, isto pode afetar significativamente o rendimento das colheitas (Walker; Van Loon, 2023). Esta situação é recorrente em regiões de Cerrado no Brasil (Assad *et al.*, 1993; Carvalho *et al.*, 2000). Por outro lado, um veranico que ocorre no final da estação de crescimento pode ser benéfico para o crescimento das plantas e o amadurecimento dos frutos (Hamed *et al.*, 2021) e mesmo para as operações de colheita.

À medida que a umidade do solo segue por mais tempo em níveis anormalmente baixos, juntamente com o estresse evaporativo excessivo que o acompanha, danos severos podem ser experimentados pelos ecossistemas (Basara *et al.*, 2019; Otkin *et al.*, 2018). Além disso, tal condição serve como gatilho para o agravamento de eventos extremos

com efeitos deletérios em cascata, incluindo o estabelecimento de condições favoráveis para o desenvolvimento de incêndios florestais, esgotamento dos recursos hídricos, redução da qualidade do ar, da segurança alimentar e da distribuição de energia hidrelétrica (Christian *et al.*, 2020, 2024; Gerken *et al.*, 2018; Hoell *et al.*, 2020; Yuan *et al.*, 2019).

Na safra de 2004/2005, veranicos foram responsáveis por mais de 80% das perdas totais da produção de soja no Brasil, com maior impacto na região Sul (Farias; Nepomuceno; Neumaier, 2007). Os autores destacam que, nos estados do Rio Grande do Sul e do Paraná – que, na época, respondiam por mais de 40% da produção nacional de soja –, as perdas de produtividade atingiram 78% e 23%, respectivamente, em comparação com a safra 2002/2003, que não sofreu estresse hídrico. No Rio Grande do Sul, o rendimento médio das lavouras caiu drasticamente, de 2.667 kg ha⁻¹ (2002/2003) para 565 kg ha⁻¹ (2004/2005). Esses impactos extrapolaram o setor agrícola, afetando toda a sociedade, conforme enfatizado pelos autores.

Na Região Nordeste do Brasil, especificamente no bioma Caatinga, Barbosa (2023) descobriu que, entre 2004 e 2022, os eventos de seca repentina exerceram impactos dramáticos nos ecossistemas terrestres, com mudanças na dinâmica sazonal e regional da vegetação. Barbosa (2024), além de corroborar tais descobertas, identificou que, no período mencionado, a frequência e a duração média das secas repentinas foram de 21% e 30 dias, respectivamente, durante a estação chuvosa na região.

A onda de calor que atingiu o oeste da Rússia em 2010 resultou em grandes perdas ambientais, sociais e econômicas (Christian *et al.*, 2020). As condições persistentes de temperaturas de superfície anormalmente altas e déficits de pressão de vapor propiciaram a ocorrência de grandes incêndios florestais. Isso resultou em aproximadamente 11 mil mortes em excesso e no deslocamento de milhares de pessoas devido à severa poluição do ar e à queima de inúmeras propriedades (Bondur, 2011; Shaposhnikov *et al.*, 2014). Adicionalmente, o setor agrícola experimentou quedas substanciais nas colheitas de grãos em relação à safra anterior (Wegren, 2011). Essa situação levou o governo russo a proibir a exportação de trigo em agosto de 2010, culminando em um significativo aumento de seu preço no mercado global (Welton, 2011). Christian *et al.* (2020) descobriram que, além de outros fatores meteorológicos associados à referida onda de calor, uma seca repentina atuou como precursora. Essa seca se desenvolveu a partir da falta de chuvas, juntamente com o aumento da demanda evaporativa, resultando na rápida dessecação da superfície terrestre.

Em 2012, as Grandes Planícies centrais dos EUA experimentaram uma das secas repentinas mais impactantes registradas no país (Hoerling *et al.*, 2014). A falta de chuvas, combinada com temperaturas elevadas e sol abundante, foi responsável pelo rápido desenvolvimento da seca (Otkin *et al.*, 2018). Em um intervalo de 2 meses (entre maio e julho), essas regiões passaram de condições geralmente quase normais para condições de extrema seca. Os impactos no setor agrícola foram substanciais e sentidos rapidamente, com perdas estimadas em mais de US\$ 30 bilhões em todo o país (National Centers for Environmental Information – NCEI, 2017). O rendimento do milho foi 26% abaixo da expectativa, fazendo da safra de 2012 a que apresentou a maior redução absoluta de produção desde 1866 nos EUA (Hoerling *et al.*, 2014). Poucos anos depois, em 2016 e 2017, os EUA voltaram a experimentar eventos de seca repentina impactantes, que também provocaram grandes perdas na agricultura e foram precursores de grandes incêndios florestais (Gerken *et al.*, 2018; Otkin *et al.*, 2018).

Ainda, Jin *et al.* (2019) constataram que, devido à seca repentina de 2012, no Centro-Oeste dos EUA: as atividades fenológicas de todos os biomas avançaram 1 a 2 semanas antes, em comparação com os outros anos (2010-2014); os impactos foram mais severos sobre lavouras e pastagens do que sobre as florestas; o crescimento das lavouras e pastagens foi suprimido a partir de junho e não se recuperou até o final da estação de crescimento, apresentando uma redução significativa do índice de vegetação, fluorescência induzida pelo sol e produção primária bruta (PPB); os agroecossistemas (lavouras e pastagens), responsáveis por 84% da assimilação regional da PPB, foram os mais impactados pela seca, com redução total de 9%, 7%, 6% e 29% da variável para o milho, soja, terras agrícolas e pastagens, respectivamente.

Na China, Yuan *et al.* (2015) relataram duas secas repentinas que causaram impactos substanciais em diferentes regiões do país. A primeira ocorreu no verão de 2011, sobre o curso médio e inferior da bacia do Rio Yangtze, sendo a pior seca desde meados da década de 1960. Esse evento impactou 30 milhões de pessoas e causou uma perda econômica de aproximadamente US\$ 2,4 bilhões. A segunda seca ocorreu durante o verão de 2013, impactando 13 províncias no sul da China, além de danificar mais de 2 milhões de hectares de plantações, principalmente nas províncias de Guizhou e Hunan.

Durante novembro de 2015 a abril de 2016, grande parte da África do Sul experimentou uma seca sazonal. Yuan, Wang e Wood (2018) observaram que, ao longo desta seca, ocorreu uma seca repentina impulsionada por ondas de calor e déficits de precipitação, com início no começo de dezembro de 2015 e término no início de janeiro de 2016.

Como consequência, milhões de pessoas foram afetadas pela fome, doenças e escassez de água. Os autores descobriram ainda que, entre 1961 e 2016, as secas repentinas aumentaram 220% em frequência na África do Sul, e que o principal responsável por isso foram as mudanças climáticas antropogênicas.

1.5 Impactos dos veranicos na agricultura do Brasil

Quanto maior a duração de um veranico, maior o impacto, mas o momento é crucial. Os veranicos no início da estação chuvosa causam o fenômeno do ‘falso começo’, impossibilitando a germinação das sementes, o que é muito impactante, especialmente quando o estoque de sementes para replantio é limitado, como é o caso de muitos pequenos agricultores (Walker *et al.*, 2024). Embora já se tenha mencionado um exemplo catastrófico causado por veranicos sobre a agricultura brasileira na safra de 2004/2005, a seguir mencionam-se demais exemplos.

No município de Planaltina, Distrito Federal, Espinoza; Azevedo e Rocha (1980) observaram que, em condições de Cerrado, para densidades de plantio variando de 20.000 a 80.000 plantas ha^{-1} , veranicos com duração entre 14 e 16 dias, ocorrendo principalmente na fase de florescimento das variedades C-111X e C-501 de milho, foram responsáveis por reduções de rendimento de 1.061 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ até 1.466 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ e 331 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ até 2.617 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivamente. Por outro lado, para veranicos de até 41 dias, o efeito da densidade de plantio teve pouca significância em geral, com as variedades C-111X e Piranão apresentando perdas de 1.239 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ até 2.554 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ e 2.188 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ até 2.530 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivamente, explicadas também por outros fatores.

Na bacia do Rio Verde Grande, Minas Gerais, com base em simulações de duração de veranicos, Carvalho *et al.* (2000) descobriram que, durante a fase de floração do milho, perdas de rendimento de 10%, 20%, 30% e 50% estão associadas a veranicos com durações que variam entre 2 a 4 dias, 3 a 7 dias, 4 a 9 dias e 5 a 11 dias, respectivamente. No município de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul, Bergamaschi *et al.* (2006) observaram que a produção de milho apresenta maiores reduções (em uma relação quadrática) quando o déficit hídrico ocorre durante a polinização, formação do zigoto e desenvolvimento inicial do grão.

Roldão (2015) investigou a relação dos totais de veranicos com a produtividade da soja na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, Minas Gerais. Por meio de correlações negativas significativas entre quantidade de veranicos contra a produtividade da soja em 21 de 30 localidades avaliadas, concluiu-se que, quanto maior a quantidade de

veranicos, menor a produtividade da soja. Por outro lado, no estado do Tocantins, Roldão (2020) constatou que, a ocorrência de veranicos com duração de 11 a 15 dias em novembro e de 16 a 20 dias em janeiro, diminuíram a produtividade da soja entre 1988 e 2016.

No estado do Ceará, enquanto Rocha *et al.* (2020) descobriram que, em anos classificados como secos (1998 e 2012), a frequência de veranicos foi maior, levando a maiores perdas de safras para as culturas de milho e feijão, Nogueira *et al.* (2023) observaram que, o milho ainda alcançou boa produtividade sob veranicos com duração de até 15 dias. Porém, acima dessa duração, ocorreram quedas bruscas de rendimento.

Na Região Nordeste do Brasil, embora a produção do milho em sequeiro seja bastante representativa (Rocha *et al.*, 2020; Sun; Li; Ward, 2007), outros estudos investigaram os impactos dos veranicos sobre o rendimento de outras culturas, incluindo abacaxi, algodão, arroz, banana, cana-de-açúcar, fava, feijão, laranja, mandioca, sisal e soja (Anderson *et al.*, 2016; Freitas *et al.*, 2013; Menezes; Brito; Lima, 2010; Menezes *et al.*, 2015). Adicionalmente, outros autores se concentraram, também, na classificação, análise estatística, espacialização, probabilidade de ocorrência e controles atmosféricos dos veranicos em diferentes regiões brasileiras (Wolf, 1977; Assad *et al.*, 1993; Cruz *et al.*, 2004; Minuzzi *et al.* 2005; Carvalho *et al.*, 2013; Cunningham, 2020; Oliveira *et al.*, 2021).

1.6 Alertas para veranicos e resiliência da agricultura no Maranhão

Como mencionado anteriormente, estudos sobre o comportamento de secas repentinas podem trazer informações sobre o comportamento de veranicos e vice-versa. Christian *et al.* (2021) investigaram em nível global os pontos quentes de secas repentinas entre 1980 e 2015 por meio de dados de reanálise. Os autores descobriram que as regiões tropicais e subtropicais apresentam os principais focos de secas repentinas. Esses locais incluem grande parte do Brasil – inclusive o centro-sul do Maranhão –, do Sahel, do Grande Vale do Rift e da Índia, com ocorrência de secas repentinas entre 30% e 40% dos anos dentro do período analisado. Posteriormente, Christian *et al.* (2023) observaram que, nos cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, partes da Amazônia Oriental, incluindo grande parte da mesorregião Oeste do Maranhão, podem experimentar um aumento significativo na frequência de secas repentinas entre 2015 e 2100, além de reduções notáveis na precipitação média anual a partir de 2066 a 2100.

Além disso, modelos climáticos projetam que, num cenário de aquecimento global de 1,5°C a 2,0°C acima dos níveis pré-industriais, haverá aumentos na temperatura média

na maioria das regiões terrestres e oceânicas, assim como em extremos de calor na maioria das regiões habitadas, dentre outros eventos climáticos extremos (IPCC, 2018, 2023). O aumento da temperatura média intensificará o estresse hídrico, devido à maior transpiração das culturas e à redução da umidade do solo disponível para as plantas (Cairns *et al.*, 2013; Lobell *et al.*, 2013).

No estado do Maranhão, onde a agricultura de sequeiro é predominante, com grande proporção de estabelecimentos agropecuários de base familiar (IBGE, 2019), as atividades agrícolas são frequentemente realizadas sem o devido conhecimento das condições climáticas e dos solos (Maranhão, 2019). Em situações como esta, um mau planejamento ou a falta de conhecimento sobre o regime de chuvas na produção de sequeiro pode colocar as plantas em situação de indisponibilidade hídrica. Isso pode levar à redução de seu conteúdo relativo de água e potencial hídrico, com posterior fechamento dos estômatos, diminuição da turgidez celular, redução do crescimento e baixa produção (Cruz *et al.*, 2004).

Neste contexto, a adoção de sistemas de cultivo resilientes ao clima é essencial para enfrentar as crescentes ameaças climáticas projetadas e melhor gerenciar a variabilidade climática atual (Thierfelder *et al.*, 2017). Em diversas regiões do mundo, práticas como o plantio direto, a retenção de resíduos, a rotação de culturas e a integração lavoura-pecuária-floresta têm se mostrado eficazes na: conservação da umidade do solo; melhoria da fertilidade do solo; redução da erosão; aumento do carbono orgânico; mitigação das emissões de gases de efeito estufa; e diminuição dos custos de produção (Johansen *et al.*, 2012; Kassam; Friedrich; Derpsch, 2022; Oliveira *et al.*, 2024; Palm *et al.*, 2014; Raheem *et al.*, 2025; Thierfelder *et al.*, 2017).

1.7 Monitoramento da seca no Brasil

Atualmente, o monitoramento da seca no Brasil é feito pelo Monitor de Secas, sob a responsabilidade principal da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA; <https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa>). O Monitor utiliza principalmente o Índice de Precipitação Padronizado (McKee; Doensken; Kleist, 1993) e o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (Vicente-Serrano; Beguería; López-Moreno, 2010) para fazer o monitoramento da seca, calculados para intervalos de 3, 4, 6, 12, 18 e 24 meses (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE, 2016).

Os veranicos são mencionados na categoria “S0” de seca do Monitor, descrita como “Seca Fraca”, que corresponde à situação “entrando em seca”, relacionada a veranicos de curta duração, que podem impactar o plantio, o desenvolvimento das culturas e das pastagens. Por outro lado, a condição “saindo de seca”, está associada à ocorrência de alguns déficits hídricos mais prolongados, que correspondem a veranicos de maior duração, sem que as culturas ou pastagens tenham se recuperado completamente (CGEE, 2016).

Um ponto de partida cada vez mais comum para a gestão da seca em todo o mundo é o estabelecimento de um monitor de seca que revele o estado presente da seca em uma região (Walker; Van Loon, 2023). O Monitor de Secas do Brasil disponibiliza informações de seca em escala mensal, relativas ao mês anterior ao recorrente, e ainda assim, com um atraso necessário de alguns dias ou semanas para análise dos dados e confecção dos mapas. No entanto, veranicos ou secas repentinas podem se desenvolver e desencadear impactos em apenas algumas semanas, comprometendo os setores de recursos hídricos e ecológico, por exemplo (Christian *et al.*, 2024; Yuan *et al.*, 2023; Zhang; Yuan, 2020). Na agricultura, a escala de tempo para impactos pode ser um pouco mais fina, de apenas alguns dias, como no cultivo de milho, caso o veranico ocorra na sua fase de floração, a mais sensível ao estresse hídrico (Bergamaschi *et al.*, 2006; Carvalho *et al.*, 2000).

Como comparação, o Monitor de Secas dos EUA (Svoboda *et al.*, 2002; <https://droughtmonitor.unl.edu/>), no qual o do Brasil se inspirou, disponibiliza informações sobre as condições de seca em escala semanal, o que representa um alerta muito mais precoce e uma maior chance para evitar ou mitigar impactos em relação ao do Brasil. Nesse contexto, Yuan *et al.* (2023) ressalta a necessidade de se avançar no monitoramento e previsão da seca para escalas temporais e espaciais cada vez mais finas, e que isso depende do uso adequado de índices de seca, porque diferentes tipos de secas, como a meteorológica, agrícola e hidrológica, possuem implicações distintas na escala de tempo subsazonal. Portanto, é essencial que o Monitor de Secas do Brasil avance significativamente para fornecer um monitoramento mais eficaz e oportuno das condições de seca no país.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar a variabilidade espaço-temporal dos veranicos durante a estação chuvosa no estado do Maranhão.

2.2 Específicos

1. Categorizar os veranicos durante a estação chuvosa no estado do Maranhão;
2. Determinar suas frequências e mapear suas distribuições espaciais com base em 30 anos (1994–2023) de dados diários pluviométricos;
3. Caracterizar as classes de veranicos de maior frequência e duração, seguido das combinações entre variáveis geográficas relacionadas a seus padrões de frequência espaço-temporais e em quais condições climáticas esses eventos ocorrem;
4. Identificar regiões homogêneas de frequência de veranicos extremos no Maranhão; e
5. Mapear os quantis estimados em cada estação para diferentes períodos de retorno, a fim de identificar as regiões mais susceptíveis à sua ocorrência.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil **Theoretical and Applied Climatology**, [S. l.], v. 113, p. 407–427, 2013b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0796-6>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [S. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013a. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANANDHI, A.; HUTCHINSON, S.; HARRINGTON, J.; RAHMANI, V.; KORKHAM, M. B.; RICE, C. W. Changes in spatial and temporal trends in wet, dry, warm and cold spell length or duration indices in Kansas. **International Journal of Climatology**, [S. l.], v. 36, p. 4085–4101, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4619>
- ANDERSON, M. C.; ZOLIN, C. A.; SENTELHAS, P. C.; HAIN, C. R.; SEMMENS, K.; YILMAZ, M. T.; GAO, F.; OTKIN, J. A.; TETRAULT, R. The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 174, p. 82–99, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.034>
- ASSAD, E. D.; SANO, E. E.; MASUTOMO, R.; CASTRO, L. H. R. de; SILVA, F. A. M. da. Veranicos na região dos cerrados brasileiros frequência e probabilidade de ocorrência. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 28, n. 9, p. 993–1003, 1993. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/3962>. Acesso em: 08 abr. 2024.
- BAKO, M. M.; MASHI, S. A.; BELLO, A. A.; ADAMU, J. I. Spatiotemporal analysis of dry spells for support to agriculture adaptation efforts in the Sudano-Sahelian region of Nigeria. **SN Applied Sciences**, [S. l.], v. 2, 1342, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3161-x>
- BARBOSA, H. A. Flash drought and its characteristics in Northeastern South America during 2004–2022 using satellite-based products. **Atmosphere**, [S. l.], v. 14, 1629, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos14111629>
- 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**, [S. l.], v. 222, 105142, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105142>
- BARBOSA, H. A.; BURITI, C. O.; KUMAR, T. V. L. Deep learning for flash drought detection: a case study in Northeastern Brazil. **Atmosphere**, [S. l.], v. 15, 761, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos15070761>
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. 9ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 512p.
- BASARA, J. B.; CHRISTIAN, J. I.; WAKEFIELD, R. A.; OTKIN, J. A.; HUNT, E. H.; BROWN, D. P. The evolution, propagation, and spread of flash drought in the Central

- United States during 2012. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 14, n. 8, 084025, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2cc0>
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MÜLLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P. G. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 243–249, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000200008>
- BONDUR, V. G. Satellite monitoring of wildfires during the anomalous heat wave of 2010 in Russia. **Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics**, [S. l.], v. 47, p. 1039–1048, 2011. DOI: <https://doi-org/10.1134/S0001433811090040>
- CAIRNS, J. E.; HELLIN, J.; SONDER, K.; ARAUS, J. L.; MACROBERT, J. F.; THIERFELDER, C.; PRASANNA, B. M. Adapting maize production to climate change in sub-Saharan Africa. **Food Security**, [S. l.], v. 5, p. 345–360, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12571-013-0256-x>
- CALOIERO, T.; COSCARELLI, R.; FERRARI, E.; SIRANGELO, B. Analysis of dry spells in southern Italy (Calabria). **Water**, [S. l.], v. 7, p. 3009–3023, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/w7063009>
- CARVALHO, D. F.; DE FARIA, R. A.; DE SOUSA, S. A. V.; BORGES, H. Q. Espacialização do período de veranico para diferentes níveis de perda de produção na cultura do milho, na bacia do Rio Verde Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 4, n. 2, p. 172-176, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000200007>
- CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, S. R. M.; PINTO, H. DA S. Estimation of dry spells in three Brazilian regions — Analysis of extremes. **Atmospheric Research**, [S. l.], v. 132-133, p. 12-21, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.04.003>
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Secas no Brasil: política e gestão proativas**. Brasília, Banco Mundial, 2016. 292p.
- CHRISTIAN, J. I.; BASARA, J. B.; HUNT, E. D.; OTKIN, J. A.; FURTADO, J. C.; MISHRA, V.; XIAO, X.; RANDALL, R. M. Global distribution, trends, and drivers of flash drought occurrence. **Nature Communications**, [S. l.], v. 12, n. 6330, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26692-z>
- CHRISTIAN, J. I.; BASARA, J. B.; HUNT, E. D.; OTKIN, J. A.; XIAO, X. Flash drought development and cascading impacts associated with the 2010 Russian heat-wave. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 15, n. 9, 094078, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9faf>
- CHRISTIAN, J. I.; BASARA, J. B.; OTKIN, J. A.; HUNT, E. D.; WAKEFIELD, R. A.; FLANAGAN, P. X.; XIAO, X. A methodology for flash drought identification: application of flash drought frequency across the United States. **Journal of Hydrometeorology**, [S. l.], v. 20, n. 5, p. 833–846, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0198.1>

CHRISTIAN, J. I.; HOBBS, M.; HOELL, A.; OTKIN, J. A.; FORD, T. W.; CRAVENS, A. E.; POWLEN, K. A.; WANG, H.; MISHRA, V. Flash drought: A state of the science review. **WIREs Water**, [S. l.], v. 11, e1714, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/wat2.1714>

CHRISTIAN, J. I.; MARTIN, E. R.; BASARA, J. B.; FURTADO, J. C.; OTKIN, J. A.; LOWMAN, L. E. L.; HUNT, E. D.; MISHRA, V.; XIAO, X. Global projections of flash drought show increased risk in a warming climate. **Communications Earth & Environment**, [S. l.], v. 4, n. 165, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00826-1>

CORREIA, W.; CARVALHO, M. W. L.; MENDES, T. J. Atualização da classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 32, n. 19, p. 517–543, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16727>

CRUZ, E.; CARVALHO, D.; CEDDIA, M.; ANTUNES, M.; AQUINO, R. Ocorrência de veranicos no estado do Rio de Janeiro. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 68–79, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162004000100009>

CUNNINGHAM, C. Characterization of dry spells in Southeastern Brazil during the monsoon season. **International Journal of Climatology**, [S. l.], v. 40, p. 4609–4621, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.6478>

DALTIO, J.; MARTINHO, P. R. R.; MAGALHÃES, L. A. **Geoweb Matopiba**: manual do usuário. Embrapa Territorial, Comunicado Técnico 38, 2016. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19404.51840>

ESPINOZA, W.; AZEVEDO, J.; ROCHA, L. A. Densidade de plantio e irrigação suplementar na resposta de três variedades de milho ao déficit hídrico na região dos cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 1, n. 15, p. 85–95, 1980. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/issue/view/501>. Acesso em: 17 fev. 2025.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Embrapa Soja, Londrina-PR, Circular Técnica 48, 2007. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/470308>. Acesso em: 29 abr. 2025.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 15–28, 2005. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>

FREITAS, R. M. O.; DOMBROSKI, J. L. D.; FREITAS, F. C. L.; NOGUEIRA, N. W.; PROCÓPIO, I. J. S. Produção de feijão-caupi sob efeito de veranico nos sistemas de plantio direto e convencional. **Semina: Ciência Agrárias**, Londrina-PR, v. 34, n. 6, p. 3683–3690, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n6Supl1p3683>

FROIDUROT, S.; DIEDHIOU, A. Characteristics of wet and dry spells in the West African monsoon system. **Atmospheric Science Letters**, [S. l.], v. 18, p. 125–131, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/asl.734>

GERKEN, T.; BROMLEY, G. T.; RUDELL, B. L.; WILLIAMS, S.; STOY, P. C. Convective suppression before and during the United States Northern Great Plains flash

drought of 2017. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 22, p. 4155–4163, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-22-4155-2018>

HAMED, R.; VAN LOON, A. F.; AERTS, J.; COUMOU, D. Impacts of compound hot–dry extremes on US soybean yields. **Earth System Dynamics**, [S. l.], v. 12, n. 4, p. 1371–1391, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5194/esd-12-1371-2021>

HOELL, A.; PARKER, B.-A.; DOWNEY, M. *et al.* Lessons Learned from the 2017 Flash Drought across the U.S. Northern Great Plains and Canadian Prairies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [S. l.], v. 101, n. 12, p. E2171–E2185, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0272.1>

HOERLING, M.; EISCHEID, J.; KUMAR, A.; LEUNG, R.; MARIOTTI, A.; MO, K.; SCHUBERT, S.; SEAGER, R. Causes and predictability of the 2012 Great Plains drought. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [S. l.], v. 95, n. 2, p. 269–282, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00055.1>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo agro-pecuário 2017: Resultados definitivos**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=73096>. Acesso em: 14 jan. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapas**. 2022. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#home>. Acesso em: 08 abr. 2024.

INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS (IMESC). **Boletim climático do Maranhão**. out./ dez., v. 1, n. 3. – São Luís: IMESC, 2022. 62p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Global Warming of 1.5°C**. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [MASSON-DELMOTTE, V. *et al.*, (eds.)]. In Press. 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [TEAM, C. W.; LEE, H.; ROMERO, J. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. pp. 1-34. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>

JIN, C.; LUO, X.; XIAO, X.; DONG, J.; LI, X.; YANG, J.; ZHAO, D. The 2012 flash drought threatened US Midwest agroecosystems. **Chinese Geographical Science**, [S. l.], v. 29, p. 768–783, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11769-019-1066-7>

JOHANSEN, C.; HAQUE, M.; BELL, R.; THIERFELDER, C.; ESDAILE, R. Conservation agriculture for small holder rainfed farming: opportunities and constraints of new mechanized seeding systems. **Field Crops Research**, [S. l.], v. 132, p. 18–32, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.026>

- KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Successful Experiences and Lessons from Conservation Agriculture Worldwide. **Agronomy**, [S. l.], v. 12, n. 769, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12040769>
- KÖPPEN, W. P. **Grundriss der Klimakunde**: Outline of climate Science. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 388p.
- LISONBEE, J.; WOLOSZYN, M.; SKUMANICH, M. Making sense of flash drought: definitions, indicators, and where we go from here. **Journal of Applied and Service Climatology**, [S. l.], v. 2021, n. 001, 2022. DOI: <https://doi.org/10.46275/JOASC.2021.02.001>
- LOBELL, D.; HAMMER, G.; MCLEAN, G.; MESSINA, C.; ROBERTS, M. J.; SCHLENKER, W. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. **Nature Climate Change**, [S. l.], v. 3, p. 497-501, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate1832>
- MAGALHÃES, A. J. S.; ALVES, J. M. B.; SILVA, E. M.; NUNES, F. T.; BARBOSA, A. C. B.; SANTOS, A. C. S. dos; SOMBRA, S. S. Veranicos no Brasil: Observações e Modelagens (CMIP5). **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 34, n. 4, p. 597–626, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786344072>
- MARANHÃO. **Zoneamento Agropecuário do Estado do Maranhão (ZAMA)**. Coordenado por São Luís: Secretaria do Estado da Agricultura e Abastecimento (SAGRIMA), 2019.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F. F. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Recursos Hídricos em Regiões Áridas e Semiáridas / Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande – PB, 2011. p. 384–422.
- MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, [S. l.], v. 129, p. 1189–1200, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, K. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: **Eighth Conference on Applied Climatology**, Anaheim, California, 17-22 January, 179–184, 1993.
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 208p.
- MENEZES, H. E. A.; DE BRITO, J. I. B.; LIMA, R. A. F. DE A. Veranico e a produção agrícola no Estado da Paraíba, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v. 14, n. 2, p. 181–186, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000200009>
- MENEZES, H. E.; MEDEIROS, R. M.; SANTOS, J. L.; LIMA, T. S.; PIMENTA, T. A. Influência de veranico na produção agrícola no município de Santa Filomena, Piauí, Brasil. **Revista Verde Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 21–25, 2015. DOI: <https://doi.org/10.18378/rvads.v10i4.4608>

MENEZES, R. H. N. DE. **Caracterização agroclimática e análise do rendimento agrícola do Estado do Maranhão, Brasil**. 2009. 168p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, PB.

MINUZZI, R. B.; SEDIYAMA, G. C.; RIBEIRO, A.; DA COSTA, J. M. N. El Niño: ocorrência e duração de veranicos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 3, p. 364–371, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000300011>

MISHRA, V.; AADHAR, S.; MAHTO, S. S. Anthropogenic warming and intraseasonal summer monsoon variability amplify the risk of future flash droughts in India. **npj Climate and Atmospheric Science**, [S. l.], v. 4, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41612-020-00158-3>

NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION. **Billion-dollar weather and climate disasters**: Overview. NOAA NCEI, 2017. Disponível em: <https://ncdc.noaa.gov/billions>. Acesso em: 17 fev. 2025.

NOGUEIRA, D. B.; DA SILVA, A. O.; GIROLDO, A. B.; DA SILVA, A. P. N.; COSTA, B. R. S. Dry spells in a semi-arid region of Brazil and their influence on maize productivity. **Journal of Arid Environments**, [S. l.], v. 209, 104892, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104892>

NÚCLEO GEOAMBIENTAL – NUGEO. **Bacias hidrográficas e climatologia no Maranhão**. Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

OHBA, M.; ARAI, R.; SATO, T.; IMAMURA, M.; TOYODA, Y. Projected future changes in water availability and dry spells in Japan: Dynamic and thermodynamic climate impacts. **Weather and Climate Extremes**, [S. l.], v. 38, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100523>

OJARA, M. A.; LOU, Y.; ARIBO, L.; NAMUMBYA, S.; UDDIN, Md. J. Dry spells and probability of rainfall occurrence for Lake Kyoga Basin in Uganda, East Africa. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 100, p. 493–514, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03822-x>

OLIVEIRA, B. C. C.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; PEREIRA, C. R.; SOBRAL, B. S.; DE GOIS, G.; LYRA, G. B.; MACHADO, E. A.; CORREIA FILHO, W. L. F.; DE SOUZA, A. Spatiotemporal variation of dry spells in the State of Rio de Janeiro: Geospatialization and multivariate analysis. **Atmospheric Research**. [S. l.], v. 257, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105612>

OLIVEIRA, D. M. S.; SANTOS, R. S.; CHIZZOTTI, F. H. M.; BRETAS, I. L.; FRANCO, A. L. C.; LIMA, R. P.; FREITAS, D. A. F.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: A review. **Geoderma Regional**, [S. l.], v. 37, e00796, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00796>

OTKIN, J. A.; SVOBODA, M.; HUNT, E. D.; FORD, T. W.; ANDERSON, M. C.; HAIN, C.; BASARA, J. B. Flash droughts: A review and assessment of the challenges

imposed by rapid-onset droughts in the United States. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [S. l.], v. 99, n. 5, p. 911–919, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0149.1>

PALM, C.; BLANCO-CANQUI, H.; DECLERCK, F.; GATERE, L.; GRACE, P. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [S. l.], v. 187, p. 87–105, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>

PHILANDER, S. G. H. **El Niño, La Niña and Southern Oscillation**. Academic Press, 1990. 289p

RAHEEM, A.; BANKOLE, O. O.; DANSO, F.; MUSA, M. O.; ADEGBITE T. A.; SIMPSON, V. B. Physical Management Strategies for Enhancing Soil Resilience to Climate Change: Insights From Africa. **European Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 76, e70030, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.70030>

RAYMOND, F.; ULLMANN, A.; TRAMBLAY, Y.; DROBINSKI, P.; CAMBERLIN, P. Evolution of Mediterranean extreme dry spells during the wet season under climate change. **Regional Environmental Change**, [S. l.], v. 19, p. 2339–2351, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01526-3>

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>

ROCHA, T. B. C.; VASCONCELOS JUNIOR, F. DAS C.; SILVEIRA, C. DA S.; MARTINS, E. S. P. R.; SILVA, R. F. V. Veranicos no Ceará e aplicações para agricultura de sequeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 35, n. 3, 435–447, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786353005>

RODRIGUES, R.; HAARSMA, R.; CAMPOS, E.; AMBRIZZI, T. The impacts of inter-El Nino variability on the Tropical Atlantic and Northeast Brazil climate. **Journal of Climate**, [S. l.], v. 24, n. 13, p. 3402–3422, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3983.1>

ROLDÃO, A. de F. **Veranicos no Estado do Tocantins e a cultura da soja**. 2020. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.403>

ROLDÃO, A. F. **Influência do fenômeno veranico na produtividade da soja na mesorregião Triângulo Mineiro/Alto Parnaíba-MG**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia - MG, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2015.201>

SENEVIRATNE, S. I.; NICHOLLS, N.; EASTERLING, D.; GOODESS, C. M.; KANAE, S.; KOSSIN, J.; LUO, Y.; MARENGO, J.; MCINNES, K.; RAHIMI, M.; REICHSTEIN, M.; SORTEBERG, A.; VERA, C.; ZHANG, X. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation** [FIELD,

C. B. *et al.* (eds.)). A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012. pp. 109–230

SHAPOSHNIKOV, D.; REVICH, B.; BELLANDER, T.; BEDADA, G. B.; BOTTAI, M.; KHARKOVA, T.; KVASHA, E.; LEZINA, E.; LIND, T.; SEMUTNIKOVA, E.; PERSHAGEN, G. Mortality related to air pollution with the Moscow heat wave and wildfire of 2010. **Epidemiology**, [*S. l.*], v. 25, n. 3, p. 359–64, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000090>

SREEPARVATHY, V.; SRINIVAS, V. V. Meteorological flash droughts risk projections based on CMIP6 climate change scenarios. **npj Climate and Atmospheric Science**, [*S. l.*], v. 5, n. 77, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00302-1>

SUN, S.; LI, H.; WARD, M. N. Climate variability and corn yields in semiarid Ceará, Brazil. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, [*S. l.*], v. 46, n. 2, p. 226–240, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAM2458.1>

SVOBODA, M.; LECOMTE, D.; HAYES, M.; HEIM, R.; GLEASON, K.; ANGEL, J.; RIPPEY, B.; TINKER, R.; PALECKI, M.; STOOKSBURY, D.; MISKUS, D.; STEPHENS, S. The Drought Monitor. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [*S. l.*], v. 83, n. 8, p. 1181–1190, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1181>

THIERFELDER, C.; CHIVENGE, P.; MUPANGWA, W.; ROSENSTOCK, T.; LAMANNA, C.; EYRE, J. How climate-smart is conservation agriculture (CA)? – Its potential to deliver on adaptation, mitigation and productivity on smallholder farms in southern Africa. **Food Security**, [*S. l.*], v. 9, p. 537–560, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12571-017-0665-3>

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

VAN LOON, A. F. Hydrological drought explained. **WIREs Water**, [*S. l.*], v. 2, p. 359–392. DOI: <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>

VAN LOON, A. F.; TIJDEMAN, E.; WANDERS, N.; VAN LANEN, H. A. J.; TEULING, A. J.; UIJLENHOET, R. How climate seasonality modifies drought duration and deficit. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [*S. l.*], v. 119, p. 4640–4656, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JD020383>

VAN LOON, A. F.; VAN LANEN, H. A. J. A process-based typology of hydrological drought. **Hydrology and Earth System Sciences**, [*S. l.*], v. 16, p. 1915–1946, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-16-1915-2012>

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**, [*S. l.*], v. 23, p. 1696–1718, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

WALKER, D. W.; VAN LOON, A. F. Droughts are coming on faster. **Science**, [*S. l.*], v. 380, n. 6641, p. 130–132, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.adh3097>

- WALKER, D.W.; VERGOPOLAN, N.; CAVALCANTE, L.; SMITH, K. H.; AGOUNGBOME, S. M. D.; ALMAGRO, A.; APURV, T.; DAHAL, N. M.; HOFFMANN, D.; SINGH, V.; XIANG, Z. Flash drought typologies and societal impacts: a worldwide review of occurrence, nomenclature, and experiences of local populations. **Weather, Climate, and Society**, [S. l.], v. 16, p. 3–28, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-23-0015.1>
- WEGREN, S. K. Food Security and Russia's 2010 Drought. **Eurasian Geography and Economics**, [S. l.], v. 52, n. 1, p. 140–156, 2011. DOI: <https://doi.org/10.2747/1539-7216.52.1.140>.
- WELTON, G. **The impact of Russia's 2010 grain export ban**. Oxfam Research Reports, 2011. 32 p. Disponível em: <https://www.oxfam.org/en/research/impact-russias-2010-grain-export-ban>. Acesso em: 17 fev. 2025.
- WOLF, J. M. Probabilidades de ocorrência de períodos secos na estação chuvosa para Brasília, D.F. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 12, n. único, p. 141–150, 1977. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/issue/view/521>. Acesso em: 21 fev. 2025.
- YE, H.; FETZER, E. J. Asymmetrical shift toward longer dry spells associated with warming temperatures during Russian summers. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 46, p. 11.455–11.462, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GL084748>
- YUAN, X.; MA, Z.; PAN, M.; SHI, C. Microwave remote sensing of short-term droughts during crop growing seasons. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 42, n. 11, p. 4394–4401, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015GL064125>
- YUAN, X.; WANG, L. Y.; WOOD, E. F. Anthropogenic intensification of southern African flash droughts as exemplified by the 2015/16 season. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [S. l.], v. 99, n. 1, p. S86–S90, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0077.1>
- YUAN, X.; WANG, L.; WU, P.; JI, P.; SHEFFIELD, J.; ZHANG, M. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China. **Nature Communications**, [S. l.], v. 10, n. 4661, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12692-7>
- YUAN, X.; WANG, Y.; JI, P.; WU, P.; SHEFFIELD, J.; OTKIN, J. A. A global transition to flash droughts under climate change. **Science**, [S. l.], v. 380, p. 187–191, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abn6301>
- ZHANG, M.; YUAN, X. Rapid reduction in ecosystem productivity caused by flash droughts based on decade-long FLUXNET observations. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 24, p. 5579–5593, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-24-5579-2020>

CAPÍTULO II

DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DE VERANICOS DURANTE A ESTAÇÃO CHUVOSA NO ESTADO DO MARANHÃO, BRASIL

Artigo submetido no periódico **Atmospheric Research**, da base de dados **ScienceDirect, Elsevier**. Print ISSN: 0169-8095; Online ISSN: 1873-2895. Métricas: CiteScore = 9.4; Impact Factor = 4.5.

As normas do periódico podem ser obtidas no link: <https://www.sciencedirect.com/journal/atmospheric-research/publish/guide-for-authors>

Dinâmica espaço-temporal de veranicos durante a estação chuvosa no estado do Maranhão, Brasil

Resumo

Veranicos durante a estação chuvosa podem impactar negativamente os setores agrícola, hídrico e ecológico. Apesar desses riscos, tais eventos têm sido pouco estudados no Maranhão. Portanto, o objetivo deste estudo foi analisar a dinâmica de veranicos no Maranhão durante a estação chuvosa (dezembro a maio) utilizando dados diários de precipitação (1994–2023) de 123 estações meteorológicas. Veranicos foram definidos como ≥ 3 dias consecutivos com precipitação < 1 mm, categorizados em classes A (3–6 dias), B (7–10 dias), C (11–14 dias) e D (≥ 15 dias), e espacializados utilizando o método de Ponderação pelo Inverso da Distância. A análise de componentes principais (ACP) foi aplicada às classes A ($>$ frequência) e D ($>$ duração) para identificar padrões de variabilidade em suas frequências relacionados a variáveis geográficas e atmosféricas, e sob quais características climáticas ocorrem. A classe A representou 62.29% dos veranicos, seguida pelas classes B (21.09%), C (8.55%) e D (8.07%). Esses eventos foram mais frequentes no início e no final da estação chuvosa na região centro-sul do Maranhão. Na ACP, a maior parte da variação foi explicada pela combinação de latitudes e altitudes mais elevadas (centro-sul), maior (menor) cobertura de nuvens em dezembro (março a maio), com: maior frequência de veranicos da classe A de dezembro a abril; e menor (maior) frequência de veranicos da classe D em dezembro (abril e maio). Em ambos os casos, essas relações ocorreram em ambientes mais frios e secos. Esses resultados contribuem para estratégias locais de adaptação climática para os setores agrícola, hídrico e ecológico do Maranhão.

Palavras-chave: Precipitação diária; Veranicos; Variabilidade espaço-temporal; Maranhão; Análise multivariada.

1. Introdução

A crescente frequência de eventos climáticos extremos, como chuvas intensas, ondas de calor, incêndios florestais, inundações, secas severas e períodos de estiagem, tem causado impactos ambientais e socioeconômicos em todo o mundo (Wilhite et al., 2014; IPCC, 2023). As secas, um dos desastres naturais mais devastadores e bem documentados (IPCC, 2012; UNCCD, 2022; IPCC, 2023; Vicente-Serrano et al., 2024), têm afetado cada vez mais setores críticos como agricultura, saneamento e segurança hídrica em diversas sociedades e sistemas econômicos. Isso representa uma séria ameaça global à segurança alimentar, ao abastecimento de água, à distribuição de energia, à saúde pública e à integridade dos ecossistemas naturais (Luce et al., 2016; UNCCD, 2022; IPCC, 2023; Vicente-Serrano et al., 2024).

Tradicionalmente, as secas são consideradas fenômenos de progressão lenta e ampla abrangência espacial (Walker e Van Loon, 2023; Walker et al., 2024). No entanto, veranicos durante a estação chuvosa têm recebido crescente atenção nas últimas décadas. Embora de curta duração, causam danos substanciais, especialmente à agricultura (Walker e Van Loon, 2023; Walker et al., 2024). Portanto, compreender e identificar padrões climáticos é essencial para a adaptação à variabilidade climática e para a gestão sustentável dos recursos naturais, possibilitando estratégias de monitoramento de secas e sistemas de alerta precoce (Ferijal et al., 2021; Oliveira et al., 2021).

Durante a estação chuvosa, um veranico é caracterizado por uma sequência de dias com precipitação anormalmente baixa (Assad et al., 1993; Anandhi et al., 2016; Sirangelo et al., 2017; Cunningham, 2020; Oliveira et al., 2021). Esse período é geralmente acompanhado por altas temperaturas e alta demanda evaporativa, frequente em regiões tropicais onde as estações chuvosas e secas são bem definidas (Assad et al., 1993; Roldão, 2020; Walker et al., 2024). Nessas condições, a umidade do solo é perdida rapidamente e, quando coincide com estágios de crescimento sensíveis à seca (geralmente reprodutivos), contribui para impactos agrícolas e socioeconômicos comparáveis aos de secas prolongadas (Assad et al., 1993; Walker et al., 2024). Esses impactos são particularmente severos em sistemas de produção de alimentos de sequeiro, que são inteiramente dependentes da chuva (Assad et al., 1993; Monteiro, 2009; Rocha et al., 2021; Ndiaye et al., 2024).

A agricultura de sequeiro é predominante no estado do Maranhão (IBGE, 2019a), e a variabilidade das chuvas tem sido bem estudada (Menezes, 2009; Nascimento et al., 2017; Garcês Júnior, 2022; Aparecido et al., 2023; Soares et al., 2023; Furtado et al., 2025). No entanto, a dinâmica dos veranicos, componente intrínseco dessa variabilidade, permanece pouco compreendida. Isso representa uma lacuna significativa, dada a sua importância para o planejamento agrícola e a gestão de recursos hídricos, particularmente considerando a complexidade geográfica do Maranhão, que possui vasta extensão territorial em uma região tropical, onde há transição entre os biomas Amazônia, Cerrado e Caatinga, além de uma extensa faixa litorânea (IBGE, 2022). Ademais, grande parte de seu território integra a fronteira agrícola conhecida como MATOPIBA (Daltio et al., 2016). Nesse contexto, o Maranhão enfrenta o duplo desafio de conservar ecossistemas biodiversos e seus serviços essenciais, ao mesmo tempo que sustenta a produção de *commodities* dependentes da chuva, que é altamente sensível a secas e outros extremos climáticos.

Dada a necessidade urgente de desenvolver estratégias para melhor gerir a variabilidade climática atual e enfrentar as suas crescentes ameaças, compreender a dinâmica espaço-temporal dos veranicos é essencial. Isto inclui, entre outras abordagens: determinar a sua frequência em cada mês da estação chuvosa e mapear a sua distribuição espacial; identificar os seus padrões de variabilidade – através da análise de componentes principais (ACP) – relacionados com variáveis geográficas (latitude, longitude e altitude) e atmosféricas (cobertura de nuvens) durante a estação chuvosa; e identificar as condições climáticas (precipitação, temperatura e humidade relativa) em que estes fenómenos tendem a ocorrer. A maior cobertura de nuvens durante a estação chuvosa no Maranhão deve-se à atividade de massas de ar e sistemas atmosféricos sobre o estado, responsáveis pelos maiores volumes de precipitação durante a estação. As massas de ar que atuam sobre o Maranhão são a massa de ar equatorial continental (mEc) e a massa de ar equatorial atlântica (mEa) (Borsato e Massoquim, 2020; Novais et al., 2023). Por sua vez, os principais sistemas atmosféricos atuantes no estado são a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Ferreira e Mello, 2005; Novais e Machado, 2023), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Menezes, 2009), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) (Alves et al., 2006) e os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) (Lyra et al., 2020).

Neste contexto, este estudo visa: (i) categorizar os veranicos durante a estação chuvosa no Maranhão; (ii) determinar suas frequências e mapear suas distribuições espaciais com base em 30 anos (1994-2023) de dados diários de precipitação; (iii) identificar, para os veranicos mais frequentes e mais duradouros,

padrões de variabilidade relacionados às variáveis de latitude, longitude, altitude e cobertura de nuvens, e sob quais condições climáticas esses fenômenos ocorrem.

2. Material e métodos

2.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende o estado do Maranhão (**Fig. 1. 1**), parte da Região Nordeste do Brasil (NEB), localizado entre as latitudes 1°2'57" S e 10°15'42" S e as longitudes 41°47'45" W e 48°45'18" W (IBGE, 2022). Ao norte, é limitado pelo Oceano Atlântico; ao sul e sudoeste pelo estado do Tocantins (TO); a oeste pelo estado do Pará (PA); e a leste e sudeste pelo estado do Piauí (PI). Com uma área de 329,651.495 km² e uma população de 6,776,699 habitantes distribuídos em 217 municípios, o estado é subdividido nas mesorregiões: Centro, Leste, Norte, Oeste e Sul (IBGE, 2023).

A precipitação diminui de norte a sul, com valores acima de 2,200 mm no noroeste e abaixo de 1,100 mm nas mesorregiões leste e sul (Alvares et al., 2013a; Corrêa et al., 2023). A temperatura média anual varia de 23 °C a 29 °C, com as médias mais altas observadas na porção centro-norte e as mais baixas principalmente na região centro-sul do estado (Alvares et al., 2013b). De acordo com a classificação de Köppen, o Maranhão possui climas megatérmicos (temperatura média do mês mais frio > 18 °C), com clima Am (tropical de monções) em partes do extremo norte e noroeste, e climas Aw (chuvas de verão) e Aw' (chuvas de verão e outono) na maior parte das regiões centro-sul e centro-norte, respectivamente (Alvares et al., 2013a; Corrêa et al., 2023). Seu território é ocupado por aproximadamente 65.4% e 34.6% dos biomas Cerrado e Amazônia, respectivamente (IBGE, 2019b).

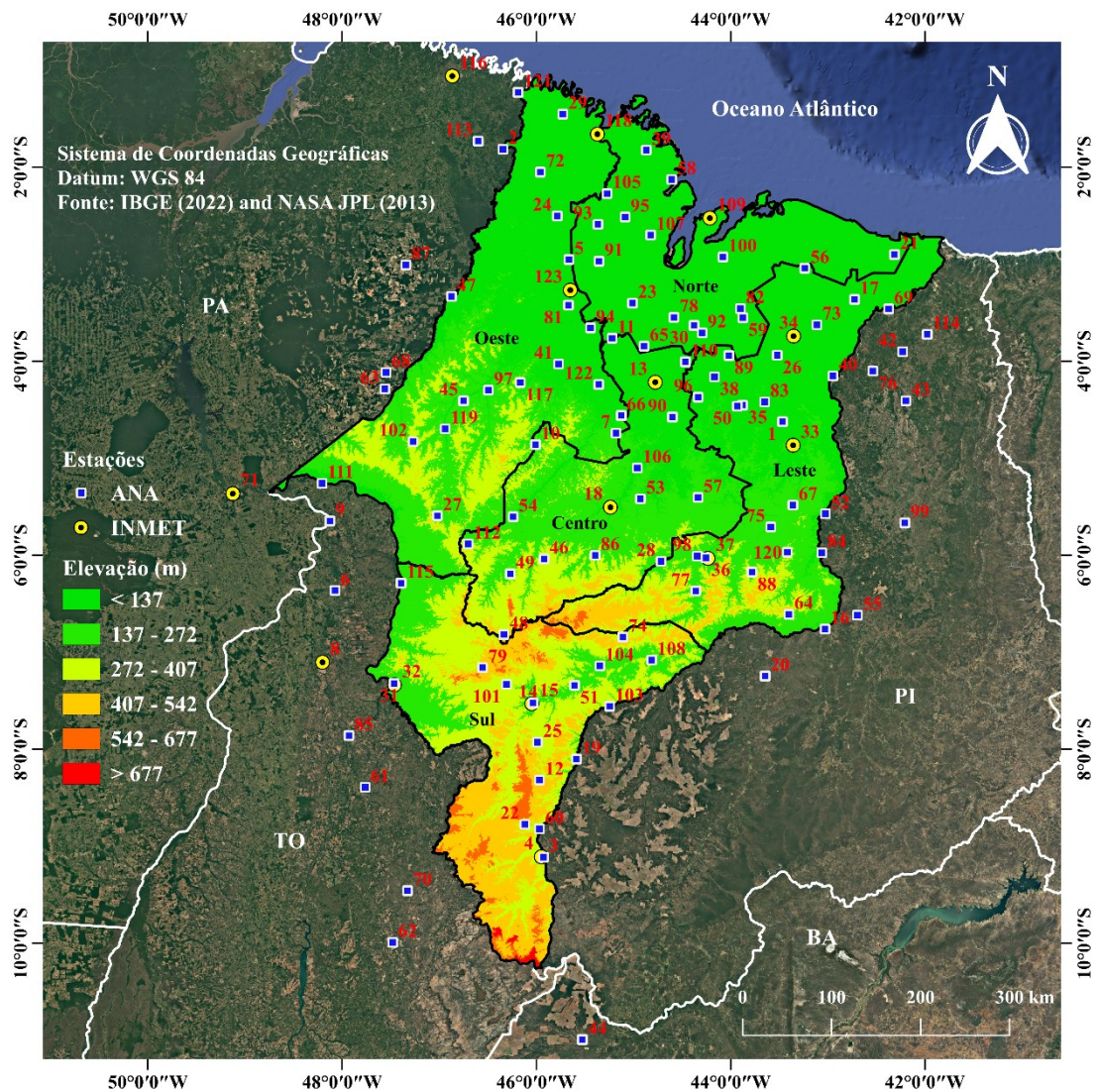


Fig. 1. 1 Mapa do Maranhão, destacando as mesorregiões Centro, Leste, Norte, Oeste e Sul, altitude (m) e localização das estações meteorológicas da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A economia do estado do Maranhão baseia-se na indústria (especialmente no processamento de alumínio), serviços, atividades extrativas, agricultura (com ênfase na produção de soja, milho, arroz e mandioca) e pecuária (IBGE, 2024). No entanto, apesar do crescimento econômico impulsionado pela expansão territorial e pelo aumento da produção, o estado enfrenta graves desafios socioeconômicos. A população do Maranhão apresenta a menor renda familiar mensal nominal per capita do país (R\$ 1,077), menor que a média nacional (R\$ 2,066), e o menor Índice de Desenvolvimento Humano do Brasil, de 0.676 (IBGE, 2025).

2.2. Processo de coleta de dados e preenchimento de falhas

Dados diários de precipitação pluvial de 123 estações com 30 anos de registros (1994–2023) foram obtidos dos bancos de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA; <http://hidro-web.ana.gov.br>) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET; <https://portal.inmet.gov.br>). Das 123 estações, 29 estão instaladas em estados que fazem fronteira com o Maranhão e uma está no estado da Bahia

(BA; **Fig. 1. 1** e **Tabela A1** – no APÊNDICE A). A inclusão dessas estações, localizadas próximas ao Maranhão, visa minimizar os efeitos de borda durante o processo de interpolação (Lyra et al., 2018; Oliveira et al., 2021; Baratto et al., 2022; Corrêa et al., 2024).

Todas as estações continham menos de 5% de dados faltantes (**Tabela A1**). Para preencher essas lacunas, o algoritmo Imputação Múltipla por Equações Encadeadas foi aplicado. Este método é baseado em modelos de imputação de regressão sequencial, nos quais cada variável é imputada usando as outras, gerando n imputações por meio de múltiplas interações (Rubin, 1996; van Buuren et al., 2006; van Buuren e Groothuis-Oudshoorn, 2011). Neste estudo, o método Predictive Mean Matching foi usado como modelo de estimativa de regressão (Little, 1988) para garantir valores imputados plausíveis, selecionando aleatoriamente apenas os valores observados mais próximos da predição correspondente (van Buuren, 2012; van Buuren e Groothuis-Oudshoorn, 2011). Este processo foi conduzido no software R (versão 4.4.1) usando o pacote mice (versão 3.16.0; R Core Team, 2024). A **Fig. B1** (APÊNDICE B) mostra gráficos de diagnóstico das imputações para as seis estações meteorológicas com as maiores proporções de dados ausentes.

A partir do projeto POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources) do Centro de Pesquisa Langley da NASA, foram obtidos dados de cobertura de nuvens (%) para cada mês da estação chuvosa no Maranhão (dezembro a maio) para todas as 123 estações meteorológicas, com o objetivo de analisar possíveis relações entre essa variável e a frequência de veranicos, utilizando a análise de componentes principais (ACP; ver Seção 2.4). Adicionalmente, para cada estação da ANA, que registra apenas dados diários de precipitação, foram obtidos dados do POWER sobre a temperatura média (°C) e a umidade relativa (%) para a estação chuvosa no Maranhão. Essas variáveis, além da precipitação média da estação chuvosa, foram incluídas como variáveis suplementares na ACP. Para as 14 estações do INMET (**Fig. 1. 1** e **Tabela A1**), as médias diárias dessas variáveis com os registros contínuos mais longos (sem dados faltantes) entre 1994 e 2023 foram comparadas com os dados do POWER utilizando diagramas de dispersão para os mesmos períodos. A correlação entre os conjuntos de dados foi avaliada utilizando o coeficiente ρ de Spearman, que apresentou valores entre 0.58 (estação Araguaína, temperatura média) e 0.90 (estação Colinas, umidade relativa média), significativos a um nível de probabilidade de 5%. Essas correlações justificaram o uso dos dados POWER para as estações da ANA e o preenchimento de lacunas nas séries temporais do INMET.

2.3. Categorização e contagem de veranicos

Para categorizar os veranicos no Maranhão durante a estação chuvosa, a estação foi definida como tendo início em dezembro e término em maio. Esses meses são responsáveis por aproximadamente 85% da precipitação média anual no estado (Corrêa et al., 2023). Entre 1994 e 2023, foram analisadas 29 estações chuvosas: a primeira entre dezembro de 1994 e maio de 1995, e a última entre dezembro de 2022 e maio de 2023. Neste estudo, um dia seco foi definido como aquele com precipitação <1 mm (conforme considerado por Anandhi et al., 2016; She et al., 2016; Bichet e Diedhiou, 2018; Bako et al., 2020; Oliveira et al., 2021), e um veranico como pelo menos três dias secos consecutivos, conforme considerado por Oliveira et al. (2021). Os veranicos foram categorizados em classes A (3 a 6 dias), B (7 a 10 dias), C (11 a 14 dias) e D (≥ 15 dias). Se um veranico começasse em um mês e se estendesse até o mês seguinte, era atribuído ao mês com o maior número de dias secos consecutivos.

Com base nesses critérios, um script R (ver APÊNDICE C) foi desenvolvido com o auxílio do Microsoft Copilot® para categorizar e quantificar os veranicos para cada classe e cada mês da estação chuvosa nas 123 estações meteorológicas. O script utilizou ferramentas de manipulação de dados dos pacotes *dplyr* (versão 1.1.4) e *lubridate* (versão 1.9.3). A eficácia do script foi validada pela comparação das categorizações e contagens automatizadas com as avaliações manuais de algumas estações selecionadas. Após a implementação, os resultados automatizados corresponderam de forma idêntica aos resultados manuais.

2.4. Mapeamento e análises estatísticas

Primeiramente, foi realizada uma análise exploratória da precipitação média mensal das estações chuvosa e seca. Para essa análise, foram consideradas apenas as 93 estações meteorológicas localizadas no Maranhão (**Fig. 1. 1** e **Tabela A1**). Todas as interpolações geoespaciais foram realizadas no software SAGA (versão 9.6.2; Conrad et al., 2015) utilizando o método Ponderação da Distância Inversa (IDW), conforme a Eq. 1:

$$\hat{v}(x) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_{(x,x_i)}^u} v_{x_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_{(x,x_i)}^u}} \quad (1)$$

em que, $\hat{v}(x)$ é o valor interpolado no ponto x , v_{x_i} é valor conhecido no ponto x_i , $d_{(x,x_i)}$ é a distância entre o ponto x e o ponto x_i , e u é o parâmetro de potência que controla a influência da distância.

No Maranhão, o IDW foi empregado pelo Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC) (2021a, 2021b, 2022) para interpolar dados de precipitação e temperatura máxima/mínima para boletins climáticos. Neste método, os pesos são inversamente proporcionais à distância elevada a qualquer potência. Assim, à medida que o valor de u aumenta, os pontos mais próximos (mais distantes) do valor interpolado $\hat{v}(x)$ tornam-se mais (menos) influentes (Isaaks e Srivastava, 1989). Neste estudo, $u = 3$ foi usado com um mínimo (máximo) de 4 (10) pontos x_i para determinar $\hat{v}(x)$, e uma distância máxima de busca de 10 graus decimais. Todos os layouts de impressão neste estudo foram criados usando o software QGIS (versão 3.28.9; QGIS Development Team, 2022).

No software R, a ACP foi aplicada para reduzir a dimensionalidade dos dados e representar, se houver, combinações de variáveis geográficas e atmosféricas (cobertura de nuvens) relacionadas à frequência de veranicos da classe mais frequente e da classe de maior duração (classe D) em cada mês da estação chuvosa. O conjunto de dados foi dividido em *variáveis principais* e *variáveis suplementares*. As *variáveis principais* foram latitude (°), longitude (°), altitude (m), os meses de dezembro a maio com seus respectivos totais de veranicos e os mesmos meses com suas respectivas médias de cobertura de nuvens (%). As *variáveis suplementares* foram a precipitação média (mm), a temperatura (°C) e a umidade relativa (%) durante a estação chuvosa. As *variáveis suplementares* foram incluídas para identificar as condições climáticas sob as quais as classes de veranicos em análise tendem a ocorrer com maior ou menor frequência, com base em suas relações com os componentes principais (CPs) retidos. A retenção dos CPs foi baseada na "regra de Kaiser", segundo a qual os CPs com autovalores > 1 são retidos (Kaiser, 1960; Jolliffe, 2002).

Primeiro, a adequação do conjunto de dados para a aplicação da ACP foi avaliada usando o índice Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) (Kaiser, 1970; Kaiser e Rice, 1974), calculando tanto o KMO geral para todo

o conjunto de *variáveis principais* quanto um KMO individual para cada *variável principal*, KMO(J), conforme as Eqs. 2 e 3, respectivamente:

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq k} \sum r_{ik}^2}{\sum_{i \neq k} \sum r_{ik}^2 + \sum_{i \neq k} \sum q_{ik}^2} \quad (2)$$

$$KMO(J) = \frac{\sum_{k \neq i} r_{ik}^2}{\sum_{k \neq i} r_{ik}^2 + \sum_{k \neq i} q_{ik}^2} \quad (3)$$

onde r_{ik} é uma correlação original e q_{ik} uma correlação anti-imagem. O KMO varia entre 0 e 1, sendo classificado como “maravilhoso” para $KMO \geq 0.90$, “meritório” para $0.80 \leq KMO < 0.90$, “mediano” para $0.70 \leq KMO < 0.80$, “mediocre” para $0.60 \leq KMO < 0.70$, “miserável” para $0.50 \leq KMO < 0.60$, e “inaceitável” para $KMO < 0.50$. A classificação “inaceitável” ocorre quando $\sum_{i \neq k} \sum q_{ik}^2 = \sum_{i \neq k} \sum r_{ik}^2$ (Kaiser e Rice, 1974), indicando a não adequação do conjunto de dados para ACP. O mesmo vale para uma variável com $KMO(J) < 0.50$, a qual pode ser removida do conjunto de dados.

3. Resultados

3.1. Distribuição das chuvas no Maranhão

Com base nos dados de precipitação de 93 estações meteorológicas no Maranhão (**Fig. 1. 1 e Tabela A1**), a distribuição mensal revelou que, durante o período chuvoso (**Fig. 1. 2a**), os meses de março a maio apresentaram maiores amplitudes interquartis – alturas das caixas –, enquanto entre dezembro, janeiro e fevereiro essas amplitudes foram menores. Março e dezembro apresentaram as maiores e menores médias de precipitação – pontos vermelhos –, com 308,06 mm ($\pm 78,62$ mm) e 116,64 mm ($\pm 39,19$ mm), respectivamente. Além disso, apesar de alguns valores discrepantes – pontos pretos – em dezembro e janeiro, a assimetria nas médias de precipitação durante os meses não foi tão acentuada. Durante o período seco (**Fig. 1. 2b**), observaram-se maiores amplitudes interquartis em junho e novembro, enquanto em agosto e setembro essas amplitudes foram menores. Os maiores e menores índices médios de precipitação foram observados em novembro e agosto, com 77,50 mm (± 46 mm) e 10,55 mm ($\pm 12,41$ mm), respectivamente. Valores discrepantes foram observados principalmente nos meses de junho a agosto. Esses meses, juntamente com novembro e outubro, apresentaram medianas – linhas pretas – deslocadas mais para a parte inferior dos gráficos, indicando assimetrias positivas mais acentuadas nas médias de precipitação.

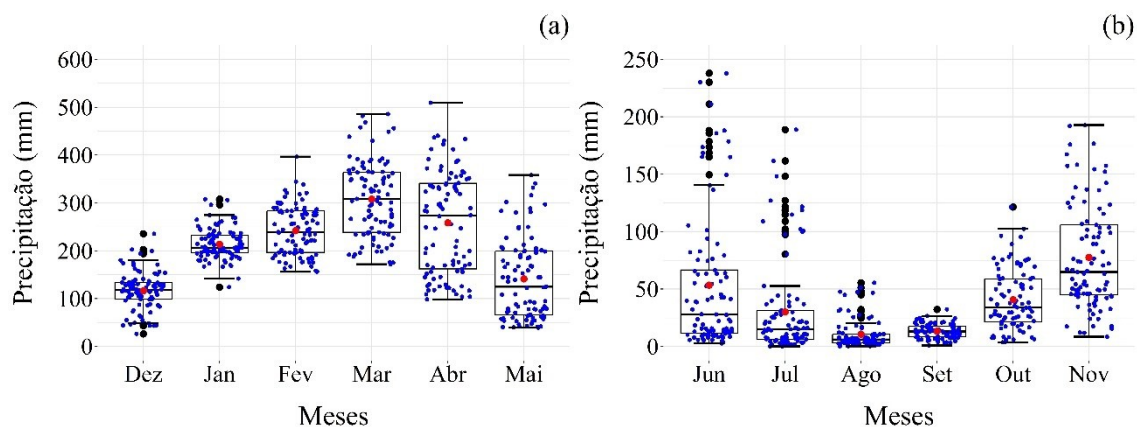


Fig. 1. 2 Diagramas de caixa da precipitação mensal durante as estações chuvosa (a) e seca (b) no estado do Maranhão entre 1994 e 2023, com base em dados de 93 estações meteorológicas no estado. Os pontos azuis representam a média de precipitação individual para cada uma das 93 estações; os pontos vermelhos representam a média da precipitação calculada a partir das médias das 93 estações; a base e o topo das caixas representam, respectivamente, o 1º e o 3º quartis das médias de precipitação; as linhas pretas nas caixas representam a mediana das médias de precipitação; as linhas verticais (bigodes) da base e do topo das caixas representam os limites das médias de precipitação que não são outliers; e os pontos pretos representam os outliers das médias de precipitação.

A **Fig. 1. 3** mostra a distribuição espacial da precipitação média durante as estações chuvosa e seca no Maranhão. Durante a estação chuvosa (**Fig. 1. 3a**), houve um gradiente decrescente de precipitação de norte a sul, onde as regiões no extremo norte-noroeste, situadas dentro do bioma Amazônia e próximas ao Oceano Atlântico (uma fonte de umidade), registraram as maiores médias de precipitação ($> 1,780$ mm). Em contraste, as mesorregiões Centro, Leste e Sul exibiram as menores médias (637–827 mm) devido à influência do bioma Cerrado e maior continentalidade. Durante a estação seca (**Fig. 1. 3b**), a maior parte do estado apresentou médias abaixo de 256 mm, enquanto as regiões no norte-noroeste e sul-sudoeste apresentaram médias entre 256–446 mm e 446–637 mm (extremo norte-noroeste).

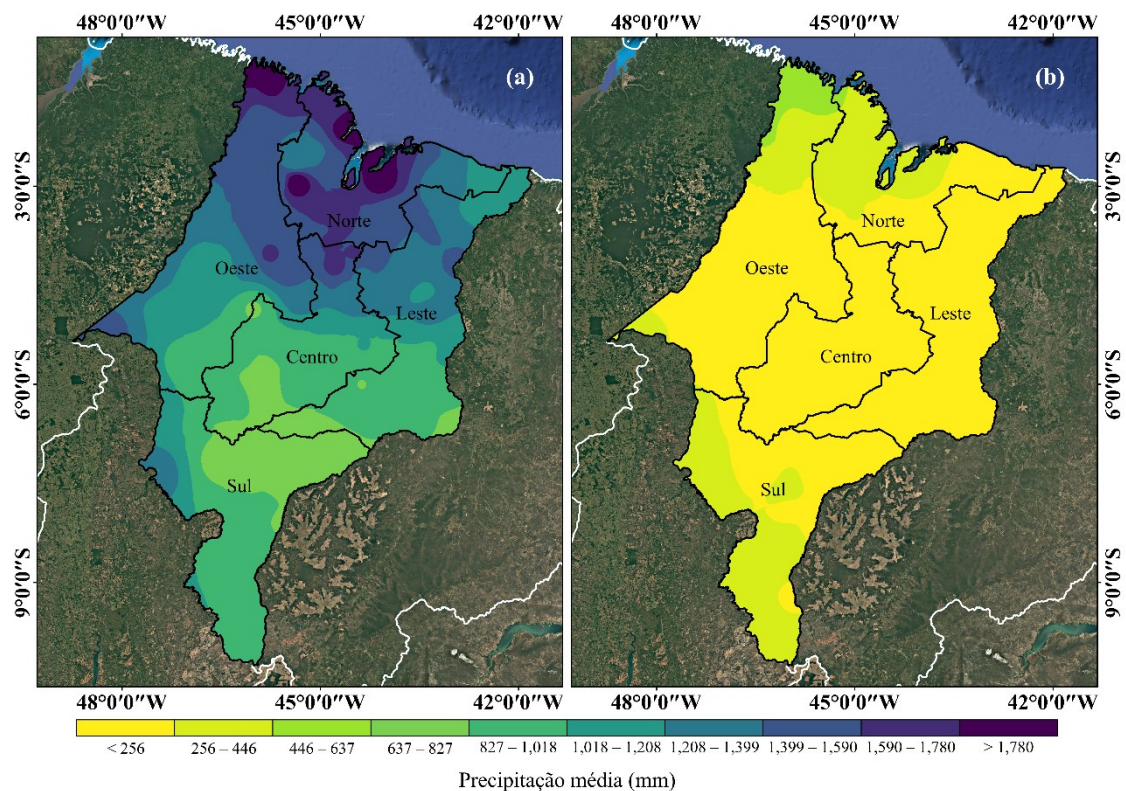


Fig. 1. 3 Distribuição espacial da precipitação média durante a estação chuvosa (dezembro–maio; a) e estação seca (junho–novembro; b) no Maranhão, 1994–2023.

A **Fig. D1** (APÊNDICE D) mostra a distribuição espacial da precipitação média mensal ao longo da estação chuvosa. Em dezembro (**Fig. D1a**), grande parte do Maranhão experimenta uma precipitação média entre 75 mm e 171 mm, com os valores mais baixos (<75 mm) concentrados no extremo norte do estado, enquanto os mais altos (171–268 mm) ocorrem nas regiões sul e sudoeste. Em março e abril (**Fig. D1d e D1e**), os maiores volumes de precipitação foram observados, particularmente na região centro-norte, onde os valores variaram entre 316 e 365 mm e ultrapassaram 461 mm no extremo norte. Em maio (**Fig. D1f**), há um forte contraste entre as regiões centro-norte e centro-sul; na primeira, as acumulações mensais variam de 171 mm a 365 mm, enquanto na segunda, as médias predominantemente caem abaixo de 75 mm, com algumas áreas registrando 75–121 mm, principalmente nas partes sul e sudoeste do estado.

A **Fig. D2** mostra a distribuição espacial da cobertura média de nuvens durante os meses da estação chuvosa no Maranhão. Em dezembro (**Fig. D2a**), observa-se uma média mais alta (78,40–82,70%) de cobertura de nuvens no sudoeste do Maranhão, enquanto áreas no extremo norte do estado apresentam médias mais baixas (48,30–56,90%). Entre janeiro (**Fig. D2b**), fevereiro (**Fig. D2c**) e março (**Fig. D2d**), o Maranhão como um todo apresentou cobertura média de nuvens significativa, com as médias mais altas (>82,70%) distribuídas desde regiões do sudoeste até o extremo norte-noroeste do estado, especialmente em fevereiro e março. Durante abril (**Fig. D2e**) e maio (**Fig. D2f**), as médias mais altas se concentram no centro-norte do Maranhão, enquanto na região centro-sul, especialmente no sudeste do estado, durante maio, as médias são mais baixas (48,30–52,60% e <48,30%). Principalmente em dezembro, abril e maio, a distribuição espacial da precipitação (**Fig. D1a, e–f**) assemelha-se bastante à distribuição da cobertura média de nuvens nesses meses.

3.2. Análise exploratória e distribuição espacial de veranicos

No total, foram registrados 16,147 veranicos únicos nas 93 estações meteorológicas do Maranhão, entre as 29 estações chuvosas (1994/1995–2022/2023) avaliadas neste estudo. Esses eventos incluem tanto os registrados em uma única estação meteorológica em um determinado período quanto os registrados no mesmo período por mais de uma estação, ou seja, eventos com maior cobertura espacial. Predominaram veranicos mais curtos, com 10,058 registros (62.29%) da classe A e 3,406 (21.09%) da classe B (**Fig. 1. 4a**). Veranicos das classes C e D (de maior duração) foram menos frequentes, com 1,380 eventos (8.55%) registrados na classe C e 1,303 (8.07%) na classe D. Veranicos das classes B, C e D seguiram um padrão sazonal semelhante, com maior ocorrência nos meses mais secos (por exemplo, dezembro e maio) e menor ocorrência nos meses mais chuvosos (por exemplo, março). Em contraste, a classe A apresentou um comportamento distinto, com pico em janeiro (**Fig. 1. 4b**).

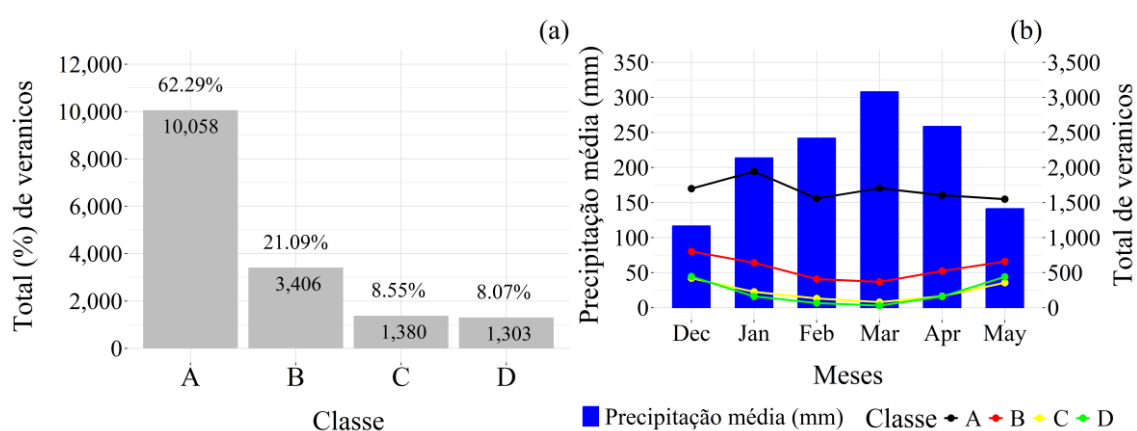


Fig. 1. 4 Total e percentagem (%) de veranicos das classes A (3–6 dias), B (7–10 dias), C (11–14 dias) e D (≥ 15 dias) (a), e total de veranicos de cada classe em cada mês da estação chuvosa (b) no Maranhão entre 1994–2023.

A **Fig. 1. 5** apresenta diagramas de caixa dos totais – pontos azuis – de veranicos para cada classe em cada mês da estação chuvosa no Maranhão. Os totais de veranicos para a classe A (**Fig. 1. 5a**) mostraram considerável variabilidade ao longo de todos os meses da estação chuvosa, com a maior (menor) amplitude interquartil em fevereiro (maio). As medianas deslocaram-se mais para a parte superior das caixas, especialmente em dezembro, janeiro e março, indicando que os totais de veranicos para a classe A nesses meses apresentaram assimetria negativa, ou seja, os totais nesses meses tenderam a valores mais altos. As maiores (menores) medianas foram observadas em janeiro, dezembro e março (maio, fevereiro e abril). Na classe B (**Fig. 1. 5b**), a maior (menor) amplitude interquartil foi observada em janeiro, fevereiro e abril (dezembro, março e maio). As medianas deslocaram-se mais para a parte inferior da tabela (assimetria positiva) em fevereiro, março e abril, indicando que, nesses meses, os totais para veranicos de classe B tendem a apresentar valores mais baixos. As médias mais altas (mais baixas) foram observadas em dezembro e maio (fevereiro e março). Também merecem destaque alguns valores discrepantes observados em maio.

Na classe C (**Fig. 1. 5c**), a menor amplitude interquartil foi observada em março, enquanto os demais meses apresentaram amplitudes maiores. A assimetria positiva foi observada principalmente de dezembro a abril, indicando que os totais para os períodos de seca da classe C tendem a valores menores. Assim como na classe B, médias maiores (menores) foram observadas em dezembro e maio (fevereiro e março), além

de valores discrepantes em dezembro e março. Por fim, os períodos de seca da classe D (**Fig. 1. 5d**), assim como os da classe C, apresentaram menor amplitude interquartil em março e maior amplitude nos demais meses. Os meses de janeiro a março apresentaram totais de períodos de seca com assimetria positiva mais acentuada, indicando que os totais de períodos de seca da classe D no Maranhão tendem a ser menores durante esses meses. Novamente, as médias maiores (menores) foram observadas em dezembro e maio (fevereiro e março), enquanto valores discrepantes foram observados em janeiro, fevereiro, março e maio.

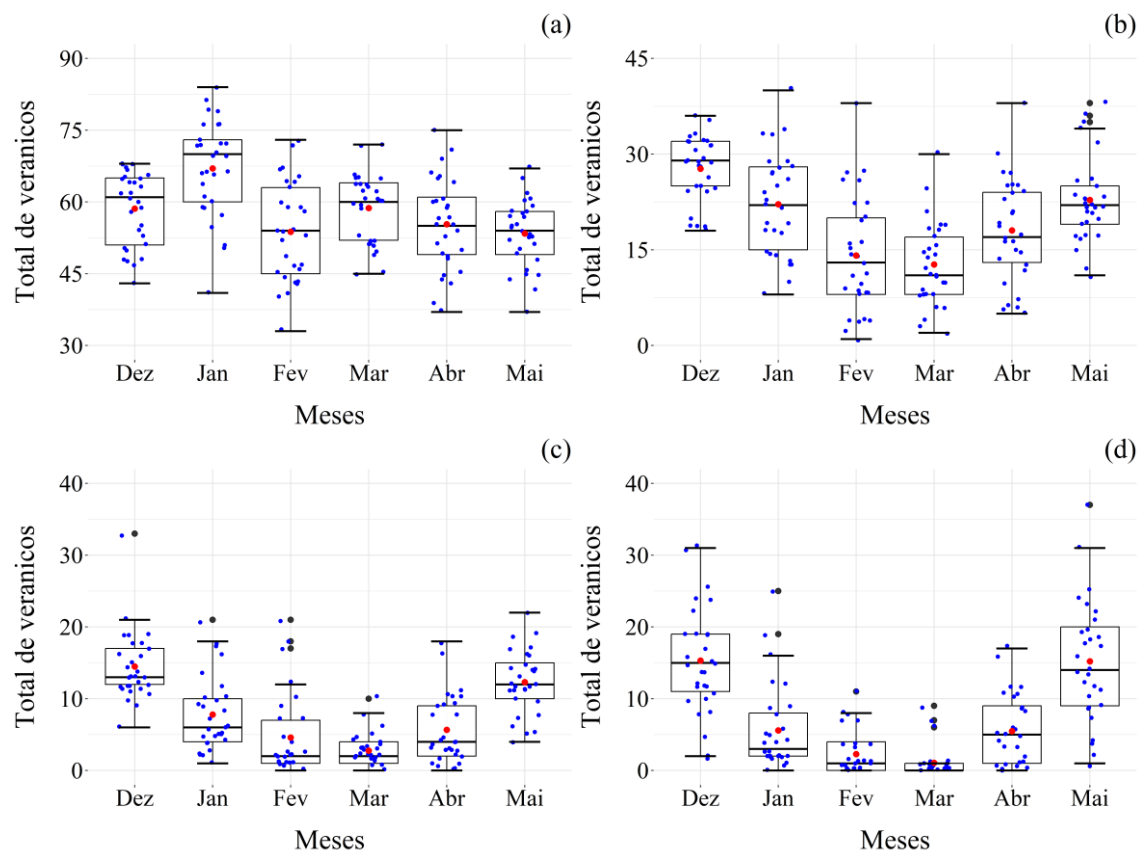


Fig. 1. 5 Diagramas de caixa da variabilidade mensal do total de veranicos para as classes A (a), B (b), C (c) e D (d) durante as 29 estações chuvosas avaliadas (dezembro de 1994/maio de 1995 a dezembro de 2022/maio de 2023) no estado do Maranhão. Os pontos azuis representam o total de veranicos registrados em cada uma das 29 estações chuvosas; os pontos vermelhos representam a média do total de veranicos ao longo das 29 estações chuvosas; e os pontos pretos representam totais de veranicos discrepantes em uma das estações chuvosas.

A **Fig. 1. 6** ilustra a distribuição espacial da frequência de veranicos durante a estação chuvosa. Secas de classe A (**Fig. 1. 6a**) ocorreram com maior frequência em algumas porções do centro-norte até regiões extensas do centro-sul do Maranhão, com um total variando de 281 a 319 e excedendo 319 eventos. Em contraste, regiões no norte-noroeste do estado apresentaram frequências mais baixas, com totais entre 207 e 244 e <169 veranicos. Além disso, todas as mesorregiões do Maranhão registraram ocorrências de veranicos variando de 244 a 281 eventos. A **Fig. E1** (APÊNDICE E) mostra a distribuição espacial da frequência de veranicos de classe A de dezembro a maio. De dezembro a abril (**Fig. E1a–E1e**), esses eventos se concentraram principalmente no centro-sul do Maranhão, com totais entre 52 e 64 e excedendo 64 veranicos nos meses de dezembro, janeiro e março. Em contrapartida, no mês de maio (**Fig. E1f**), esses eventos foram

mais frequentes na parte central da mesorregião oeste, até extensas áreas do norte-nordeste do Maranhão, também com totais entre 52 e 64, e ultrapassando 64 veranicos.

A distribuição espacial da frequência de veranicos da classe B (**Fig. 1. 6b**) apresentou algumas semelhanças com a da classe A. Na maior parte da região centro-sul do Maranhão, a maior frequência variou entre 74 e 86, e acima de 86 veranicos. Em contraste, as regiões do norte-noroeste do estado apresentaram menor frequência de veranicos, entre 38 e 50 secas, e abaixo de 38 eventos. As faixas de 50–62 e 62–74 veranicos foram distribuídas por vastas regiões do Maranhão, desde áreas intermediárias na região centro-norte até a mesorregião sul. A **Fig. E2** mostra que veranicos dessa classe foram mais frequentes nos meses de dezembro e maio (**Fig. E2a** e **Fig. E2f**), abrangendo algumas porções da região centro-norte, até grandes áreas da região centro-sul do Maranhão, que apresentaram entre 18 e 24, e até mais de 24 veranicos. A faixa intermediária de 12 a 18 veranicos foi registrada em grandes áreas do estado, especialmente em dezembro, janeiro (**Fig. E2b**), abril (**Fig. E2e**) e maio. Veranicos dessa classe foram menos frequentes, principalmente em março (**Fig. E2d**), quando a maior parte da região centro-norte, e até mesmo grandes porções da região centro-sul, apresentaram menos de 6 eventos. Em fevereiro (**Fig. E2c**), abril e maio, eventos dessa classe foram menos frequentes, especialmente no centro-norte do Maranhão (< 6 eventos).

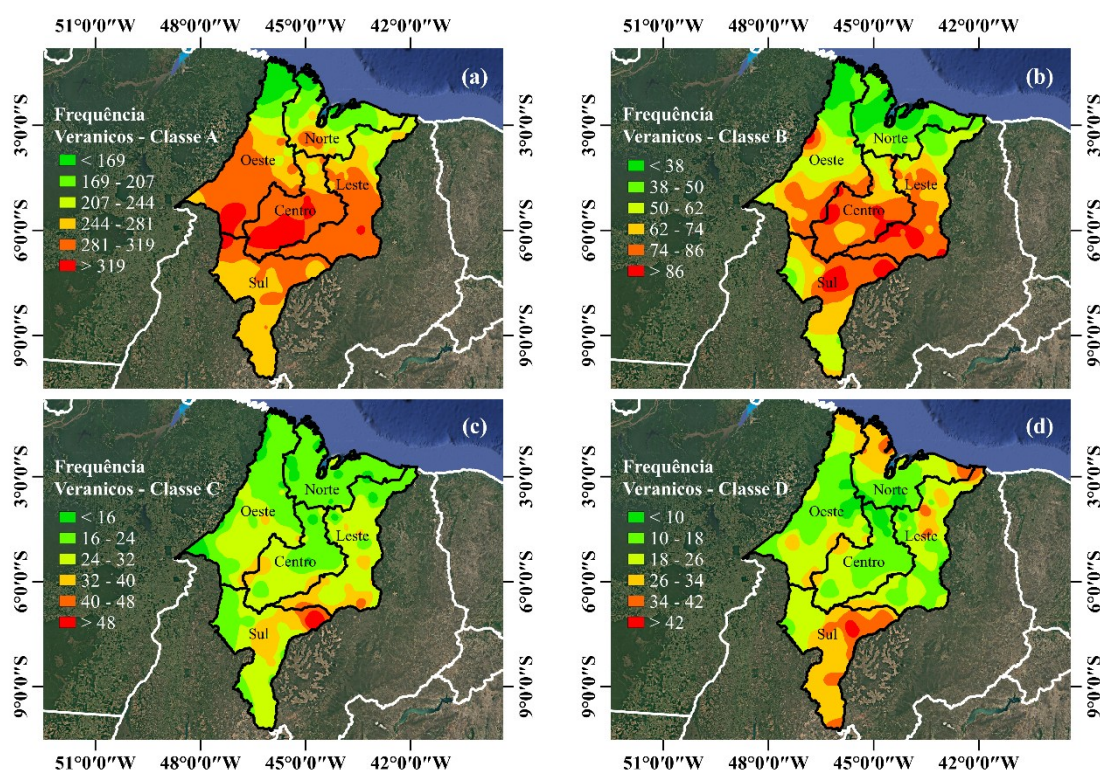


Fig. 1. 6 Distribuição espacial da frequência de veranicos (totais entre 1994 e 2023) das classes A (a), B (b), C (c) e D (d) durante a estação chuvosa (dezembro a maio) no Maranhão.

Os veranicos de classe C (**Fig. 1. 6c**) foram mais frequentes em partes das mesorregiões Sul e Leste do Maranhão, com totais entre 32 e 40 e ultrapassando 48 eventos. Em contraste, na maior parte do Maranhão, a ocorrência de 16 a 24 e 24 a 32 veranicos foi predominante, enquanto algumas porções do norte do estado experimentaram menos de 16 eventos. A **Fig. E3** mostra que os veranicos dessa classe foram mais frequentes em dezembro (**Fig. E3a**) e maio (**Fig. E3f**). Em dezembro (maio), esses eventos se concentraram na

região centro-norte (centro-sul) do Maranhão, variando de 12 a 16 e ultrapassando 16 veranicos registrados. Em contrapartida, entre janeiro e abril (**Fig. E3b–E3e**) os eventos dessa classe foram menos frequentes, quando o estado como um todo apresentou de 4 a 8 e menos de 4 veranicos, com exceção do mês de abril, que em algumas partes do centro-sul registrou de 8 a 12 eventos.

A distribuição espacial dos veranicos de classe D (**Fig. 1. 6d**) apresenta um padrão aproximadamente semelhante ao da classe C, com maior frequência na mesorregião sul, onde foram registrados mais de 42 eventos. Nas regiões nortes do estado, embora algumas áreas tenham apresentado frequências mais baixas (< 10 veranicos), extensas áreas costeiras experimentaram 26–34 e 34–42 veranicos. A ocorrência de 10–18 e 18–26 eventos foi predominante na maior parte do Maranhão. A **Fig. E4** mostra que, semelhante aos veranicos de classe C, os eventos de classe D são mais frequentes em dezembro (entre 24 e 27 e excedendo 27 eventos, **Fig. E4a**) e maio (entre 18 a 21 e 21 a 24 veranicos, **Fig. E4f**). Em dezembro (maio), esses eventos se concentraram principalmente no extremo norte (sul) do Maranhão. Nos demais meses da estação chuvosa (janeiro–abril, **Fig. E4b–Fig. E4e**) a frequência desses eventos foi menor, com grande parte do Maranhão apresentando menos de 3 veranicos, com exceção do mês de abril na mesorregião sul, onde na maioria dos casos foram registrados entre 6 e 9 e 12 eventos.

3.3. ACP aplicada às classes de veranicos mais frequentes e de maior duração

Neste estudo, os valores gerais de KMO para os conjuntos de dados de veranicos das classes A (mais frequente) e D (maior duração) na ACP foram, respectivamente, 0.81 e 0.79, correspondendo às classificações "meritório" e "mediano" (Kaiser e Rice, 1974). Para a classe A, os valores de KMO para cada *variável principal* (**Tabela 1. 1**) variaram de 0.64 (cobertura média de nuvens em janeiro - CMN-janeiro) a 0.95 (dezembro). Para a classe D, fevereiro apresentou o menor valor (KMO = 0.60), enquanto a altitude apresentou o maior (KMO = 0.93). Esses resultados indicaram a adequação dos conjuntos de dados para aplicações de ACP. Os três primeiros componentes principais explicaram 83.23% da variância total para veranicos na classe A e 84.22% para a classe D, o que é suficiente para uma representação adequada dos dados. Para a classe A (D), o CP1 explicou 44.27% (43.18%) da variação, enquanto o CP2 e o CP3 explicaram 27.47% (27.61%) e 11.48% (13.42%), respectivamente.

Tabela 1. 1 Resumo da ACP aplicada aos veranicos das classes A e D: valores de KMO, cargas fatoriais e contribuições (ctr) das variáveis principais nos três componentes (CP1, CP2, CP3), com respectivos autovalores, variância explicada e acumulada, bem como cargas fatoriais das variáveis suplementares nos três componentes.

Veranicos classe A							
Variáveis principais	KMO	CP1	ctr (%)	CP2	ctr (%)	CP3	ctr (%)
Latitude (°)	0.92	0.93	13.04	0.03	0.02	-0.26	4.00
Longitude (°)	0.76	0.11	0.19	0.82	16.27	-0.46	12.06
Altitude (m)	0.92	0.78	9.22	0.16	0.64	-0.36	7.60
Dezembro	0.95	0.64	6.17	0.40	3.80	0.10	0.59
Janeiro	0.92	0.62	5.81	0.15	0.57	0.55	17.88
Fevereiro	0.86	0.75	8.53	0.03	0.02	0.38	8.50
Março	0.83	0.82	10.11	0.03	0.02	0.25	3.59
Abril	0.89	0.64	6.21	0.23	1.33	0.55	17.34
Maio	0.79	-0.48	3.43	0.15	0.55	0.63	23.10
CMN-Dezembro (%)	0.74	0.57	4.89	0.78	14.66	-0.16	1.49
CMN-Janeiro (%)	0.64	0.09	0.11	0.97	22.75	0.12	0.80
CMN-Fevereiro (%)	0.72	-0.28	1.19	0.94	21.32	-0.03	0.05

CMN-Março (%)	0.79	-0.61	5.67	0.76	13.91	0.02	0.03
CMN-Abril (%)	0.73	-0.90	12.12	0.35	3.00	0.19	2.16
CMN-Maio (%)	0.78	-0.94	13.32	0.22	1.12	0.12	0.80
Autovalor	-	6.64	-	4.12	-	1.72	-
Variância explicada (%)	-	44.27	-	27.47	-	11.48	-
Variância acumulada (%)	-	44.27	-	71.75	-	83.23	-
Variáveis suplementares	-	CP1	-	CP2	-	CP3	-
Precipitação média (mm)	-	-0.84	-	0.07	-	-0.08	-
Temperatura média (°C)	-	-0.52	-	-0.37	-	0.28	-
Umidade relativa média (%)	-	-0.71	-	0.39	-	0.19	-
Veranicos classe D							
Variáveis principais	KMO	CP1	ctr (%)	CP2	ctr (%)	CP3	ctr (%)
Latitude (°)	0.90	0.97	14.45	0.12	0.37	0.00	0.00
Longitude (°)	0.74	0.14	0.28	0.84	17.13	0.28	3.97
Altitude (m)	0.93	0.82	10.32	0.22	1.14	0.22	2.43
Dezembro	0.87	-0.72	8.00	-0.39	3.61	0.39	7.56
Janeiro	0.73	-0.33	1.70	-0.43	4.53	0.65	20.83
Fevereiro	0.60	0.02	0.01	-0.26	1.60	0.77	29.65
Março	0.72	0.21	0.70	-0.21	1.02	0.69	23.43
Abril	0.89	0.82	10.32	-0.04	0.03	0.30	4.45
Maio	0.90	0.92	12.98	0.00	0.00	0.21	2.29
CMN-Dezembro (%)	0.71	0.52	4.19	0.82	16.18	0.10	0.52
CMN-Janeiro (%)	0.61	-0.03	0.02	0.95	21.65	0.08	0.30
CMN-Fevereiro (%)	0.77	-0.36	1.97	0.90	19.34	0.19	1.88
CMN-Março (%)	0.77	-0.68	7.09	0.69	11.39	0.19	1.79
CMN-Abril (%)	0.73	-0.95	13.87	0.26	1.62	0.08	0.30
CMN-Maio (%)	0.78	-0.96	14.09	0.13	0.38	0.11	0.61
Autovalor	-	6.48	-	4.14	-	2.01	-
Variância explicada (%)	-	43.18	-	27.61	-	13.42	-
Variância acumulada (%)	-	43.18	-	70.80	-	84.22	-
Variáveis suplementares	-	CP1	-	CP2	-	CP3	-
Precipitação média (mm)	-	-0.78	-	0.05	-	-0.09	-
Temperatura média (°C)	-	-0.50	-	-0.38	-	-0.28	-
Umidade relativa média (%)	-	-0.80	-	0.30	-	0.07	-

CMN: cobertura média de nuvens.

Para veranicos das classes A e D, o CP1 capturou a variação nos dados impulsionada por padrões geográficos (latitude) e fisiográficos (altitude), bem como pela frequência de veranicos e cobertura média de nuvens, destacando as maiores contribuições (ctr) de CMN-Maio (13.32%), latitude (13.04%), CMN-Abril (12.12%), março (10.11%), altitude (9.22%), fevereiro (8.53%), etc. para a classe A, e latitude (14.45%), CMN-Maio (14.09%), CMN-Abril (13.87%), maio (12.98%), altitude e abril (ambos 10.32%), etc. para a classe D (**Tabela 1. 1**). A **Fig. 1. 7** mostra a distribuição espacial das pontuações dos componentes (CP1, CP2 e CP3) para ambas as classes de veranicos. No CP1 para as classes A (**Fig. 7a**) e D (**Fig. 7d**), as pontuações revelaram um gradiente latitudinal (norte-sul), onde os valores mais baixos se concentraram predominantemente na região centro-norte do Maranhão, em latitudes e altitudes mais baixas, enquanto os valores mais altos se distribuíram na região centro-sul, em latitudes e altitudes mais elevadas. A **Fig. F1** mostra a distribuição espacial das contribuições (em %) das estações meteorológicas para os CPs de ambas as classes de veranicos no Maranhão.

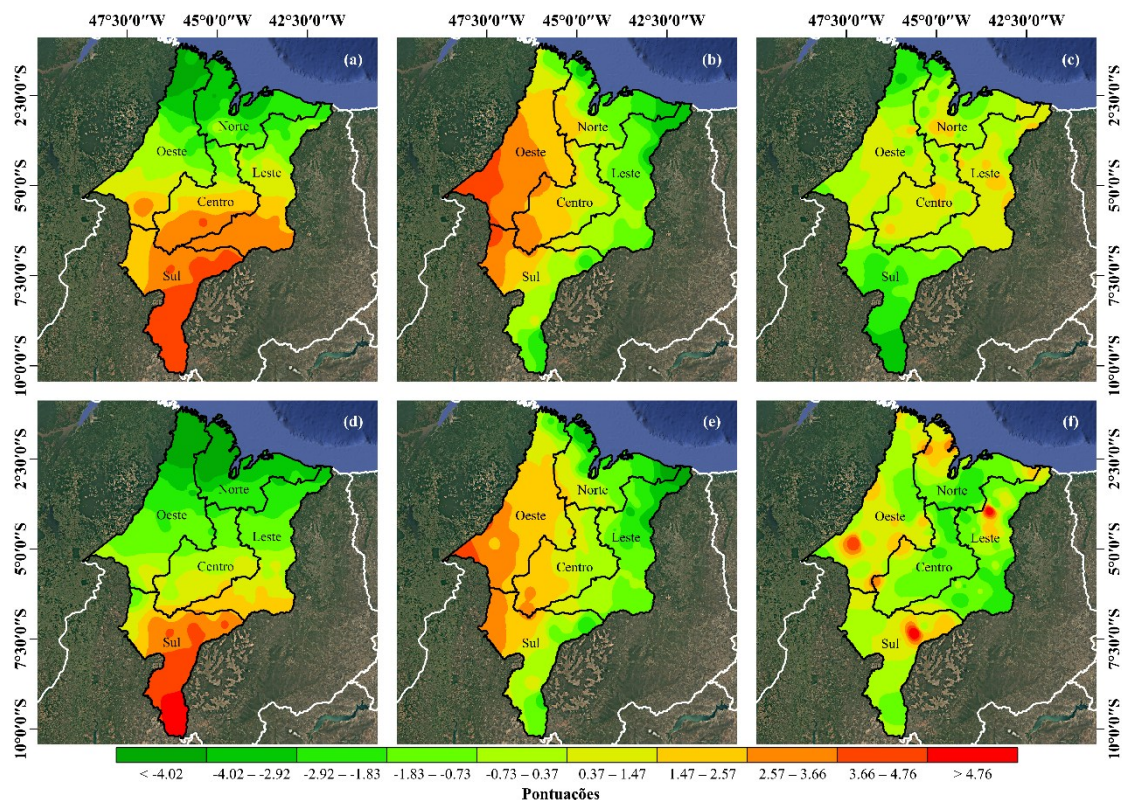


Fig. 1. 7 Distribuição espacial das pontuações dos componentes (CP1, CP2, CP3) para veranicos das classes A (a–c) e D (d–f) no Maranhão.

Após o CP1 capturar a variação ao longo de um gradiente latitudinal, o CP2 capturou a variação ao longo de um gradiente longitudinal (devido às restrições de ortogonalidade da ACP), para as classes A (**Fig. 1. 7b**) e D (**Fig. 1. 7e**), em associação com a cobertura média de nuvens de dezembro a março (**Tabela 1. 1**). Para ambas as classes, observam-se pontuações mais altas (mais baixas) do noroeste para o sudoeste (nordeste para sudeste) do Maranhão. Em relação ao CP3 para veranicos da classe A, a variação capturada esteve primariamente relacionada à frequência desses eventos em janeiro, abril e maio, associados a longitudes menores (**Tabela 1. 1**). A **Fig. 1. 7c** mostra que as pontuações mais altas para esse componente foram distribuídas por vastas regiões do Maranhão, enquanto as pontuações mais baixas foram distribuídas em áreas do extremo norte-noroeste, principalmente na mesorregião sul do estado. Para veranicos da classe D, a variação capturada pelo CP3 concentrou-se na frequência desses eventos nos meses de janeiro a março (**Tabela 1. 1**). As pontuações mais altas para este componente concentraram-se em porções das mesorregiões leste, sul e oeste do Maranhão, enquanto as pontuações mais baixas estenderam-se da mesorregião norte, passando pela mesorregião central, até grandes áreas da mesorregião leste do estado (**Fig. 1. 7f**).

Finalmente, as *variáveis suplementares* exibiram relações contrastantes com o CP1 (cargas fatoriais negativas) em ambos os casos (**Tabela 1. 1**). Para os outros CPs, essas variáveis apresentaram cargas mais baixas. A **Fig. 1. 3a** ilustra a distribuição espacial da precipitação média durante a estação chuvosa, que já foi mencionada. As distribuições espaciais das outras *variáveis suplementares* são mostradas na **Fig. G1** (APÊNDICE G). As maiores temperaturas médias (26.3 °C–27.2 °C) estão concentradas na região centro-norte, enquanto as menores (25.3 °C–26.2 °C) estão distribuídas na região centro-sul do Maranhão (**Fig.**

G1a). Em relação à umidade relativa média (**Fig. G1b**), os maiores valores ($> 84\%$) concentraram-se principalmente nas mesorregiões oeste e norte do Maranhão, enquanto os menores valores ($75\%–78\%$ e $< 75\%$) foram distribuídos em áreas extremas da mesorregião leste, estendendo-se até o extremo sul do estado.

4. Discussão

4.1. Padrões de precipitação no Maranhão

Este estudo analisou a dinâmica espaço-temporal de veranicos durante a estação chuvosa no Maranhão, de 1994 a 2023. Primeiramente, avaliou-se a variabilidade espaço-temporal da precipitação no estado, visto que uma compreensão preliminar dessa variabilidade pode auxiliar na compreensão da variabilidade dos veranicos (Menezes, 2009; Cunningham, 2020; Oliveira et al., 2021). Além disso, avaliou-se a variabilidade espaço-temporal da cobertura média de nuvens durante a estação chuvosa para investigar possíveis relações entre essa variável e a frequência de veranicos no Maranhão.

A região centro-norte apresentou a maior precipitação média em comparação com a região centro-sul. A precipitação mostrou menor variabilidade de janeiro a março e maior variabilidade em dezembro, abril e maio, característica da transição entre as estações chuvosa e seca. Esses resultados são consistentes com os de Menezes (2009) e Aparecido et al. (2023) e são atribuídos aos padrões geográficos (latitude e longitude), fisiográficos (topografia) e de vegetação (biomas Amazônia e Cerrado) do Maranhão, bem como às massas de ar e sistemas atmosféricos que operam em suas diferentes regiões. As principais massas de ar atuantes sobre o Maranhão, especialmente durante o verão austral (janeiro, fevereiro e março), são a mEc e a mEa (Borsato e Massoquim, 2020; Novais et al., 2023). Os sistemas atmosféricos incluem a ZCIT, linhas de instabilidade (LIs) e brisas marítimas (BMs) na região centro-norte (Ferreira e Mello, 2005; Reboita et al., 2010; Novais e Machado, 2023), frentes frias (FFs) e a ZCAS na região centro-sul (Ferreira e Mello, 2005; Menezes, 2009). Além disso, VCANs (Alves et al., 2006) e CCMs (Lyra et al., 2020) atuam frequentemente no estado sem preferências regionais. Novais et al. (2023) enfatizam que esses sistemas podem atuar isoladamente ou em associação.

Claramente, a cobertura de nuvens durante a estação chuvosa no Maranhão deve-se à ação das massas de ar e sistemas atmosféricos mencionados anteriormente. A maior cobertura média de nuvens observada ao longo da costa oeste do estado, especialmente de janeiro a março, pode ser atribuída à influência da mEc, que se desloca do interior da Amazônia, entrando na costa oeste do Maranhão em direção ao sudeste do Brasil. Durante o mesmo período, na região leste-nordeste do Maranhão, a alta cobertura de nuvens pode ser devida à mEa, que entra no estado pelo litoral norte, dirigindo-se para o centro do Brasil (Borsato e Massoquim, 2020; Novais et al., 2023). Durante os meses de abril e maio, a maior cobertura média de nuvens no centro-norte do Maranhão pode ser devida, sobretudo, à ação da ZCIT, que tem sua influência máxima no estado durante o mês de abril (Novais et al., 2023) e pode se deslocar até $\sim 5^\circ\text{S}$ durante esse período (Teodoro et al., 2019; Cavalcanti et al., 2009).

A variabilidade da precipitação no Maranhão também é influenciada pelos modos de variabilidade ENSO e Dipolo do Atlântico Tropical, seja por meio de seus efeitos combinados ou individuais (Soares et al., 2023; Furtado et al., 2025). Soares et al. (2023) descobriram que, entre 1980 e 2015, eventos fortes (moderados) de El Niño contribuíram para maiores (menores) déficits de precipitação sobre o Maranhão. No entanto, eventos moderados (fortes) de La Niña demonstraram maior (menor) influência em maiores

volumes de precipitação no estado. Assim, a frequência, duração e extensão dos períodos secos ou úmidos dependem do movimento, persistência e intensidade desses sistemas, bem como de suas interações. Por exemplo, She et al. (2016) identificaram o ENSO como um fator determinante no desencadeamento de períodos máximos de seca durante a estação chuvosa na Bacia do Rio Wei, China.

4.2. Frequência e distribuição espacial dos veranicos no Maranhão

Este estudo revelou que os veranicos da classe A foram os mais frequentes, seguidos pelas classes B, C e D. Os veranicos da classe A foram mais frequentes em janeiro, enquanto os das outras classes foram mais frequentes em dezembro e maio. Esses achados são consistentes com os de Cunningham (2020), Roldão (2020), Oliveira et al. (2021) e Nogueira et al. (2023), que analisaram a região Sudeste do Brasil e os estados do Tocantins, Rio de Janeiro e Ceará, respectivamente. A menor ocorrência de veranicos durante os meses centrais da estação chuvosa pode ser atribuída aos maiores volumes de chuva e à melhor distribuição temporal nesse período, o que reduz as chances de veranicos, particularmente os de maior duração (Cunningham, 2020; Oliveira et al., 2021).

Os veranicos de todas as classes apresentaram considerável variabilidade durante os meses da estação chuvosa no Maranhão. Os veranicos da classe A apresentaram a menor (maior) variabilidade em janeiro, fevereiro e abril (dezembro, março e maio), e os das demais classes em dezembro e maio (janeiro a abril). Isso indica que os veranicos mais longos são mais consistentes no início e no fim da estação chuvosa no Maranhão, enquanto os da classe A são mais variáveis durante os três meses mais chuvosos da estação. Quanto à distribuição espacial dos veranicos, considerando os totais de cada classe ao longo da estação chuvosa, a região centro-sul do Maranhão foi mais propensa a esses eventos para ambas as classes, exceto para a classe D, que no extremo norte apresentou frequências comparáveis às do sul do estado. A distribuição espacial dos veranicos em cada mês da estação chuvosa, especialmente os das classes B, C e D, corrobora o que foi discutido anteriormente, mostrando que no início (dezembro) e no final (maio) da estação chuvosa, quando a precipitação é menos constante, os veranicos são mais frequentes.

Em relação às classes C e D, observou-se um padrão peculiar em dezembro e maio. Em dezembro, veranicos dessas classes foram mais frequentes na região centro-norte e menos frequentes na região centro-sul do Maranhão. Em maio, o padrão se inverteu, com maior (menor) frequência dessas classes observada na região centro-sul (centro-norte). Esse padrão acompanha, em linhas gerais, o padrão de precipitação no Maranhão, que também se assemelha bastante à distribuição da cobertura média de nuvens, especialmente em dezembro e maio. Em dezembro, a maior média de precipitação e cobertura de nuvens concentrou-se na região centro-sul e, em maio, na região centro-norte. Assim, na região centro-norte, a probabilidade de veranicos mais longos é maior em dezembro, enquanto na região centro-sul, essa probabilidade é menor. Em maio, a situação se inverte, com a região centro-sul apresentando maior probabilidade de eventos extremos em comparação com a região centro-norte. Isso pode explicar, em parte, a considerável frequência de veranicos de classe D no extremo norte do Maranhão.

Segundo Menezes (2009), o Maranhão está localizado em uma zona de transição climática influenciada pelo clima semiárido do sertão nordestino, pela Amazônia quente e úmida e pelos planaltos do Brasil Central. De acordo com o mesmo autor, as características biogeográficas do centro-sul do Maranhão, que apre-

senta maior continentalidade, relevo mais complexo, vegetação de savana e a influência de sistemas atmosféricos mais transitórios (FFs, ZCAS, VCANs e CCMs), contribuem para uma maior variabilidade das chuvas tanto espacial quanto temporalmente, levando, assim, a uma maior frequência de veranicos nessa região.

No Maranhão, as chuvas não começam ou terminam simultaneamente em suas diferentes regiões, em grande parte devido à sua vasta extensão territorial (IMESC, 2021a, 2021b, 2022). No entanto, este estudo se concentrou nos meses que geralmente registram as maiores médias históricas de chuva no estado. Como mencionado anteriormente, esse período se estende de dezembro a maio (Corrêa et al., 2023). Essa constatação é consistente com a de Andrade Júnior et al. (2008), que realizaram o zoneamento de risco climático para a cultura da soja no Maranhão, visando principalmente reduzir sua exposição aos riscos e impactos associados aos veranicos. Eles demonstraram, com base no índice de satisfação das necessidades hídricas da cultura, que praticamente todo o estado apresenta baixo risco para a semeadura da soja a partir de dezembro.

4.3. Veranicos de classe A e D: relações com variáveis geográficas e atmosféricas

Ao reduzir a dimensionalidade e capturar padrões de variabilidade nos dados (já evidenciados por técnicas estatísticas anteriores), a ACP mostrou que a frequência mensal de veranicos das classes A e D está relacionada às variáveis de latitude, longitude e altitude, bem como à cobertura média de nuvens durante meses específicos da estação chuvosa no Maranhão.

Na classe A, o CP1, que explicou quase metade da variação dos dados, mostrou que a combinação de latitudes e altitudes mais elevadas no centro-sul do Maranhão esteve relacionada a uma maior frequência desses eventos entre dezembro e abril, bem como a uma maior cobertura média de nuvens em dezembro, em contraste com uma média mais baixa dessa variável de março a maio. Essas relações ocorrem em condições de precipitação, temperatura e umidade relativa médias mais baixas do que no centro-norte do Maranhão durante a estação chuvosa. A emergência da latitude como uma das variáveis responsáveis por uma parcela considerável da variabilidade dos dados é esperada, dada a ampla faixa latitudinal do Maranhão. Suas latitudes mais elevadas são acompanhadas por maior continentalidade, relevo mais complexo e elevado, e vegetação (savana) com fisionomias diversas que, com a influência de sistemas atmosféricos transitórios, contribuem para uma menor cobertura média de nuvens e precipitação, especialmente nos últimos meses da estação chuvosa (abril e maio). A combinação desses fatores proporciona maior variabilidade espaço-temporal na precipitação, o que resulta em maior frequência de veranicos durante a maior parte da estação chuvosa nessas regiões (Menezes, 2009).

No CP2, a longitude emerge como a variável responsável por uma parcela significativa da variabilidade dos dados, associada à maior cobertura média de nuvens durante os meses de dezembro a março. Isso pode ser atribuído às restrições da ACP não rotacionada, na qual o CP2 deve permanecer ortogonal ao CP1. A maior cobertura média de nuvens de dezembro a março em longitudes mais altas no Maranhão podem ser devidas à mEc, que atua na parte oeste do Maranhão durante esse período. No CP3, longitudes mais baixas foram associadas a uma maior frequência de veranicos classe A em janeiro, abril e maio. Esse é um padrão pouco evidenciado por técnicas estatísticas anteriores, mas foi capturado pela ACP, embora o CP3 explique uma proporção menor da variação dos dados. As relações representadas nos três CPs diferem daquelas

identificadas por Oliveira et al. (2021), que analisaram a variabilidade espaço-temporal de veranicos classe A no Rio de Janeiro. Essas diferenças podem ser atribuídas às características biogeográficas do Maranhão, onde a transição entre os biomas Amazônia e Cerrado, combinada com a influência da continentalidade, acentua os contrastes climáticos, diferentemente do Rio de Janeiro, onde predominam as influências oceânicas e de relevo.

Em relação aos veranicos de classe D no CP1, a latitude novamente parece ser responsável por uma proporção significativa da variabilidade, pelas mesmas razões mencionadas anteriormente. Latitudes mais elevadas no centro-sul do Maranhão são acompanhadas por altitudes mais elevadas, maior frequência de veranicos em abril e maio e maior cobertura média de nuvens em dezembro. Essas variáveis, associadas na mesma direção, contrastam com uma menor frequência de veranicos em dezembro e menor cobertura média de nuvens de março a maio. Essas relações também ocorreram em condições menos úmidas e mais frias. No CP2, novamente devido às restrições de ortogonalidade da PCA não rotacionada, a longitude emerge como responsável por uma proporção significativa da variabilidade. Longitudes mais elevadas (costa oeste do Maranhão) são acompanhadas por maior cobertura média de nuvens entre dezembro e março, novamente devido à influência da mEc durante esse período na região. Finalmente, o CP3 foi representado principalmente pela frequência de veranicos de classe D em janeiro, fevereiro e março, demonstrando que, durante esse período, a frequência desses eventos extremos foi em grande parte independente de variáveis geográficas e cobertura de nuvens, sendo mais influenciada pela dinâmica climática sazonal.

Como discutido anteriormente, a menor frequência de veranicos de classe D no centro-sul do Maranhão em dezembro se deve à precipitação mais consistente, com maior cobertura de nuvens associada a sistemas atmosféricos como FFs, ZCAS, VCANs e CCMs. Portanto, durante este mês na região, predominam veranicos de menor duração, como os de classe A. Em abril e maio, na região centro-norte do estado, a maior consistência das chuvas, associada principalmente à influência da ZCIT (com alta cobertura de nuvens), reduz a ocorrência de veranicos classe D, levando à predominância de veranicos classe A. Nos mesmos meses, na região centro-sul, quando a atividade das massas de ar (mEc e mEa) e dos sistemas atmosféricos (FFs, ZCAS, VCANs e CCMs) é menor ou ausente, a precipitação torna-se menos consistente (com menor cobertura de nuvens), resultando em maior frequência de veranicos classe D.

4.4. Implicações para a adaptação climática no Maranhão

Este estudo revelou que a região centro-sul do Maranhão é mais suscetível do que a região centro-norte a veranicos na maioria dos meses da estação chuvosa. Consequentemente, setores estratégicos como agricultura, recursos hídricos, ecologia e meio ambiente são mais vulneráveis aos impactos desses eventos. No entanto, a relevância da região centro-norte não deve ser subestimada, pois, particularmente no mês de dezembro, apresentou uma frequência considerável de veranicos, com destaque para os eventos mais prolongados, classes C e D.

No Maranhão, a agricultura de sequeiro é predominante, com participação significativa de estabelecimentos agrícolas familiares (IBGE, 2019a). No entanto, as atividades agrícolas são frequentemente conduzidas de forma desorganizada, sem o devido conhecimento das condições climáticas e do solo (Maranhão, 2019). Esses fatores, fundamentais para o desenvolvimento sustentável do setor produtivo, contribuem para o agravamento do risco de perdas na produção (Monteiro et al., 2023). Por exemplo, para a soja, que é uma

cultura cultivada em larga escala no Maranhão (IBGE, 2024), as fases de germinação-emergência e floração-enchimento de grãos são as mais sensíveis ao déficit hídrico durante o desenvolvimento (Farias et al., 2007).

Nesse contexto, a adoção de sistemas agrícolas resilientes ao clima é essencial para melhorar o manejo da variabilidade climática. Quando implementadas simultaneamente e de forma adequada, práticas como plantio direto, retenção de resíduos, rotação de culturas e integração lavoura-pecuária-floresta caracterizam a agricultura de conservação (Kassam et al., 2022). Essas estratégias contribuem para a conservação da umidade do solo, aumento da fertilidade, redução da erosão e aumento do teor de carbono orgânico. Além disso, ajudam a mitigar as emissões de gases de efeito estufa, reduzir os custos de produção e aumentar a produção de alimentos (Johansen et al., 2012; Palm et al., 2014; Thierfelder et al., 2017; Kassam et al., 2022; Oliveira et al., 2024; Raheem et al., 2025). Essas práticas têm sido adotadas mundialmente (Kassam et al., 2022; Oliveira et al., 2024) e devem ser a base para promover maior resiliência no setor agrícola do Maranhão diante dos desafios climáticos emergentes.

Outra medida fundamental para fortalecer a resiliência climática é aprimorar o monitoramento e a previsão de secas em escalas temporais e espaciais mais curtas. Atualmente, o Monitor de Secas do Brasil (<https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa>) fornece informações referentes ao mês anterior, publicadas no meio do mês corrente, resultando em uma periodicidade de aproximadamente 45 dias. Em comparação, o Monitor de Secas dos EUA (Svoboda et al., 2002), que inspirou o monitor brasileiro, fornece informações semanais. Assim, o Monitor de Secas do Brasil ainda opera com uma resolução temporal grosseira para monitorar as condições durante veranicos que, mesmo com duração de apenas alguns dias, podem afetar lavouras e pastagens (CGEE, 2016). Por exemplo, a produção de milho pode ser significativamente afetada por um veranico de apenas alguns dias que coincida com a fase de floração da cultura (Carvalho et al., 2000; Bergamaschi et al., 2006).

No Monitor de Seca do Brasil, os veranicos são classificados como categoria "S0", descrita como "Seca Fraca", que corresponde à situação de "entrando em seca", relacionada a veranicos de curta duração que podem impactar o plantio, o desenvolvimento das culturas e as pastagens. Por outro lado, a condição de "saindo de seca" está associada à ocorrência de déficits hídricos mais prolongados, que correspondem a veranicos mais longos (classe D, por exemplo), sem que as culturas ou pastagens tenham se recuperado completamente (CGEE, 2016). Portanto, é essencial que o Monitor de Seca do Brasil avance significativamente para fornecer um monitoramento mais eficaz e oportuno das condições de seca no país.

5. Conclusões

O estudo demonstra que, com base na categorização de veranicos durante a estação chuvosa em classes A, B, C e D, a região centro-sul do Maranhão é a mais suscetível a eles. Portanto, essa metodologia é eficaz para analisar a dinâmica espaço-temporal dos veranicos. Os veranicos da classe A são os mais frequentes (62.29% do total) no Maranhão, principalmente em janeiro, enquanto os das outras classes ocorrem principalmente em dezembro e maio. Principalmente em dezembro (maio), a região centro-norte (centro-sul) é mais suscetível às classes C e D devido à irregularidade das chuvas nessa região durante esse período. Essa irregularidade em dezembro na região centro-norte se deve à menor atividade das massas de ar (mEc e mEa) e dos sistemas atmosféricos (ZCIT, VCANs, CCMs, LIs e BMs). Isso também se aplica à região

centro-sul durante maio, quando as massas de ar e os sistemas como FFs, ZCAS, VCANs e CCMs já apresentam atividade reduzida ou nula.

A ACP capturou padrões de variabilidade evidenciados pelas técnicas estatísticas (descritiva, exploratória e de mapeamento) previamente aplicadas e quantificou as relações entre a frequência de veranicos das classes A e D e variáveis geográficas e atmosféricas. Em ambos os casos, essas relações ocorreram sob precipitação, temperatura e umidade relativa médias mais baixas, caracterizando um ambiente mais frio e seco. Na classe A, a maior parte da variação nos dados foi explicada pela associação entre latitudes e altitudes mais elevadas (no centro-sul do Maranhão) e uma maior frequência de veranicos de dezembro a abril, com maior cobertura de nuvens média em dezembro, em contraste com uma menor cobertura de nuvens média de março a maio. Na classe D, a maior proporção da variação foi explicada pela associação entre latitudes e altitudes mais elevadas e uma maior frequência de veranicos em abril e maio, com maior cobertura de nuvens em dezembro, em contraste com uma menor frequência de veranicos em dezembro e menor cobertura de nuvens de março a maio.

Esses resultados são essenciais para a formulação de estratégias locais de adaptação climática em setores-chave do Maranhão, incluindo agricultura, recursos hídricos e ecologia. No entanto, para uma compreensão mais profunda da dinâmica espaço-temporal dos veranicos no Maranhão, é fundamental investigar sua relação com modos de variabilidade climática como o ENSO e o Dipolo Tropical Atlântico. Investigar a frequência de veranicos máximos durante a estação chuvosa também pode fornecer informações valiosas. Tais estudos aprimorarão a compreensão da variabilidade espaço-temporal dos veranicos no Maranhão e contribuirão para um monitoramento e previsão mais eficientes desses fenômenos, permitindo uma preparação mais eficaz para evitar ou mitigar seus impactos.

Referências

- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., 2013b. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*. 113, 407–427. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0796-6>.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., Sparovek, G., 2013a. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Alves, J.M.B., Ferreira, F.F., Campos, J.N.B., Souza Filho, F.A., Souza, E.B., Duran, B.J., Servain, J., Studart T.M.C., 2006. Mecanismos atmosféricos associados à ocorrência de precipitação intensa sobre o nordeste do Brasil durante janeiro/2004. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 21, 56–76. <https://www.researchgate.net/publication/282171606>.
- Anandhi, A., Hutchinson, S., Harrington, J., Rahmani, V., Korkham, M.B., Rice, C.W., 2016. Changes in spatial and temporal trends in wet, dry, warm and cold spell length or duration indices in Kansas. *International Journal of Climatology*. 36, 4085–4101. <https://doi.org/10.1002/joc.4619>.
- Andrade Júnior, A.S., Bastos, E.A., Silva, C.O., 2008. Zoneamento de risco climático para a cultura da soja no Estado do Maranhão. Teresina: Embrapa Meio Norte. pp 23
- Aparecido, L.E.O., Meneses, K.C., Lorençone, P.A., Lorençone, J.A., Moraes, J.R.S.C., Rolim, G.S., 2023. Climate classification by Thornthwaite (1948) humidity index in future scenarios for Maranhão State, Brazil. *Environment, Development and Sustainability*. 25, 855–878. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02082-9>.
- Assad, E.D., Sano, E.E., Masutomo, R., Castro, L.H.R., Silva, F.A.M., 1993. Veranicos na região dos cerrados brasileiros frequência e probabilidade de ocorrência. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 28, 993–1003. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab1993.v28.3962>.
- Bako, M.M., Mashi, S.A., Bello, A.A., Adamu, J.I., 2020. Spatiotemporal analysis of dry spells for support to agriculture adaptation efforts in the Sudano-Sahelian region of Nigeria. *SN Applied Sciences*. 2, 1342. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3161-x>.
- Baratto, P.F.B., Cecílio, R.A., Teixeira, D.B.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>.
- Bergamaschi, H., Dalmago, G.A., Comiran, F., Bergonci, J.I., Müller, A.G., França, S., Santos, A.O., Radin, B., Bianchi, C.A.M., Pereira, P.G., 2006. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 41, 243–249. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000200008>.

- Bichet, A., Diedhiou, A., 2018. West African Sahel has become wetter during the last 30 years, but dry spells are shorter and more frequent. *Climate Research*. 75, 155–162. <https://doi.org/10.3354/cr01515>.
- Borsato, V., Massoquim, N. G., 2020. O delineamento das massas de ar no Brasil. Editora CRV.
- Carvalho, D.F., Faria, R.A., Sousa, S.A.V., Borges, H.Q., 2000. Espacialização do período de veranico para diferentes níveis de perda de produção na cultura do milho, na bacia do Rio Verde Grande, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 4, 172–176. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000200007>.
- Cavalcanti, I.F.A., Ferreira, N.J., Silva, M.G.A.J., Dias, M.A.F.S., 2009. Tempo e clima no Brasil. Oficina de Textos.
- CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2016. Secas no Brasil: política e gestão proativas. Brasília, Banco Mundial.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., Böhner, J., 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*. 8, 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>.
- 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/ab-clima.v32i19.16727>.
- Corrêa, W.C., Ribeiro, B., Rodrigues, A., Machado, N., Carvalho, M., 2024. Mapa de classificação climática de Thornthwaite para o Leste Maranhense. *Revista Geográfica Acadêmica*. 18, 113–135. <https://revista.ufr.br/rga/article/view/8110>.
- Cunningham, C., 2020. Characterization of dry spells in Southeastern Brazil during the monsoon season. *International Journal of Climatology*. 40, 4609–4621. <https://doi.org/10.1002/joc.6478>.
- Daltio, J., Martinho, P.R.R., Magalhães, L.A., 2016. Geoweb Matopiba: manual do usuário. Embrapa Territorial, Comunicado Técnico 38. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19404.51840>.
- Farias, J.R.B., Nepomuceno, A.L., Neumaier, N., 2007. Ecofisiologia da soja. Embrapa Soja, Londrina-PR, Circular Técnica 48. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/470308>.
- Ferijal, T., Batelaan, O., Shanafield, M., 2021. Spatial and temporal variation in rainy season droughts in the Indonesian Maritime Continent. *Journal of Hydrology*. 603, 126999. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126999>.
- Ferreira, A.G., Mello, N.G.S., 2005. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*. 1, 15–28. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>.
- Furtado, T.M.S., Assad, L.P.F., Parise, C.K., Vasconcellos, F.C., Sancho, L., Carpenedo, B.C., Barbosa, W.L., Soares, L.A.M., 2025. Variability of the Atlantic Niño: Impacts on precipitation in the state of Maranhão, Brazil. *Atmosfera*. 39, 225–246. <https://doi.org/10.20937/ATM.53393>.
- Garcês Júnior, A.R., 2022. Variabilidade da chuva e desastres associados à dinâmica hidroclimática no estado do Maranhão. Tese, Universidade Federal do Ceará. <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/69147>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019a. Censo agropecuário 2017: Resultados definitivos. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=73096>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019b. Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil. 45, Séries Relatórios Metodológicos. <https://www.ibge.gov.br/apps/biomas/#/home/>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Mapas. <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. Cidades e estados. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ma.html>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024. Produção Agrícola Municipal 2023. Rio de Janeiro: IBGE. <https://cidades.ibge.gov.br/>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2025. Renda domiciliar per capita. Rio de Janeiro: IBGE. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=73100>.
- IMESC - Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos, 2022. Boletim climático do Maranhão. 1. São Luís: IMESC. pp 62
- IMESC - Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos, 2021a. Boletim climático do Maranhão. 1. São Luís: IMESC. pp 71
- IMESC - Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos, 2021b. Boletim climático do Maranhão. 1. São Luís: IMESC. pp 53
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Field, C. B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M. (eds) Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp 582
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Team, C.W., Lee, H., Romero, J. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp 184. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., 1989. Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York.
- Johansen, C., Haque, M., Bell, R., Thierfelder, C., Esdaile, R., 2012. Conservation agriculture for small holder rainfed farming: opportunities and constraints of new mechanized seeding systems. *Field Crops Research*. 132, 18–32. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.026>.
- Jolliffe, I.T., 2002. Principal Component Analysis. 2nd ed. Springer.

- Kaiser, H.F., 1960. The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*. 20, 141–151. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>.
- Kaiser, H.F., 1970. A second generation Little Jiffy. *Psychometrika*. 35, 401–415. <https://doi.org/10.1007/BF02291817>.
- Kaiser, H.F., Rice, J., 1974. Little Jiffy, Mark IV. *Educational and Psychological Measurement*. 34, 111–117. <https://doi.org/10.1177/001316447403400115>.
- Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R., 2022. Successful Experiences and Lessons from Conservation Agriculture Worldwide. *Agronomy*. 12, 769. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040769>.
- Little, R.J.A., 1988. Missing-Data Adjustments in Large Surveys. *Journal of Business & Economics Statistics*. 6, 287–296. <https://doi.org/10.2307/1391878>.
- Lombe, P., Carvalho, E., Rosa-Santos, P., 2024. Drought Dynamics in Sub-Saharan Africa: Impacts and Adaptation Strategies. *Sustainability*. 16, 9902. <https://doi.org/10.3390/su16229902>.
- Luce, C., Vose, J., Pederson, N., 2016. Contributing factors for drought in United States forest ecosystems under projected future climates and their uncertainty. *Forest Ecology and Management*. 380, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.05.020>.
- Lyra, G.B., Correia, T.P., Oliveira Júnior, J.F., Zeri, M., 2018. Evaluation of methods of spatial interpolation for monthly rainfall data over the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*. 134, 955–965. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2322-3>.
- Lyra, M.J.A., Fedorova, N., Levit, V., Freitas, I.G.F., 2020. Características dos Complexos Convectivos de Mesoescala no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 35, 727–734. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786355000001>.
- Maconga, C.W., 2023. Arid fields where conflict grows: How drought drives extremist violence in Sub-Saharan Africa. *World Development Perspectives*. 29, 100472. <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2022.100472>.
- Maranhão, 2019. Zoneamento Agropecuário do Estado do Maranhão (ZAMA). Secretaria do Estado da Agricultura e Abastecimento (SAGRIMA). <https://sigite.sagrima.ma.gov.br/>.
- Menezes, R.H.N., 2009. Caracterização agroclimática e análise do rendimento agrícola do Estado do Maranhão, Brasil. Tese, Universidade Federal de Campina Grande. <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2084>.
- Monteiro, J.E.B.A., 2009. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília, DF: INMET.
- Monteiro, P.A., Campos, K.C., Lemos, J.J.S., Sousa, E.C., Lessa, L.C.R., 2023. Produção agropecuária e precipitações no estado do Maranhão: uma análise multivariada a partir dos censos agropecuários de 2006 e 2017. *Economia e Região*. 11, 359–377. <https://doi.org/10.5433/2317-627X.2023.v11.n3.47311>.
- NASA JPL., 2013. NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL1.003>.
- Nascimento, F.C.A., Braga, C.C., Araújo, F.R.C.D., 2017. Análise estatística dos eventos secos e chuvosos de precipitação no Estado do Maranhão. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 32, 375–386. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863230005>.
- Ndiaye, M.B., Sine, B., Sambakhe, D., Diallo, A.O., Muller, B., Sene, M., Sambou, S., 2024. Characterization of the starting conditions of the rainy season in Senegal: highlighting the constraints of crop establishment. *Environmental Research Communications*. 6, 075024. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad5081>.
- Nogueira, D.B., Silva, A.O., Girollo, A.B., Silva, A.P.N., Costa, B.R.S., 2023. Dry spells in a semi-arid region of Brazil and their influence on maize productivity. *Journal of Arid Environments*. 209, 104892. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104892>.
- Novais, G.T., Machado, L.A., 2023. Os climas do Brasil: segundo a classificação climática de Novais. *Revista Brasileira de Climatologia*. 32, 1–39. <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16163>.
- Novais, G.T., Nascimento, D.T.F., Machado, L.A., 2023. Sistemas atmosféricos e aspectos termoplúviométricos do Brasil. in: Novais, G.T., 2023. *Climas do Brasil: classificação climática e aplicações*. 1 ed. Totalbooks.
- Oliveira, B.C.C., Oliveira Júnior, J.F., Pereira, C.R., Sobral, B.S., Gois, G., Lyra, G.B., Machado, E.M., Correia Filho, W.L.F., Souza, A., 2021. Spatiotemporal variation of dry spells in the State of Rio de Janeiro: Geospatialization and multivariate analysis. *Atmospheric Research*. 257, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105612>.
- Oliveira, D.M.S., Santos, R.S., Chizzotti, F.H.M., Bretas I.L., Franco, A.L.C., Lima, R.P., Freitas D.A.F., Cherubin, M.R., Cerri, C.E.P., 2024. Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: A review. *Geoderma Regional*. 37, e00796. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00796>.
- Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., Grace, P., 2014. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 187, 87–105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>.
- QGIS Development Team, 2022. QGIS Geographic Information System (Versão 3.28.9). Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.org>.
- R Core Team, 2024. R: A language and environment for statistical computing (Versão 4.4.1). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>.
- Raheem, A., Bankole, O.O., Danso, F., Musa, M.O., Adegbite T.A., Simpson, V.B., 2025. Physical Management Strategies for Enhancing Soil Resilience to Climate Change: Insights From Africa. *European Journal of Soil Science*. 76, e70030. <https://doi.org/10.1111/ejss.70030>.
- Reboita, M.S., Gan, M.A., Rocha, R.P., Ambrizzi, T., 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 25, 185–204. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>.

- Rhein, S., Jansesberger, V., 2024. Does drought exposure erode trust in the political system in Sub-Saharan Africa? *Climatic Change*. 177, 114. <https://doi.org/10.1007/s10584-024-03768-5>.
- Rocha, T.B.C., Vasconcelos Júnior, F.C., Silveira, C.S. Martins, E.S.P.R., Gonçalves, S.T.N., Silva, E.M., Alves, J.M.B., Sakamoto, M.S., 2021. Indicadores de Veranicos e de Distribuição de Chuva no Ceará e os Impactos na Agricultura de Sequeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 36, 579–589. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863630041>.
- Roldão, A.F., 2020. Veranicos no estado do Tocantins e a cultura da soja. Tese, Universidade Federal de Uberlândia. <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.403>.
- Rubin, D.B., 1996. Multiple Imputation after 18+ Years. *Journal of the American Statistical Association*. 91, 473–489. <https://doi.org/10.2307/2291635>.
- She, D., Xia, J., Zhang, Y., Shan, L., 2016. Regional frequency analysis of extreme dry spells during rainy season in the Wei River Basin, China. *Advances in Meteorology. Special Issue*. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6427568>.
- Sirangelo, B., Caloiero, T., Coscarelli, R., Ferrari, E., 2017. Stochastic analysis of long dry spells in Calabria (Southern Italy). *Theoretical and Applied Climatology*. 127, 711–724. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1662-0>.
- Soares, L.A.M., Parise, C.K., Machado, A.M.B., Carpenedo, C.B., Furtado, T.M.S., Barreto, H.N., Lima, L.G., Sousa, H.L.S., 2023. Influences of strong and moderate ENSO events on the Maranhão precipitation from the western equatorial Atlantic SST anomalies. *Ocean and Coastal Research*. 71, e23043. <http://doi.org/10.1590/2675-2824072.22057lams>.
- Svoboda, M., Lecomte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., Stephens, S., 2002. The Drought Monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 83, 1181–1190. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1181>.
- Teodoro, T.A., Reboita, M.S., Escobar, G.C.J., 2019. Caracterização da Banda Dupla da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no Oceano Atlântico. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*. 42, 282–298. https://doi.org/10.11137/2019_2_282_298.
- Thierfelder, C., Chivenge, P., Mupangw, W., Rosenstock, T.S., Lamanna, C., Eyre, J.X., 2017. How climate-smart is conservation agriculture (CA)? – Its potential to deliver on adaptation, mitigation and productivity on smallholder farms in southern Africa. *Food Security*. 9, 537–560. <https://doi.org/10.1007/s12571-017-0665-3>.
- UNCCD – United Nations Convention to Combat Desertification, 2022. Drought in numbers 2022. COP-15 Côte d'Ivoire.
- Unfried, K., Kis-Katos, K., Poser, T., 2022. Waterscarcity and social conflict. *Journal of Environmental Economics and Management*. 113, 102633. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102633>.
- van Buuren, S., 2012. Flexible Imputation of Missing Data. 1 Ed. New York, Chapman and Hall/CRC, pp 342. <https://doi.org/10.1201/b11826>.
- van Buuren, S., Brand, J.P.L., Groothuis-Oudshoorn, C.G.M., Rubin, D.B., 2006. Fully conditional specification in multivariate imputation. *Journal of Statistical Computation and Simulation*. 76, 1049–1064. <https://doi.org/10.1080/10629360600810434>.
- van Buuren, S., Groothuis-Oudshoorn, K., 2011. mice: Multivariate Imputation by Chained Equations in R. *Journal of Statistical Software*. 45, 1–67. <https://doi.org/10.18637/jss.v045.i03>.
- Vicente-Serrano, S.M., Pricope, N.G., Toreti, A., Morán-Tejeda, E., Spinoni, J., Ocampo-Melgar, A., Archer, E., Diedhiou, A., Mesbahzadeh, T., Ravindranath, N.H., Pulwarty, R.S., Alibakhshi, S., 2024. The Global Threat of Drying Lands: Regional and global aridity trends and future projections. A Report of the Science-Policy Interface. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Bonn, Germany.
- Walker, D.W., Van Loon, A.F., 2023. Droughts are coming on faster. *Science*. 380, 130–132. <https://doi.org/10.1126/science.adh3097>.
- Walker, D.W., Vergopolan, N., Cavalcante, L., Smith, K.H., Agoonbome, S.M.D., Almagro, A., Apurv, T., Dahal, N.M., Hoffmann, D., Singh, V., Xiang, Z., 2024. Flash drought typologies and societal impacts: a worldwide review of occurrence, nomenclature, and experiences of local populations. *Weather, Climate, and Society*. 16, 3–28. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-23-0015.1>.
- Wilhite, D.A., Sivakumar, M.V., Pulwarty, R., 2014. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Weather and Climate Extremes*. 3, 4–13. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.01.002>.

CAPÍTULO III

ANÁLISE DE FREQUÊNCIA REGIONAL DE VERANICOS EXTREMOS DURANTE A ESTAÇÃO CHUVOSA NO MARANHÃO, BRASIL

Artigo a ser submetido no periódico **Climate Change**, da base de dados **Springer Nature Link, Springer Nature**. Print ISSN: 0165-0009; Eletronic ISSN: 1573-1480.

Métricas: CiteScore = 9.8; Journal Impact Factor= 4.8 (2024); 5-year Journal Impact Factor = 5.8 (2024).

As normas do periódico podem ser obtidas no link: <https://link.springer.com/journal/10584/submission-guidelines>

Análise de frequência regional de veranicos extremos durante a estação chuvosa no Maranhão, Brasil

Resumo

Os veranicos extremos durante a estação chuvosa representam sérios riscos para setores-chave, como os de agricultura, recursos hídricos e ecológico. No estado do Maranhão, Brasil, apesar de muito se beneficiar de tais setores, ainda conta com pouco conhecimento a respeito desses extremos climáticos subsazonais. Assim, o objetivo com este estudo foi analisar a frequência regional dos veranicos extremos durante a estação chuvosa no Maranhão (dezembro–maio) usando dados diários de precipitação de 123 estações meteorológicas. Para isso, empregou-se a análise de frequência regional pelo método dos momentos L. Por meio do método K -means e alguns ajuste subjetivos, identificou-se cinco sub-regiões homogêneas de frequência de veranicos extremos no Maranhão. O agrupamento se baseou nos atributos geográficos e nas médias de duração dos veranicos extremos de cada estação. A homogeneidade foi indicada pela medida de heterogeneidade H ($H_l < 1$). A medida de qualidade de ajuste (Z^{DIST}) e os diagramas de momentos L indicaram que, para as sub-regiões 1 (a leste do Maranhão) e 3 (a centro-oeste), a distribuição GEV é o melhor ajuste para as séries temporais, enquanto para as sub-regiões 2 (a sul), 4 (a sul-sudoeste) e 5 (a norte) são as distribuições GLO, PE3 e GNO, respectivamente. Todas as distribuições apresentaram boa precisão nas estimativas de quantis regionais e em cada estação para diferentes períodos de retorno. As sub-regiões 2 e 5 são as mais suscetíveis à ocorrência veranicos extremos. Esses resultados são essenciais para o desenvolvimento de estratégias de adaptação climática no Maranhão.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Precipitação diária; Seca subsazonal; Frequência regional; Momentos L.

1 Introdução

Nas últimas décadas, as mudanças climáticas têm intensificado e ampliado a ocorrência de extremos climáticos em diversas regiões do mundo, sendo a seca um dos mais relevantes (IPCC 2023). Esse fenômeno pode desestabilizar múltiplos setores simultaneamente (Van Loon 2015), sobretudo os de agricultura, recursos hídricos, ecologia, saúde e energia (IPCC 2023), além de agravar o risco de fome, desnutrição, migração, conflitos sociais e instabilidade governamental (Unfried et al. 2022; Maconga 2023; Lombe et al. 2024; Rhein e Jansesberger 2024).

Durante a estação chuvosa, períodos prolongados de déficit de precipitação, frequentemente acompanhados por temperaturas e evapotranspiração elevadas, resultam na redução da umidade superficial do solo, o que pode evoluir para secas hidrológicas e socioeconômicas (Van Loon 2015). Essa diminuição da umidade costuma ocorrer de forma acelerada e em curto intervalo de tempo, caracterizando uma seca repentina (Svoboda et al. 2002; Otkin et al. 2018), com impactos substanciais sobre culturas agrícolas (Shi et al. 2025) e ecossistemas naturais (Gu et al. 2025), entre outros. No caso da seca hidrológica, Van Loon (2015) destaca que, em climas sazonais quentes, a maior parte da recarga hídrica ocorre justamente na estação chuvosa. Assim, um déficit de precipitação nesse período reduz o armazenamento de água, podendo resultar em uma seca da estação chuvosa para a estação seca subsequente (Van Loon e Van Lanen 2012). Esse tipo de evento

afeta a agricultura irrigada, os ecossistemas aquáticos, a geração de energia hidrelétrica, a navegação, a disponibilidade de água potável e as atividades recreativas (Van Loon 2015). A seca socioeconômica, por sua vez, decorre dos impactos combinados desses diferentes tipos de seca sobre a sociedade e a economia.

No estado do Maranhão, há uma lacuna de conhecimento sobre a frequência de veranicos extremos durante a estação chuvosa. Isso ocorre apesar do estado ter grande relevância e potencial para a produção de alimentos – integrante da fronteira agrícola de *communities* do MATOPIBA (Daltio et al. 2016), ser rico em recursos hídricos (NUGEO 2016), abrigar os biomas Amazônia e Cerrado, além de possuir uma extensa faixa litorânea (IBGE 2019a, 2022), que lhe conferem grande riqueza em biodiversidade e serviços ecossistêmicos. Dessa forma, mesmo diante do atual cenário de mudanças climáticas (IPCC 2023), setores fundamentais que sustentam a economia do estado ainda operam sem estratégias de adaptação e gestão sustentável, o que os torna mais vulneráveis aos impactos de eventos climáticos extremos, como as secas.

Ainda que autores como Nascimento et al. (2017), Aparecido et al. (2023), Soares et al. (2023) e Furtado et al. (2025) tenham explorado a variabilidade das chuvas no Maranhão, nenhum dos estudos se concentrou em analisar a ocorrência de veranicos extremos durante a estação chuvosa no estado. Nesse contexto, compreender os padrões espaciais e temporais da ocorrência de secas é, portanto, essencial para o desenvolvimento de estratégias de adaptação às mudanças climáticas e para a gestão sustentável dos recursos naturais, bem como para viabilizar um monitoramento mais eficaz desses eventos (Christian et al. 2021, 2023, 2024; Yuan et al. 2023). Dado que se trata de um fenômeno que afeta grandes áreas, um dos pontos de partida para uma avaliação abrangente da sua variabilidade espaço-temporal é a análise de sua frequência regional (Hosking e Wallis 1997; She et al. 2016; Li et al. 2022).

Partindo de um conjunto de estações meteorológicas distribuídas sobre a área de estudo, a análise de frequência regional, baseada no método dos momentos L (Hosking e Wallis 1993, 1997), propõe agrupar as estações cujas séries temporais apresentam características similares quanto ao fenômeno em análise, as quais podem ser modeladas por uma mesma distribuição de probabilidade, o que caracteriza a identificação de sub-regiões homogêneas. A partir disso, as séries temporais das estações que compõem cada sub-região são combinadas para formar uma série regional única, a partir da qual são obtidas estimativas de quantis mais precisas em comparação com aquelas provenientes de análises aplicadas a um único local (Hosking e Wallis 1997). Adicionalmente, o mapeamento dessas estimativas para diferentes períodos de retorno constitui uma ferramenta eficaz para a avaliação visual das regiões mais suscetíveis à ocorrência dos eventos extremos analisados (She et al. 2016; Li et al. 2022).

Neste contexto, muitos autores têm empregado a análise de frequência regional para avaliar, de forma mais abrangente e precisa, a frequência de eventos extremos, como as secas (She et al. 2016; Ullah et al. 2020; Li et al. 2022; Aktürk et al. 2024). Desse modo, com base em séries temporais de 123 estações meteorológicas instaladas no Maranhão (93) e regiões vizinhas (30), o objetivo com este estudo foi realizar uma análise de frequência regional pelo método dos momentos L para: (i) identificar sub-regiões homogêneas de frequência de veranicos extremos durante a estação chuvosa no estado do Maranhão; e (ii) mapear os quantis estimados em cada estação, a fim de identificar as regiões do Maranhão mais suscetíveis à sua ocorrência.

2 Material e métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo abrange o estado do Maranhão (Fig. 2. 1), pertencente à Região Nordeste do Brasil (NEB), situado entre as latitudes 1°2'57" S e 10°15'42" S e as longitudes 41°47'45" W e 48°45'18" W (IBGE 2022). Ao norte, faz limite com o Oceano Atlântico; ao sul e sudoeste com o estado do Tocantins (TO); a oeste com o estado do Pará (PA); e a leste e sudeste com o estado do Piauí (PI). Com uma área de 329,651.495 km², conta com 217 municípios, distribuídos entre as mesorregiões Centro, Leste, Norte, Oeste e Sul, além de uma população de 6,776,699 habitantes (IBGE 2023).

No Maranhão, regiões a norte-noroeste apresentam médias anuais de precipitação pluvial superiores a 2,200 mm, ao passo que em grandes porções das mesorregiões Leste e Sul tais médias são inferiores a 1,100 mm (Alvares et al. 2013a; Corrêa et al. 2023). Em relação à temperatura média anual, esta varia de 23 °C a 29 °C, com os maiores valores observados no centro-norte, e os menores sobretudo no centro-sul do estado (Alvares et al. 2013b). Com base na classificação de Köppen: porções do extremo norte e noroeste do Maranhão apresentam clima Am; e, a maior parte do centro-norte e centro-sul do estado contam com os climas Aw' e Aw, respectivamente (Alvares et al. 2013a; Corrêa et al. 2023). O bioma Amazônia ocupa ~34.6% do território maranhense, ao passo que o bioma Cerrado ocupa ~65.4% (IBGE 2019a).

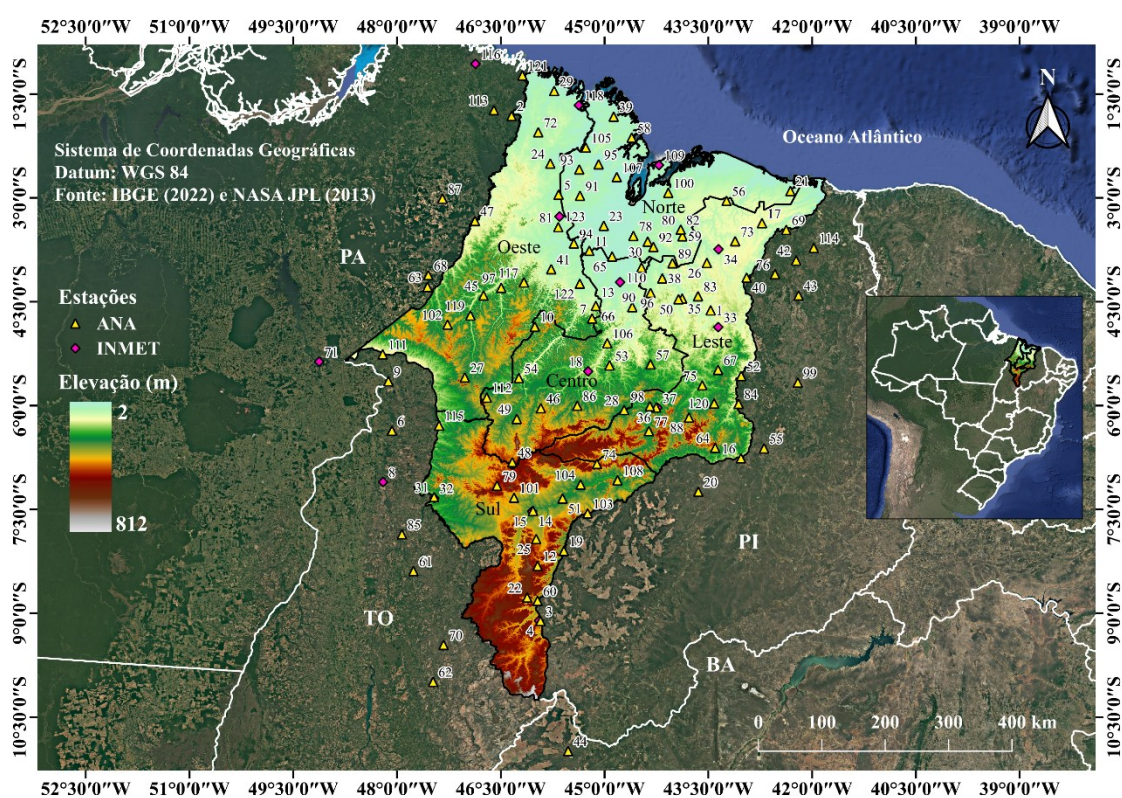


Fig. 2. 1 Mapa do estado do Maranhão, com destaque para as mesorregiões Centro, Leste, Norte, Oeste e Sul, elevação (m) e localização das estações meteorológicas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A economia do Maranhão gira em torno: da indústria – com destaque para a transformação de alumínio; dos serviços; do extrativismo; da agricultura – destacando-se na produção de soja, milho, arroz e mandioca; e da pecuária – principalmente produção bovina e galináceos (IBGE 2024). Embora apresente crescimento

econômico impulsionado pela expansão territorial e aumento da produção, o Maranhão conta com um Índice de Desenvolvimento Humano de 0.676, e um rendimento mensal domiciliar per capita de R\$ 1,077.00, sendo ambos os menores do Brasil (IBGE 2025).

2.2 Coleta de dados e preenchimento de falhas

Dados diários de precipitação pluvial de 123 estações meteorológicas foram obtidos dos bancos de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA; <http://hidroweb.ana.gov.br>) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET; <https://portal.inmet.gov.br>). Os períodos de registros das estações variam entre um máximo de 61 anos (1963–2023) e um mínimo de 30 anos (1994–2023), conforme a **Tabela H1** (APÊNDICE H) no Material Suplementar. Das 123 estações, 29 estão localizadas em estados limítrofes ao Maranhão e 1 no estado da Bahia (BA; **Fig. 2. 1** e **Tabela H1**). O objetivo da inclusão de estações instaladas próximas dos limites do estado é minimizar os efeitos de borda no processo de interpolação (Lyra et al. 2018; Oliveira et al. 2021; Baratto et al. 2022).

Os dados faltantes de precipitação em cada uma das estações representaram menos de 5% do total (**Tabela H1**), e foram preenchidos com valores imputados via Multiple Imputation By Chained Equations. Este, se trata de um algoritmo que se baseia em modelos de imputação de regressão sequencial, em que cada variável é imputada usando as demais, resultando em n imputações por meio de múltiplas iterações (Rubin 1996; van Buuren et al. 2006; van Buuren e Groothuis-Oudshoorn 2011). Utilizou-se o método Predictive Mean Matching como modelo de estimativa de regressão (Little 1988), o qual garante valores imputados que realmente poderiam ser medidos, uma vez que seleciona, aleatoriamente, apenas valores observados mais próximos da predição correspondente (van Buuren 2012; van Buuren e Groothuis-Oudshoorn 2011). Este processo foi realizado no software R, versão 4.4.1, por meio do pacote *mice*, versão 3.16.0 (R Core Team 2024).

2.3 Estação chuvosa e identificação de veranicos extremos

Neste estudo, a estação chuvosa foi definida de 1 de dezembro a 31 de maio. De acordo com Corrêa et al. (2023), este período concentra ~85% da precipitação anual no Maranhão. Considerou-se dia seco aquele com precipitação inferior a 1 mm, conforme adotado por She et al. (2016) e Oliveira et al. (2021). Um veranico extremo corresponde à maior sequência de dias secos, e seu comprimento (ou duração) é dado em dias. She et al. (2016) destacam que um período de seca pode: (i) começar antes da estação chuvosa e continuar após seu início; (ii) ocorrer inteiramente durante a estação chuvosa; e (iii) começar durante a estação chuvosa e continuar após seu término. No presente estudo, as três situações mencionadas foram consideradas. Entretanto, nas situações (i) e (iii), considerou-se somente o comprimento do evento durante a estação chuvosa, caso se tratasse de um veranico extremo, conforme She et al. (2016).

2.4 Análise de Frequência Regional

2.4.1 Momentos L: uma breve introdução

Hosking (1990) propôs os momentos L com base nos momentos ponderados por probabilidade (Greenwood et al. 1979), apresentando-os como expectativas de combinações lineares de estatísticas ordinais, calculáveis para qualquer variável aleatória cuja a média exista. Neste estudo, empregou-se a análise de frequência

regional utilizando momentos L (Hosking e Wallis 1993, 1997) para se obter estimativas da frequência de veranicos extremos no estado do Maranhão.

Dada uma amostra finita de tamanho n , ordenada como $x_{1:n} \leq x_{2:n} \leq \dots \leq x_{n:n}$, Hosking e Wallis (1997) enfatizam que é conveniente começar com um estimador do momento ponderado pela probabilidade β_r . Um estimador imparcial de β_r é (Eq. 1):

$$b_r = n^{-1} \sum_{j=r+1}^n \frac{(j-1)(j-2) \dots (j-r)}{(n-1)(n-2) \dots (n-r)} x_{j:n} \quad (1)$$

Para os quatro primeiros momentos L amostrais têm-se (Eqs. 2–5):

$$\iota_1 = b_0 = n^{-1} \sum_{j=1}^n x_{j:n} \quad (2)$$

$$\iota_2 = 2b_1 - b_0, \text{ com } b_1 = n^{-1} \sum_{j=2}^n \frac{(j-1)}{(n-1)} x_{j:n} \quad (3)$$

$$\iota_3 = 6b_2 - 6b_1 + b_0, \text{ com } b_2 = n^{-1} \sum_{j=3}^n \frac{(j-1)(j-2)}{(n-1)(n-2)} x_{j:n} \quad (4)$$

$$\iota_4 = 20b_3 - 30b_2 + 12b_1 - b_0, \text{ com } b_3 = n^{-1} \sum_{j=4}^n \frac{(j-1)(j-2)(j-3)}{(n-1)(n-2)(n-3)} x_{j:n} \quad (5)$$

Finalmente, as razões de momentos L amostrais são calculadas como (Eqs. 6–9):

$$L - \text{média} = \iota_1 \quad (6)$$

$$L - CV = t = \frac{\iota_2}{\iota_1} \quad (7)$$

$$L - \text{assimetria} = t_3 = \frac{\iota_3}{\iota_2} \quad (8)$$

$$L - \text{curtose} = t_4 = \frac{\iota_4}{\iota_2} \quad (9)$$

onde L -média (medida de localização) é igual à média aritmética convencional, L -CV (medida de escala) mede a dispersão das variáveis e, L -assimetria e L -curtose representam medidas da forma da distribuição das amostras (Hosking e Wallis 1997).

2.4.2 Etapas da Análise de Frequência Regional

De acordo com Hosking e Wallis (1997), as etapas a serem realizadas na análise de frequência regional utilizando os momentos L são: (i) triagem dos dados; (ii) identificação de regiões homogêneas; (iii) escolha de uma distribuição de frequência; e (iv) estimativa da distribuição de frequência. A seguir, descreve-se cada uma das etapas mencionadas.

2.4.2.1 Triagem dos dados

Uma primeira inspeção do conjunto de dados foi realizada durante a imputação dos dados faltantes de precipitação diária, como descrito anteriormente (Seção 2.2). Após a identificação dos veranicos extremos, as séries foram avaliadas quanto à estacionaridade (em nível) e à independência serial, por meio dos testes de Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS; Kwiatkowski et al. 1992) e Ljung-Box (Ljung e Box 1978), respectivamente, ambos com $\alpha = 0.05$. Esses dois requisitos são duas de cinco suposições que devem ser atendidas na análise de frequência regional, ainda que de uma forma não tão rigorosa. As demais são improváveis de serem atendidas por dados ambientais (ver Hosking e Wallis 1997).

2.4.2.2 Identificação de regiões homogêneas

Esta é a etapa fundamental da análise de frequência regional, na qual as distribuições de frequência nas estações de uma região são aproximadamente idênticas (exceto por um fator de escala) e que podem ser modeladas por uma mesma distribuição de probabilidade, caracterizando a região como quase homogênea (Hosking e Wallis 1997). Para uma identificação preliminar das sub-regiões homogêneas, aplicou-se o algoritmo de agrupamento *K*-means para formar grupos de estações, com base nas variáveis de latitude ($^{\circ}$), longitude ($^{\circ}$), altitude (m) e média da duração (dia; t_1 , Eq. 6) dos veranicos extremos das estações. O algoritmo *K*-means tem como objetivo, dividir M pontos em N dimensões em K grupos de forma que a soma dos quadrados dentro do grupo seja minimizada (Hartigan e Wong 1979).

Contudo, as sub-regiões definidas inicialmente podem ser não homogêneas devido à presença de estações discordantes. Para detectá-las, Hosking e Wallis (1993) propuseram a medida de discordância (D_i), calculada a partir dos momentos L das séries de cada estação. A medida de discordância (D_i) é dada por (Eq. 10):

$$D_i = \frac{1}{3} N(u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (10)$$

onde: N é a quantidade de estações na sub-região; u_i é um vetor contendo os valores de t , t_3 e t_4 para a estação i ($u_i = [t^{(i)} \quad t_3^{(i)} \quad t_4^{(i)}]^T$); $\bar{u}$ é a média de u_i ($\bar{u} = N^{-1} \sum_{i=1}^N u_i$); T denota a transposição de um vetor ou matriz; e A é a matriz de somas de quadrados e produtos cruzados ($A = \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T$). A estação i é considerada discordante se seu D_i excede o valor crítico, que depende da quantidade de estações no grupo. Os valores de D_i para 5 e até ≥ 15 estações por grupo estão disponíveis em Hosking e Wallis (1997).

Após identificar as estações discordantes, alguns ajustes subjetivos podem ser feitos no intuito de melhorar a coerência física regional e reduzir a heterogeneidade das regiões. De acordo com Hosking e Wallis (1997), os ajustes podem incluir: (i) mover uma estação ou algumas estações de uma região para outra; (ii) excluir uma estação ou algumas estações do conjunto de dados; (iii) subdividir a região; (iv) dividir a região reatribuindo suas estações a outras regiões; (v) fundir a região com outra ou outras; (vi) mesclar duas ou mais regiões e redefinir grupos; e (vii) obter mais dados e redefinir grupos. Os ajustes (i), (ii) e (iii) foram realizados no presente estudo.

A homogeneidade de uma região é aferida por meio da medida de heterogeneidade (H) proposta por Hosking e Wallis (1993). Essa medida compara as variações entre os momentos L amostrais das estações no grupo de estações com o que seria esperado para uma região homogênea (Hosking e Wallis 1993, 1997). “o que seria esperado” é estabelecido através de experimentos de simulação de Monte Carlo, empregando-

se uma distribuição kappa de quatro parâmetros ajustada aos momentos L em cada região proposta – consultar Hosking e Wallis (1993, 1997) para mais detalhes. H_1 , H_2 e H_3 são medidas de heterogeneidade para as razões de momentos L -CV (t), L -assimetria (t_3) e L -curtose (t_4), respectivamente. Neste estudo, H_1 foi utilizado por ter um maior poder discriminatório em comparação com H_2 e H_3 (Hosking e Wallis 1993, 1997). Calcula-se H_1 por (Eq. 11):

$$H_1 = \frac{V_1 - \mu_{v_1}}{\sigma_{v_1}} \quad (11)$$

onde: V_1 é o desvio padrão ponderado dos L -CVs observados da região i ; μ_{v_1} e σ_{v_1} são a média e o desvio padrão de V_1 obtidos a partir de um grande número de simulações (N_{sim}) de regiões homogêneas. Neste estudo, aplicou-se $N_{sim} = 1,000$. Hosking e Wallis (1993, 1997) sugerem que uma região seja considerada “aceitavelmente homogênea” se $H_1 < 1$, “possivelmente heterogênea” se $1 \leq H_1 < 2$, e “definitivamente heterogênea” se $H_1 \geq 2$.

2.4.2.3 Escolha da distribuição de frequência

A escolha de uma distribuição que forneça estimativas precisas de quantis para cada estação em uma região homogênea ($H_1 < 1$) foi baseada na medida de qualidade de ajuste Z (Hosking e Wallis 1993), calculada para cada distribuição candidata. Neste estudo, cinco distribuições candidatas foram avaliadas, a saber: logística generalizada (GLO); valor extremo generalizado (GEV); normal generalizada (GNO); tipo III de Pearson (PE3); e, Pareto generalizada (GPA). Para cada distribuição, a medida de ajuste é dada por (Eq. 12):

$$Z^{DIST} = \frac{\tau_4^{DIST} - t_4^R + B_4}{\sigma_4} \quad (12)$$

onde: τ_4^{DIST} é a L -curtose da distribuição ajustada, e $DIST$ pode ser qualquer uma das distribuições candidatas; t_4^R é a média regional de L -curtose, ponderada proporcionalmente ao comprimento de registro das estações; B_4 é o viés de t_4^R ; e σ_4 é o desvio padrão de t_4^R .

B_4 e σ_4 são dados pelas Eqs. 13 e 14:

$$B_4 = N_{sim}^{-1} \sum_{m=1}^{N_{sim}} (t_4^{[m]} - t_4^R) \quad (13)$$

$$\sigma_4 = \left[(N_{sim} - 1)^{-1} \left\{ \sum_{m=1}^{N_{sim}} (t_4^{[m]} - t_4^R)^2 - N_{sim} B_4^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

onde, em B_4 e σ_4 , $t_4^{[m]}$ é a média regional da m -ésima região simulada. Novamente, utilizou-se $N_{sim} = 1,000$. Hosking e Wallis (1993, 1997) recomendam considerar o ajuste adequado quando $|Z^{DIST}| \leq 1.64$ e, se mais de uma distribuição satisfizer tal critério, escolhe-se aquela com o menor $|Z^{DIST}|$.

Além disso, como complemento à estatística Z^{DIST} no processo de seleção de uma distribuição regional apropriada, utilizou-se gráficos de razão de L -assimetria (t_3) e L -curtose (t_4), onde a qualidade do ajuste é avaliada pela forma como a L -assimetria e a L -curtose da distribuição ajustada combinam com a L -assimetria e a L -curtose médias regionais dos dados observados (Hosking e Wallis 1997). Este se trata de um

método visual muito útil para a seleção de uma distribuição de probabilidade regional ajustada a dados homogêneos, como observado por Peel et al. (2001).

2.4.2.4 Estimativa da distribuição de frequência

A análise de frequência regional se justifica na relação entre as distribuições de frequência em diferentes locais (Hosking e Wallis 1997). A partir de tal relação, os dados de N estações em uma região homogênea são combinados para estimar os parâmetros e quantis da distribuição escolhida de forma mais precisa do que ajustando as distribuições às séries de cada estação separadamente. Para estimar os parâmetros e quantis da distribuição empregou-se o “algoritmo momento L regional” descrito em Hosking e Wallis (1997).

Por meio das Eqs. 7–9 calculou-se as razões de momentos L para cada estação. Em seguida, gerou-se a curva de crescimento regional $\hat{q}(F)$ – comum a todas as estações da região – com base nos parâmetros da distribuição estimados em cada estação, e depois combinados para fornecer estimativa regionais dadas por (Eq. 15):

$$\hat{\theta}_k^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \hat{\theta}_k^{(i)}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (15)$$

onde: N é o total de estações na região; n_i é o tamanho da amostra da estação i ; e $\hat{\theta}_k^{(i)}$ é a estimativa do parâmetro na estação i . Esses parâmetros são as razões dos momentos L nas Eqs. 7–9. Então, a curva de crescimento regional é dada por $\hat{q}(F) = q(F; \hat{\theta}_1^R, \dots, \hat{\theta}_p^R)$.

Os quantis $\hat{Q}_i(F)$ com probabilidade de não-excedência F em uma estação de uma região são estimados por (Eq. 16):

$$\hat{Q}_i(F) = \hat{\mu}_i \hat{q}(F), i = 1, \dots, N \quad (16)$$

onde: i é o número de estações na região; e $\hat{\mu}_i$ é a média da duração dos veranicos extremos, o fator de escala particular de cada estação.

A avaliação da precisão dos quantis estimados em cada região e em cada estação que as compõe se deu por meio da raiz quadrada do erro médio (RMSE) relativo aproximado. Durante o processo de simulação, calculam-se estimativas de quantis para várias probabilidades de não-excedência. Para a estação i , a estimativa de quantil com probabilidade de não-excedência F na m -ésima repetição é $\hat{Q}_i^{[m]}(F)$. O erro relativo dessa estimativa é $\frac{\{\hat{Q}_i^{[m]}(F) - Q_i(F)\}}{Q_i(F)}$. Eleva-se essa quantidade ao quadrado e calcula-se a média sobre todas as M repetições para aproximar o RMSE relativo dos estimadores (Hosking e Wallis 1997). M é o número de regiões simuladas e, para um M grande, aproxima-se o RMSE relativo por (Eq. 17):

$$R_i(F) = \left[M^{-1} \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{\{\hat{Q}_i^{[m]}(F) - Q_i(F)\}}{Q_i(F)} \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Neste estudo, utilizou-se $M = 1,000$. Para resumir a precisão dos quantis estimados em todas as estações de uma região, calculou-se a média regional do RMSE relativo dos quantis estimados (Eq. 18):

$$R^R(F) = N^{-1} \sum_{i=1}^N R_i(F) \quad (18)$$

As medidas de precisão para a curva de crescimento regional estimada são definidas pelas Eqs. 17 e 18, mas com $Q_i(F)$ e $\hat{Q}_i^{[m]}(F)$ substituídos por $q_i(F)$ e $\hat{q}_i^{[m]}(F)$, respectivamente (Hosking e Wallis 1997).

Também, durante as simulações, calculou-se os quantis empíricos da distribuição das estimativas, dados pela razão entre os valores estimados e os observados, $\frac{\hat{Q}_i(F)}{Q_i(F)}$ para os quantis e, $\frac{\hat{q}_i(F)}{q_i(F)}$ para a curva de crescimento (Hosking e Wallis 1997). Então, com base na média desses valores, para uma dada probabilidade de não-excedência F , é possível identificar que 2.5% dos valores simulados de $\frac{\hat{Q}(F)}{Q(F)}$ estão abaixo de algum valor $I_{0.025}(F)$, enquanto 2.5% estão acima de um algum valor $S_{0.025}(F)$. Invertendo-se o intervalo $I_{0.025}(F) \leq \frac{\hat{Q}(F)}{Q(F)} \leq S_{0.025}(F)$, que contém 95% da distribuição de $\frac{\hat{Q}(F)}{Q(F)}$, obtêm-se os “limites de erro de 95%” dados por (Eq. 19):

$$\frac{\hat{Q}(F)}{S_{0.025}(F)} \leq Q(F) \leq \frac{\hat{Q}(F)}{I_{0.025}(F)} \quad (19)$$

Ademais, toda a análise de frequência regional foi realizada no software R (versão mencionada na Seção 2.2), utilizando-se os pacotes *lmomRFA* (versão 3.8) e *lmom* (versão 3.2).

2.5 Mapeamento das estimativas de veranicos extremos

A representação da distribuição espacial das estimativas de veranicos extremos, tais como a média de sua duração máxima e seus níveis de retorno para diferentes períodos, é essencial para a avaliação dos riscos de seca em todo o Maranhão. Neste estudo, foram estimados níveis de veranicos extremos para os períodos de retorno (T) de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos com base na Eq. 16. T é dado por (Eq. 20):

$$T = \frac{1}{1 - F} \quad (20)$$

onde F é a probabilidade de não-excedência na Eq. 16. T igual a 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos corresponde a F igual a 0.50, 0.80, 0.90, 0.96, 0.98 e 0.99, respectivamente.

Todas as estimativas foram interpoladas espacialmente no software SAGA (versão 9.9.0; Conrad et al. 2015) usando o algoritmo *B-Spline* multinível. Esse método utiliza uma hierarquia de redes de controle, da mais grosseira à mais fina, gerando uma sequência de funções *B-Spline* bicúbicas cuja soma se aproxima da função de interpolação desejada (para detalhes, ver Lee et al. 1997). Além disso, também se interpolou a precipitação média de cada mês da estação chuvosa, porque sua variabilidade espacial (além da temporal) é um fator importante na ocorrência de veranicos extremos (Cunningham 2020; Oliveira et al. 2021). As representações cartográficas foram elaboradas no software QGIS (versão 3.28.9; QGIS Development Team 2022).

3 Resultados

3.1 Precipitação média mensal e triagem das séries de veranicos extremos

A **Fig. 2. 2** mostra a distribuição espacial da precipitação média mensal (1994–2023) no estado do Maranhão para os meses da estação chuvosa (dezembro–maio). Em dezembro (**Fig. 2. 2a**), as regiões mais ao sul registram os maiores volumes pluviométricos, chegando a 252 mm em algumas áreas, enquanto as áreas do extremo norte apresentam os menores totais, inferiores a 30 mm. Em janeiro (**Fig. 2. 2b**), o padrão espacial se inverte: as maiores médias são observadas em porções da mesorregião Norte, atingindo valores superiores a 310 mm. A partir de fevereiro (**Fig. 2. 2c**), as maiores precipitações deslocam-se para o centro-norte do estado. Entre janeiro e abril, o estado como um todo apresenta médias superiores a 95 mm, sendo que em abril (**Fig. 2. 2e**), porções da mesorregião Norte superam 500 mm. Finalmente, em maio (**Fig. 2. 2f**), extensas regiões mais ao norte do estado mantêm médias elevadas, acima de 350 mm, enquanto no centro-sul são registrados os valores mais baixos, com mínimo de 30 mm.

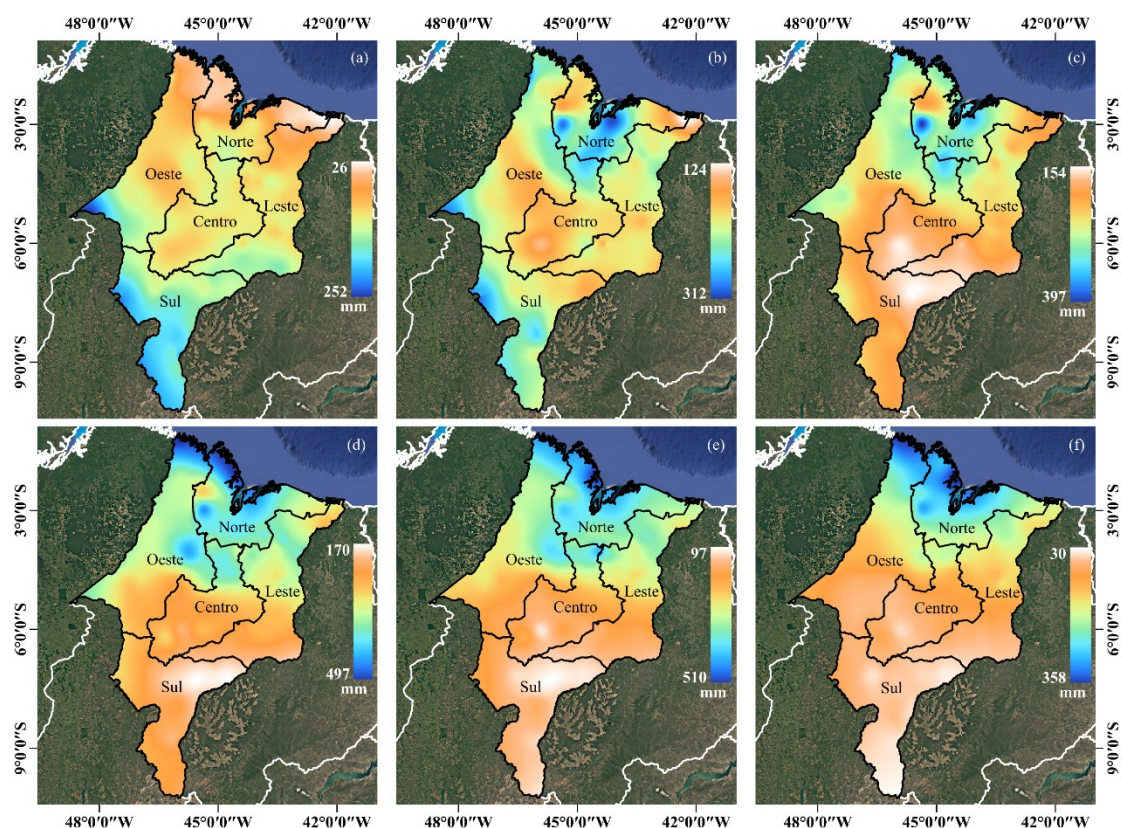


Fig. 2. 2 Distribuição espacial da precipitação média (1994-2023) para cada mês da estação chuvosa – dezembro (a), janeiro (b), ..., maio (f) – no estado do Maranhão.

Após o preenchimento dos dados faltantes de precipitação diária, identificaram-se os veranicos extremos durante a estação chuvosa no Maranhão, e as séries de cada estação foram submetidas aos testes de estacionaridade e independência serial. Os resultados do teste KPSS indicaram que a hipótese nula (H_0) de estacionaridade foi rejeitada em apenas duas das 123 estações meteorológicas. Por sua vez, o teste Ljung-Box identificou dependência serial em somente 3 estações (**Tabela H2**). Portanto, a grande maioria das estações atenderam a duas suposições chave para a análise de frequência regional (ver Hosking e Wallis 1997).

3.2 Identificação de regiões homogêneas no Maranhão

Para identificar as possíveis regiões homogêneas por meio do método *K*-means foram utilizadas as variáveis geográficas das estações (latitude, longitude e altitude) e a média da duração dos veranicos extremos. Após ajustes subjetivos no intuito de melhorar a coerência física regional e reduzir a heterogeneidade das regiões, foram identificadas cinco sub-regiões homogêneas, ilustradas na **Fig. 2. 3**. A sub-região 1 abrange principalmente a mesorregião Leste do Maranhão. A sub-região 2 ocupa grande parte da mesorregião Sul, onde estão localizadas as maiores elevações do estado (**Fig. 2. 1**) e registram-se algumas das maiores médias dos veranicos extremos. A sub-região 3 estende-se pelas mesorregiões Oeste, Centro e Norte, com pequena incursão na Leste, apresentando as menores médias de duração dos veranicos extremos. A sub-região 4 distribui-se pelas mesorregiões Oeste, Centro e Sul. Por fim, a sub-região 5 concentra-se ao norte do Maranhão, ocupando grande parte da mesorregião Norte e parte significativa da Oeste, também com elevadas médias de duração de veranicos extremos.

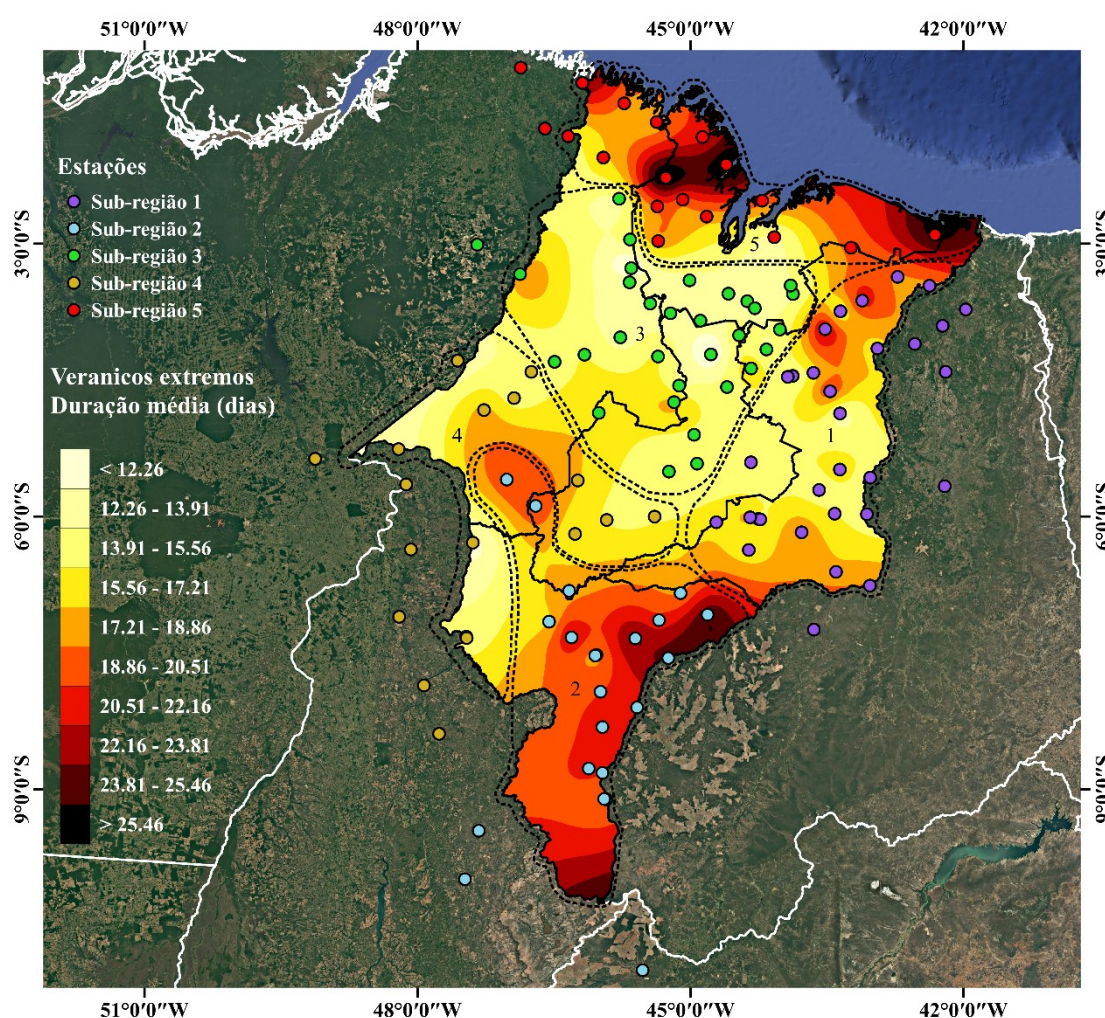


Fig. 2. 3 Divisão de cinco sub-regiões homogêneas do estado do Maranhão com base nos atributos de latitude, longitude, altitude e duração média de veranicos extremos das estações meteorológicas, via agrupamento *K*-means e ajustes subjetivos.

A Fig. 4 mostra um resumo gráfico dos valores de D_i para cada estação em cada sub-região homogênea. As estações Francisco Ayres (Id 55) e Ligação do Pará (Id 68), instaladas nos estados do Piauí e Pará, respectivamente (**Fig. 2. 1** e **Tabela H1**), foram excluídas do conjunto de dados. A primeira estação fazia

parte da sub-região 1 e a segunda da sub-região 4 (**Fig. 2. 3**). A exclusão foi justificada porque mesmo após os ajustes subjetivos, ambas apresentaram um $D_i > 3$, classificadas como “discordantes”. Na **Tabela H3** pode-se observar os valores de D_i para cada estação em cada sub-região que pertencem. No geral, das 121 estações restantes, o menor e o maior valor de D_i foram observados na sub-região 3 (**Fig. 2. 4 e Tabela H3**). Para regiões com pelo menos 15 estações, o valor crítico de D_i é 3 (Hosking e Wallis 1997). O maior valor observado de D_i foi 2.95, na estação BR-316 / Rio Paruá (Id 24, **Fig. 2. 1 e Tabela H3**).

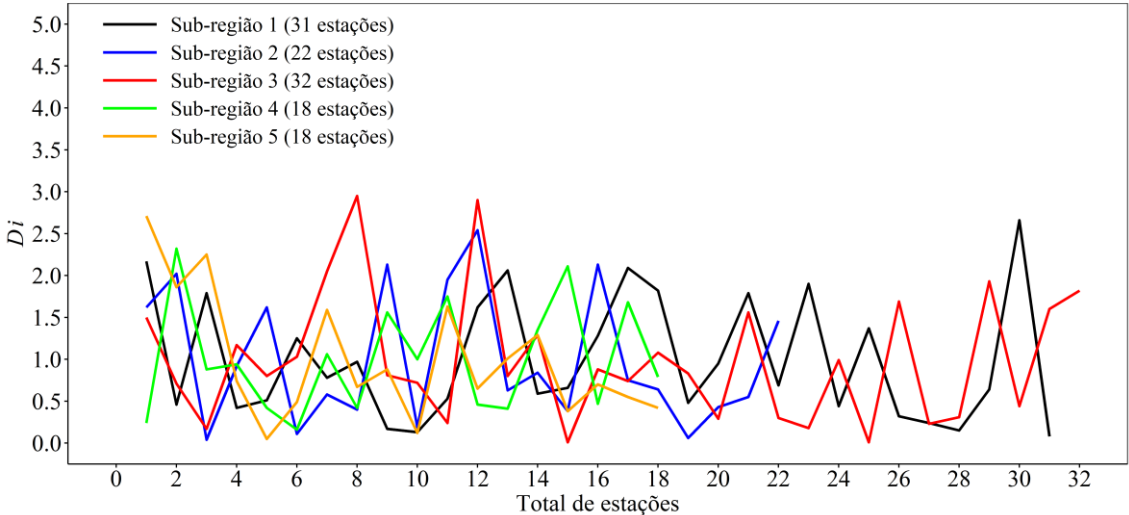


Fig. 2. 4 Valores da medida de discordância D_i das estações que compõem as cinco sub-regiões homogêneas identificadas no Maranhão.

A **Tabela 2. 1** apresenta, para cada uma das cinco sub-regiões definidas, as estatísticas descritivas dos veranicos extremos e o valor da medida de heterogeneidade (H_I). A sub-região 3, composta por 32 estações (**Fig. 2. 4**), foi a que apresentou a menor média de duração de veranicos extremos, igual a 14.04 dias, com um desvio padrão de 6.64 dias (**Tabela 2. 1**). Por outro lado, a sub-região 2 foi a que apresentou a maior média, de 21.28 dias, além de um maior desvio padrão (10.34 dias). A medida de heterogeneidade (H_I) revelou que as cinco sub-regiões foram classificadas como “aceitavelmente homogêneas” ($H_I < 1$).

Tabela 2. 1 Sub-regiões com seus totais de estações, estatísticas descritivas de veranicos extremos e valores de heterogeneidade (H_I).

Regiões	Estatísticas descritivas				Heterogeneidade
	Veranicos extremos (dias)				
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	H_I
Sub-região 1	17.05	3	62	7.53	0.45
Sub-região 2	21.28	5	69	9.20	0.64
Sub-região 3	14.04	4	73	6.64	0.40
Sub-região 4	14.65	4	47	5.98	-0.56
Sub-região 5	19.61	4	73	10.34	-1.27

As maiores durações de veranicos extremos foram identificadas nas sub-regiões 3 e 5, ambas com 73 dias consecutivos de precipitação inferior a 1 mm (**Tabela 2. 1**). Na sub-região 3, esse evento extremo foi observado na estação Fazenda Rural Zebu (Id 47; **Fig. 2. 1 e Tabela H1**), localizada no Pará, mas muito próxima à divisa com o Maranhão. Seu início se deu em 16/11/2011, com término em 11/02/2012, mas

considerou-se apenas a duração pertencente à estação chuvosa (a partir de 01/12/2012), conforme She et al. (2016). Na sub-região 5, o evento semelhante foi observado na estação Santa Helena (Id 105; **Fig. 2. 1** e **Tabela H1**), instalada na mesorregião Norte do Maranhão, durante a estação chuvosa de 2012/2013. Nesse caso, o início das chuvas foi tardio, sendo a primeira precipitação significativa – que marcou o fim do veranico extremo – registrada em 12/02/2013 (76,50 mm). Nas demais sub-regiões, os veranicos extremos observados também foram significativos, todos com potencial para iniciar ou agravar impactos derivados das secas em múltiplos setores, sobretudo nos de agricultura, recursos hídricos e ecologia.

3.3 Seleção de distribuição de probabilidade regional

Após identificar as sub-regiões homogêneas, seleciona-se a distribuição de probabilidade mais apropriada para cada região com base nos valores de Z^{DIST} e nos diagrama de momentos L. Os valores de Z^{DIST} associados às distribuições candidatas para as cinco sub-regiões estão dispostos na **Tabela 2. 2**. Em cada sub-região pelo menos duas distribuições candidatas apresentaram um $|Z^{DIST}| \leq 1.64$, indicando que ambas se ajustaram bem às séries temporais de veranicos extremos. Contudo, a distribuição selecionada foi aquela com o menor $|Z^{DIST}|$. Sendo assim, para as sub-regiões 1 e 3, a distribuição selecionada foi a GEV, enquanto para as sub-regiões 2, 4 e 5 foram a GLO, PE3 e GNO, respectivamente.

Tabela 2. 2 Valores da estatística de qualidade de ajuste, Z^{DIST} , para as cinco distribuições candidatas avaliadas em cada sub-região. Os valores em negrito indicam a distribuição de probabilidade selecionada.

Distribuição	Sub-região 1	Sub-região 2	Sub-região 3	Sub-região 4	Sub-região 5
GLO	2.20	0.80	1.20	3.67	2.71
GEV	-0.59	-1.41	-1.12	1.49	0.70
GNO	-1.42	-1.98	-2.06	0.96	-0.01
PE3	-3.05	-3.12	-3.79	-0.12	-1.36
GPA	-7.20	-6.59	-6.83	-3.59	-4.17

A **Fig. 2. 5** mostra os diagramas de razões de momentos L, L -assimetria e L -curtose, plotados para as cinco sub-regiões homogêneas identificadas (**Fig. 2. 5a–5e**). Os pontos azuis representam as razões de L -assimetria e L -curtose das estações que compõem cada região, e o ponto em vermelho representa a média regional das razões de L -assimetria e L -curtose. A **Fig. 2. 5a**, referente à sub-região 1, mostra que a distribuição GEV se ajustou melhor aos dados de veranicos extremos em comparação com as demais distribuições. A segunda distribuição mais apropriada foi a GNO, como também indicado pelos valores de Z^{DIST} (**Tabela 2. 2**). Ademais, as **Fig. 2. 5b–5e** também apontam para a seleção das mesmas distribuições para as sub-regiões 2–4, respectivamente, concordando com as conclusões contidas na **Tabela 2. 2**. Os valores de L -assimetria e L -curtose, assim como os de L -CV de cada estação em sua respectiva sub-região estão dispostos na **Tabela H3**.

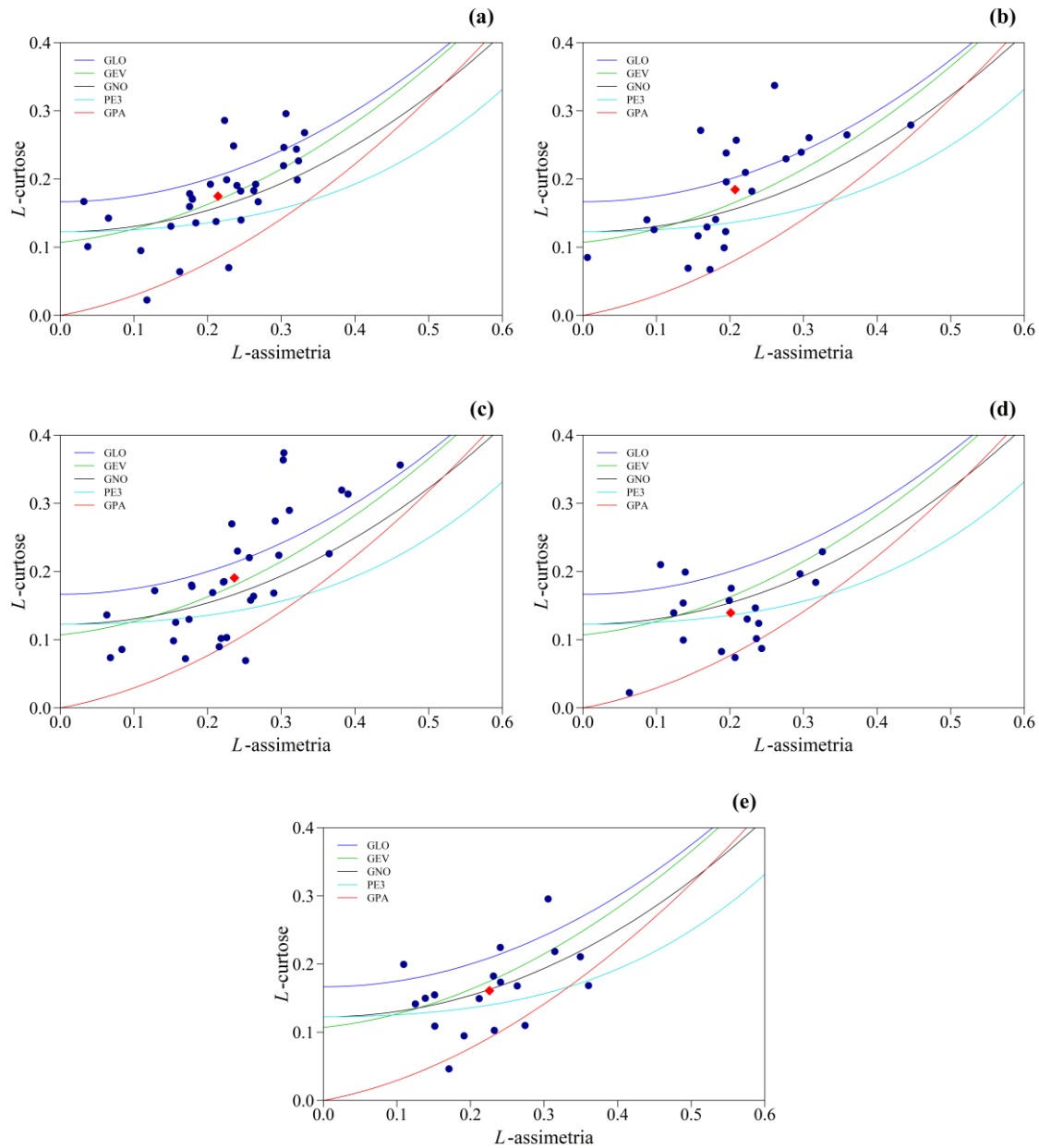


Fig. 2. 5 Diagrama da razão dos momentos L para a sub-região 1 (a), sub-região 2 (b), sub-região 3 (c), sub-região 4 (d) e sub-região 5 (e) no estado do Maranhão. Os pontos azuis e o ponto vermelho representam, respectivamente, as razões dos momentos L de cada estação e a L -assimetria e L -curtose médias regionais.

3.4 Estimativas das distribuições de probabilidade selecionadas

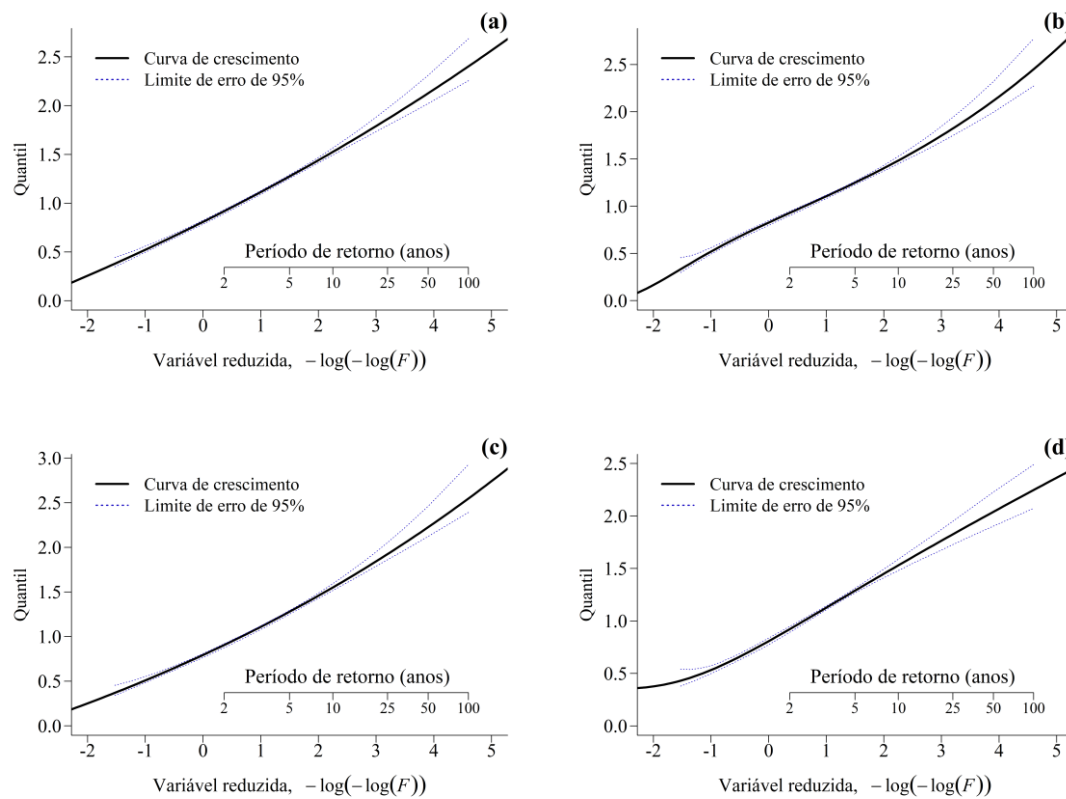
Após a seleção da distribuição de probabilidade mais apropriada para cada sub-região, seus parâmetros foram estimados usando o método dos momentos L (Hosking 1990; Hosking e Wallis 1997). Na **Tabela 2. 3** estão dispostos os valores estimados dos parâmetros de localização, escala e forma das distribuições selecionadas em cada sub-região homogênea.

Tabela 2. 3 Parâmetros de localização, escala e forma das distribuições de probabilidade selecionadas para as sub-regiões homogêneas identificadas no Maranhão, estimados pelo método dos momentos L.

Região	Distribuição	Parâmetros		
		ξ (localização)	α (escala)	κ (forma)

Sub-região 1	GEV	0.8083603	0.2953377	-0.0678974
Sub-região 2	GLO	0.9296389	0.1999394	-0.2037570
Sub-região 3	GEV	0.7941373	0.2994587	-0.1009641
Sub-região 5	GNO	0.8952502	0.4228877	-0.4686938
Região	Distribuição	μ (localização)	σ (escala)	γ (forma)
Sub-região 4	PE3	1	0.3951145	1.2130815

Estimados os parâmetros das distribuições selecionadas, calculou-se as curvas de crescimento regional por meio de suas respectivas funções quantílicas ($\hat{q}(F)$, para $0 < F < 1$, em incrementos de 0.01). A **Fig. 2. 6** apresenta essas curvas para as cinco sub-regiões, plotadas em função da variável reduzida de Gumbel ($-\log(-\log(F))$), com seus limites de erro de 95%. A análise das **Fig. 2. 6a–6e** evidencia que todas as curvas indicam um aumento consistente da magnitude (duração) dos veranicos extremos à medida que o período de retorno aumenta. Conforme esperado na análise de frequência, a incerteza associada a essa estimativa, representada pela amplitude dos limites de erro, também aumenta significativamente para os eventos mais raros (maiores períodos de retorno).



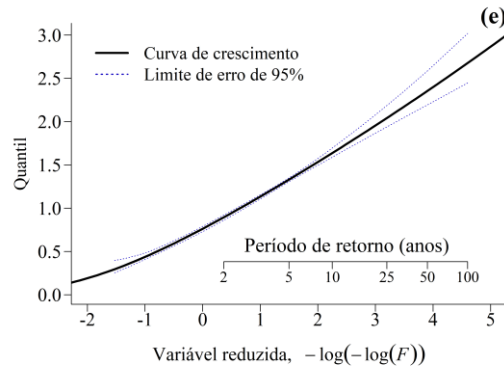


Fig. 2. 6 Curvas de crescimento regional para a sub-região 1 (a), sub-região 2 (b), sub-região 3 (c), sub-região 4 (d) e sub-região 5 (e), estimadas por meio das funções quantílicas das distribuições selecionadas para cada sub-região. Os valores no eixo x representam os períodos de retorno em forma de variável reduzida de Gumbel, enquanto no eixo y representam os quantis regionais de veranicos extremos.

Para cada estação dentro de uma sub-região, os quantis de veranicos extremos para probabilidades de não-excedência (F) entre 0.01 e 0.99 (com incremento de 0.01) foram estimados com base na respectiva curva de crescimento regional. A **Fig. 2. 7** apresenta a distribuição espacial dos veranicos extremos estimados para os períodos de retorno de 2 (**Fig. 2. 7a**), 5 (**Fig. 2. 7b**), 10 (**Fig. 2. 7c**), 25 (**Fig. 2. 7d**), 50 (**Fig. 2. 7e**) e 100 anos (**Fig. 2. 7f**), os quais correspondem às probabilidades F de 0.50, 0.80, 0.90, 0.96, 0.98 e 0.99, respectivamente. Como a estimativa foi obtida ao se multiplicar a curva de crescimento regional (adimensional) pela média local (o fator de escala), os padrões espaciais nas **Fig. 2. 7a–7f** estão diretamente relacionados à distribuição das médias apresentada na **Fig. 2. 3**.

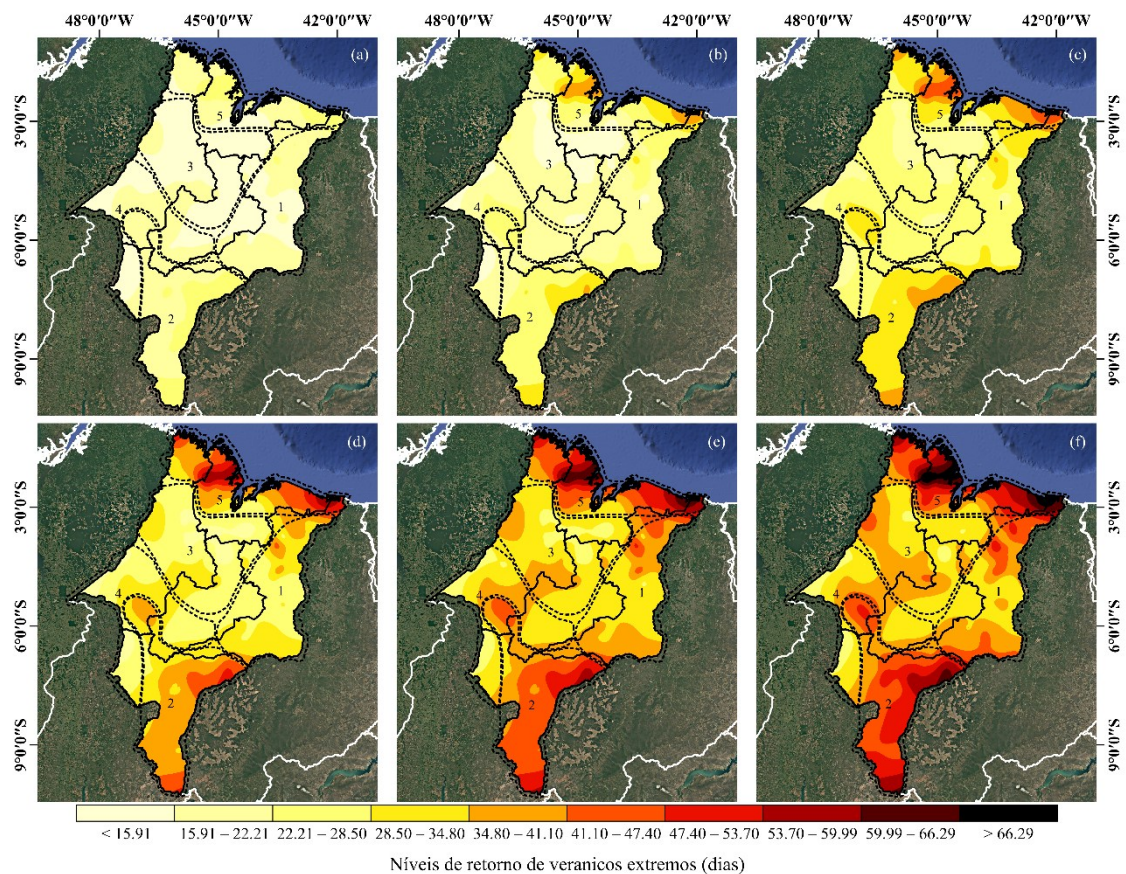


Fig. 2. 7 Distribuição espacial dos quantis de veranicos extremos durante a estação chuvosa no Maranhão, para os períodos de retorno (T) de 2 (a), 5 (b), 10 (c), 25 (d), 50 (e) e 100 anos (f), associados às probabilidades de não-excedência F de 0.50, 0.80, 0.90, 0.96, 0.98 e 0.99, respectivamente.

Pode-se observar que os veranicos mais extremos durante a estação chuvosa no Maranhão são esperados nas regiões localizadas nos extremos sul e norte do estado, com destaque para as sub-regiões 2 e 5. Para o período de retorno de dois anos (**Fig. 2. 7a**), nessas sub-regiões, estimam-se veranicos extremos entre 22.21 e 28.50 dias, com 50% de probabilidade de serem excedidos a cada ano. Para o período de retorno de cinco anos (**Fig. 2. 7b**), em porções da sub-região 5 e em uma menor porção da sub-região 2, os veranicos extremos têm 20% de probabilidade de igualar ou superar a faixa de 34.80 a 41.10 dias. Ademais, como esperado, à medida que o período de retorno aumenta, cresce também a magnitude ou severidade dos eventos extremos de seca, que se distribuem por áreas mais extensas do Maranhão, embora apresentem menor probabilidade de excedência e maior grau de incerteza.

3.5 Avaliação da precisão dos quantis estimados

Utilizando simulações de Monte Carlo, cada sub-região foi simulada mil vezes para valores de F entre 0.01 e 0.99 (em incrementos de 0.01). Foram então calculadas duas medidas de precisão para as estimativas de quantis regionais e em cada estação: o RMSE relativo aproximado (Eq. 17) e o limite de erro de 95% (Eq. 19). A **Fig. 2. 8** resume a precisão das estimativas apresentando as médias do RMSE e do limite de erro, obtidas a partir do conjunto de estações de cada sub-região. A figura também exibe o RMSE regional, relativo à curva de crescimento (**Fig. 2. 6**), calculado ao combinar os dados de todas as estações da sub-região em uma única série temporal.

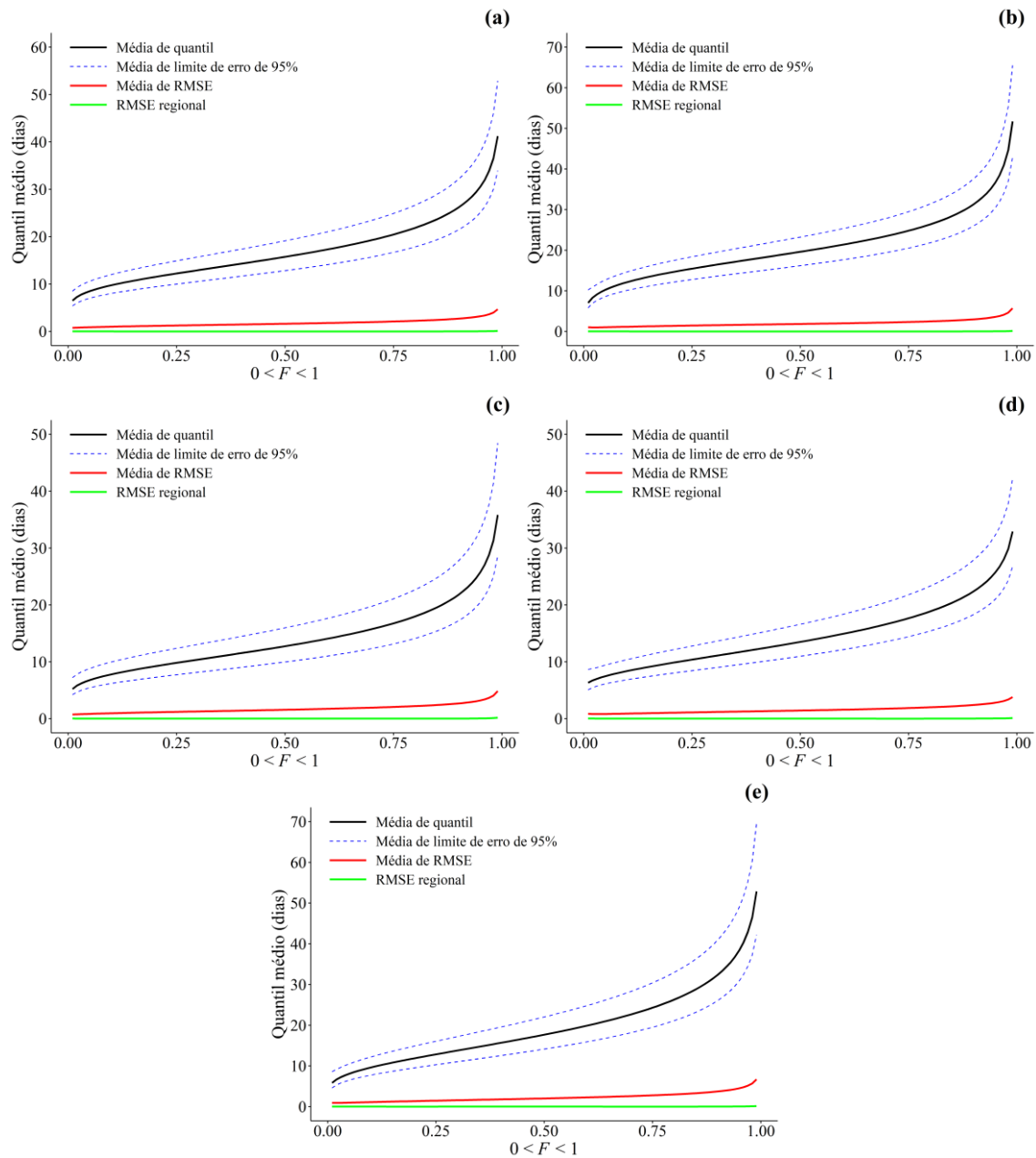


Fig. 2. 8 Medidas de precisão das estimativas de quantis de períodos máximos de seca para a sub-região 1 (a), sub-região 2 (b), sub-região 3 (c), sub-região 4 (d) e sub-região 5 (e). As probabilidades de não-excedência F consideradas foram: $0.01 \leq F \leq 0.99$, em incrementos de 0.01.

Nota-se que a média do RMSE em todas as sub-regiões (1–5, **Fig. 2. 8a–8e**) é relativamente baixa, principalmente para valores menores de F , conforme esperado. Por sua vez, os limites de erro de 95% em cada sub-região não apresentaram grandes amplitudes, embora aumentem com o valor de F . O fato de o RMSE regional ser inferior à média das estações é um resultado esperado, uma vez que ele é calculado a partir de uma série temporal significativamente mais longa. No geral, as estimativas de quantis apresentaram boa precisão, tornando os resultados confiáveis.

4 Discussão

4.1 Análise preliminar das séries de veranicos extremos

Os testes KPSS e Ljung-Box revelaram que a grande maioria das séries temporais atenderam às suposições de estacionaridade e independência serial, respectivamente. Analisando a frequência regional de eventos extremos de seca na Planície de Loess, China, Li et al. (2022) também constataram por meio do teste KPSS que a maioria das séries em grade eram estacionárias. Núñez et al. (2011) analisaram a frequência regional de eventos de seca no centro-norte do Chile e identificaram que 94% e 99% das estações continham séries estacionárias e independentes, respectivamente.

Com base nos resultados obtidos por Landwehr et al. (1979) e Srikanthan e McMahon (1981), Hosking e Wallis (1997) concluem que uma pequena quantidade de dependência serial em séries de dados anuais tem pouco efeito na qualidade das estimativas de quantis. No entanto, os autores enfatizam que, se muitas séries com tendências, variações periódicas ou dependência serial forem identificadas, abordagens alternativas à análise de frequência regional devem ser empregadas. Essa situação, no entanto, não foi verificada no presente estudo, indicando, por exemplo, que as estimativas dos parâmetros e quantis das distribuições são não enviesadas.

4.2 Sub-regiões homogêneas

A medida de heterogeneidade indicou que média de duração dos veranicos extremos, em conjunto com os atributos de latitude, longitude e altitude das estações meteorológicas se mostraram suficientes para a identificação de sub-regiões homogêneas no estado do Maranhão. She et al. (2016) também usaram essas variáveis como entrada, e identificaram quatro sub-regiões homogêneas na Bacia do Rio Wei, China. Em estudos ambientais como o presente, Hosking e Wallis (1997) enfatizam que os atributos geográficos das estações ou locais de observação, em conjunto com estatísticas da variável de interesse é uma prática recomendada para a identificação prévia de sub-regiões.

Neste estudo, as sub-regiões 2 e 5, identificadas, respectivamente, nas regiões sul e norte do Maranhão, apresentaram as maiores médias de veranicos extremos durante a estação chuvosa. Isto possivelmente se deve, em parte, à variação de início e término da estação chuvosa no estado. Nas regiões mais ao sul do Maranhão, durante o mês de dezembro (início da estação chuvosa), geralmente as chuvas são mais consistentes do que nas regiões mais ao norte. Por outro lado, no mês de maio (fim da estação chuvosa) esse cenário se investe. Assim, no mês de dezembro (maio) as chances de veranicos extremos são maiores nas regiões mais ao norte (sul) do Maranhão, o que pode ter contribuído para as maiores médias observadas nessas regiões.

Além disso, as regiões localizadas mais ao sul-sudeste do Maranhão apresentam menores médias pluviométricas e maior variabilidade espaço-temporal das chuvas, que contribuem para uma maior ocorrência de veranicos durante a estação chuvosa (Menezes 2009). Isto está relacionado com a junção de fatores como continentalidade, relevo mais complexo, vegetação (savanas) e a transitoriedade dos sistemas atmosféricos que atuam nessas regiões (Menezes 2009). Estes sistemas incluem as Frentes Frias, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (Ferreira e Mello 2005; Menezes 2009), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs; Alves et al. 2006) e os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs; Lyra et al. 2020, 2022, 2024).

Por sua vez, as demais regiões do Maranhão, principalmente no centro-norte, além de apresentarem características distintas de continentalidade, relevo e vegetação, contam com a forte influência da Zona de

Convergência Intertropical (ZCIT; Novais e Machado 2023). A combinação desses fatores contribui para maiores médias pluviométricas e menor variabilidade espaço-temporal das chuvas. Contudo, o período de atuação mais consistente da ZCIT no estado é restrito, geralmente entre fevereiro e abril (IMESC 2022). Nos demais meses da estação chuvosa, a precipitação passa a ser dominada por sistemas atmosféricos mais transitórios, como as brisas terra-mar, as linhas de instabilidade (Ferreira e Mello 2005), os VCANs (Alves et al. 2006) e os CCMs (Lyra et al. 2020, 2022, 2024). Essa transitoriedade eleva a probabilidade de ocorrência de veranicos. Ademais, a distribuição das chuvas no estado é significativamente modulada pelas fases do El Niño-Oscilação Sul e pelas anomalias de temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico Tropical, que, dependendo de sua configuração, podem intensificar esses períodos de seca, acarretando em eventos extremos durante a estação chuvosa (Reboita e Santos 2014).

4.3 Distribuição de probabilidade apropriada

Tanto a estatística Z^{DIST} quanto os diagramas de razões de momentos L convergiram para a seleção das distribuições de probabilidade em cada sub-região homogênea identificada. Além disso, os diagramas permitem visualizar a variabilidade das razões de L -assimetria e L -curtose entre as estações de cada sub-região. Essa abordagem tem sido amplamente utilizada e mostrado ser eficaz para a seleção de distribuições apropriadas em análise de frequência regional, a exemplo de She et al. (2016), Abdi et al. (2017), Kaluba et al. (2017), Adib e Marashi (2019), Ullah et al. (2020), Li et al. (2022), Anli et al. (2023), Aktürk et al. (2024). Hosking e Wallis (1997) e Peel et al. (2001) enfatizam que a seleção de distribuições apropriadas deve sempre se basear em um método gráfico e em uma medida de bondade de ajuste.

4.4 Qualidade das estimativas

O limite de erro de 95% e o RMSE relativo aproximado indicaram que as distribuições selecionadas para cada sub-região foram precisas na estimativa de quantis regionais e em cada estação. Essas medidas são essenciais para avaliar a confiabilidade das estimativas (Hosking e Wallis 1997). A distribuição espacial dos quantis de veranicos extremos mostrou que as regiões mais críticas – extremo norte e sul-sudeste do Maranhão – podem apresentar secas com duração ≥ 22 –29 dias para um período de retorno de 2 anos. Como esperado, a severidade da seca durante a estação chuvosa aumenta com o período de retorno. Para períodos de retorno mais longos (i.e., menores probabilidades anuais de excedência), grande parte do estado pode registrar veranicos extremos na faixa de 29–35 dias ou superiores (≥ 35 –41 dias). Nas áreas mais críticas, esses valores podem atingir ou exceder as faixas de 41–47 dias e 47–53 dias.

4.5 Desafios para a resiliência climática no Maranhão

Este estudo revela, pela primeira vez, os níveis extremos de veranicos durante a estação chuvosa que o Maranhão enfrenta e poderá enfrentar no futuro. Entender os padrões de frequência de veranicos extremos numa época em que se esperam chuvas bem distribuídas no espaço e no tempo é fundamental, pois os seus impactos afetam inúmeros setores-chave, como os de agricultura, recursos hídricos, ecológico, energético, saúde e meio ambiente.

A maior parte do Maranhão está inserida na fronteira agrícola do MATOPIBA (Daltio et al. 2016), onde a exploração de *commodities* como soja e milho é predominante, do centro-sul ao leste-nordeste do estado

(IBGE 2024). No entanto, essa produção ocorre majoritariamente em sistemas de sequeiro (IBGE 2019b), tornando-a totalmente dependente das chuvas. Durante a estação chuvosa, períodos prolongados de déficit de precipitação – geralmente acompanhados de altas temperaturas e evapotranspiração potencial e abrange grandes áreas (Van Loon 2015) – fazem com que o solo perca umidade rapidamente (Yuan et al. 2019; Christian et al. 2021; Walker et al. 2024). Quando esses déficits hídricos coincidem com os estágios fenológicos mais sensíveis das culturas, os impactos no desenvolvimento e na produtividade podem ser severos, resultando em perdas agrícolas e socioeconômicas substanciais (Christian et al. 2021; Walker et al. 2024; Lovino et al. 2025; Shi et al. 2025). De acordo com Farias et al. (2007), as fases de desenvolvimento da soja mais sensíveis ao déficit hídrico são a germinação-emergência e a floração-enchimento de grãos. Já para o milho, a fase de floração é a mais crítica sob estresse hídrico (Carvalho et al. 2000; Bergamaschi et al. 2006).

O tipo de seca acima é muitas vezes denominado como “seca repentina” – ver Lisonbee et al. (2022) para detalhes –, comumente conhecido no Brasil como “veranico” (Walker e Van Loon 2023; Walker et al. 2024). Estudos como os de Christian et al. (2023) e Yuan et al. (2023) mostram que as mudanças climáticas antropogênicas podem provocar um aumento do risco e intensificação de secas repentinas em diversas regiões do mundo – incluindo o NEB (Yuan et al. 2023). Em um estudo de abrangência global, Shi et al. (2025) descobriram que: as secas repentinas provocaram maiores perdas nas colheitas do que secas lentas convencionais em todos os sistemas agrícolas; sistemas de sequeiro apresentaram maior vulnerabilidade a secas repentinas do que áreas irrigadas; e, áreas irrigadas por água subterrânea apresentaram maior resiliência do que áreas irrigadas por água de superfície sob déficits hídricos extremos.

Adicionalmente, a rápida secagem do solo também favorece condições ideais para ondas de calor (Yuan et al. 2023), que, por sua vez, reduzem significativamente a produtividade dos ecossistemas (Zhang e Yuan 2020; Gu et al. 2025), favorecem a ocorrência de incêndios florestais (Christian et al. 2020; Hunt et al. 2020; Rakkasagi e Goyal 2025) e podem evoluir para secas prolongadas (Yuan et al. 2019; Gonçalves et al. 2025). Christian et al. (2024) ressaltam muitos outros fenômenos ou impactos em cascata que podem decorrer das secas repentinas.

Quanto aos recursos hídricos, o estado do Maranhão conta com sete bacias hidrográficas de domínio estadual, três de domínio federal e dois sistemas hidrográficos em suas regiões litorâneas (NUGEO 2016). Períodos extremos de seca durante a estação chuvosa possuem potencial para desencadear secas hidrológicas, devido à redução da recarga dos aquíferos e da vazão dos rios. Como destaca Van Loon (2015), em climas sazonais quentes a maior parte da recarga ocorre justamente na estação chuvosa; assim, uma seca neste período diminui o armazenamento de água e pode agravar as condições na estação seca subsequente. Neste período, a evapotranspiração geralmente supera a precipitação, propiciando o desenvolvimento da seca. Este fenômeno específico é denominado por Van Loon e Van Lanen (2012) como “seca da estação chuvosa para a estação seca”, tendo sido identificado por Van Loon et al. (2014) principalmente em climas mediterrâneos, de savana e de monções – inclusive no Maranhão. Seus impactos podem ser sentidos na agricultura irrigada, nos ecossistemas aquáticos, na distribuição de energia hidrelétrica, na navegação, na disponibilidade de água potável, recreação (Van Loon 2015), pesca, caça ou observação de vida selvagem (Christian et al. 2024).

Portanto, diante do exposto, o presente estudo pode ser uma base científica para o desenvolvimento de medidas estratégicas no Maranhão que reduzam ou evitem os impactos derivados dos eventos extremos de seca durante a estação chuvosa nos mais variados setores. Algumas dessas medidas envolvem, por exemplo, a adoção de sistemas agrícolas conservacionistas, tais como o plantio direto, a retenção de resíduos, a rotação de culturas e a integração lavoura-pecuária-floresta (Kassam et al. 2022), além do monitoramento da seca em menores escalas temporais e espaciais (Yuan et al. 2023).

5 Conclusão

Este estudo investigou a frequência de veranicos extremos durante a estação chuvosa no estado do Maranhão por meio de uma análise de frequência regional baseada no método dos momentos L. Foram identificadas cinco sub-regiões homogêneas ($H_I < 1$), nas quais as estações possuem séries temporais de veranicos extremos com distribuições de frequência aproximadamente idênticas, exceto por um fator de escala. Consequentemente, as séries de cada sub-região podem ser modeladas por uma mesma distribuição de probabilidade.

Com base nos resultados de qualidade de ajuste (Z^{DIST}) e diagramas de razões de momentos L, a distribuição de probabilidade mais apropriada para cada sub-região foi: GEV para as sub-regiões 1 (leste do Maranhão) e 3 (centro-oeste); GLO para a sub-região 2 (sul e porções do sudoeste); PE3 para a 4 (sudoeste, estendendo-se em direção ao centro-sul); e GNO para a 5 (norte, abrangendo áreas litorâneas).

As sub-regiões 2 e 5 são as mais suscetíveis à ocorrência de veranicos extremos durante a estação chuvosa no Maranhão. O limite de erro de 95% e o RMSE relativo aproximado indicaram que as distribuições selecionadas apresentaram boa precisão na estimativa de quantis regionais e por estação para diferentes períodos de retorno.

Recomendação

Recomenda-se, para estudos futuros, uma análise de frequência regional pelo método dos momentos L para avaliar a recorrência de veranicos extremos em cada mês da estação chuvosa no Maranhão. Um estudo nessa escala mensal poderá oferecer subsídios valiosos para o entendimento dos extremos de seca subsazonais (ou submensais) no estado.

Referências

- Abdi A, Hassanzadeh Y, Talatahari S, Fakheri-Fard A, Mirabbasi R (2017) Regional drought frequency analysis using L-moments and adjusted charged system search. *Journal of Hydroinformatics* 19:426–442. <https://doi.org/10.2166/hydro.2016.228>
- Adib A, Marashi SS (2019) Meteorological drought monitoring and preparation of long-term and short-term drought zoning maps using regional frequency analysis and L-moment in the Khuzestan province of Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 137:77–87. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2572-8>
- Aktürk G, Çitakoglu H, Demir V, Beden N (2024) Meteorological drought analysis and regional frequency analysis in the Kızılırmak Basin: creating a framework for sustainable water resources management. *Water* 16:2124. <https://doi.org/10.3390/w16152124>
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM (2013b) Modeling monthly mean air temperature for Brazil. *Theoretical and Applied Climatology* 113:407–427. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0796-6>
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G (2013a) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22:711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Alves JMB, Ferreira FF, Campos JNB, Souza Filho FA, Souza EB, Duran BJ, Servain J, Studart TMC (2006) Mecanismos atmosféricos associados à ocorrência de precipitação intensa sobre o nordeste do Brasil durante janeiro/2004. *Revista Brasileira de Meteorologia* 21:56–76. <https://www.researchgate.net/publication/282171606>

- Anli AS, Modarres R, Apaydin H (2023) A hybrid approach for regional low-flow frequency analysis for the Upper Tigris and Euphrates Basin. *Journal of Hydrologic Engineering* 28:04023015. <https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-5698>
- Aparecido LEO, Meneses KC, Lorençone PA, Lorençone JA, Moraes JRSC, Rolim GS (2023) Climate classification by Thornthwaite (1948) humidity index in future scenarios for Maranhão State, Brazil. *Environment, Development and Sustainability* 25:855–878. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02082-9>
- Baratto PFB, Cecílio RA, Teixeira DBS, Zanetti SS, Xavier AC (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>
- Bergamaschi H, Dalmago GA, Comiran F, Bergonci JJ, Müller AG, França S, Santos AO, Radin B, Bianchi CAM, Pereira PG (2006) Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41:243–249. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000200008>
- Carvalho DF, Faria RA, Sousa SAV, Borges HQ (2000) Espacialização do período de veranico para diferentes níveis de perda de produção na cultura do milho, na bacia do Rio Verde Grande, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 4:172–176. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000200007>
- Christian JJ, Basara JB, Hunt ED, Otkin JA, Furtado JC, Mishra V, Xiao X, Randall RM (2021) Global distribution, trends, and drivers of flash drought occurrence. *Nature Communications* 12:6330. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26692-z>
- Christian JJ, Basara JB, Hunt ED, Otkin JA, Xiao X (2020) Flash drought development and cascading impacts associated with the 2010 Russian heatwave. *Environmental Research Letters* 15:094078. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9faf>
- Christian JJ, Hobbins M, Hoell A, Otkin JA, Ford TW, Cravens AE, Powlen KA, Wang H, Mishra V (2024) Flash drought: A state of the science review. *WIREs Water* 11: e1714. <https://doi.org/10.1002/wat2.1714>
- Christian JJ, Martin ER, Basara JB, Furtado JC, Otkin JA, Lowman LEL, Hunt ED, Mishra V, Xiao X (2023) Global projections of flash drought show increased risk in a warming climate. *Communications Earth & Environment* 4:165. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00826-1>
- Conrad O, Bechtel B, Bock M, Dietrich H, Fischer E, Gerlitz L, Wehberg J, Wichmann V, Böhner J (2015) System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development* 8:1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Corrêa W, Carvalho MWL, Mendes TJ (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>
- Cunningham C (2020) Characterization of dry spells in Southeastern Brazil during the monsoon season. *International Journal of Climatology* 40:4609–4621. <https://doi.org/10.1002/joc.6478>
- Daltio J, Martinho PRR, Magalhães LA (2016) Geoweb Matopiba: manual do usuário. Embrapa Territorial, Comunicado Técnico 38. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19404.51840>
- Farias JRB, Nepomuceno AL, Neumaier N (2007) Ecofisiologia da soja. Embrapa Soja, Londrina-PR, Circular Técnica 48. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/470308>
- Ferreira AG, Mello NGS (2005) Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia* 1:15–28. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>
- Furtado TMS, Assad LPF, Parise CK, Vasconcellos FC, Sancho L, Carpenedo BC, Barbosa WL, Soares LAM (2025) Variability of the Atlantic Niño: Impacts on precipitation in the state of Maranhão, Brazil. *Atmósfera* 39:225–246. <https://doi.org/10.20937/ATM.53393>
- Gonçalves STN, Vasconcelos Júnior FC, Silveira CS, Costa JMF, Marcos Junior AD (2025) Occurrence of flash drought in reservoirs in the semi-arid area of the Ceará State, Brazil. *Journal of Arid Land* 17:865–887. <https://doi.org/10.1007/s40333-025-0020-z>
- Greenwood JA, Landwehr JM, Matalas NC, Wallis JR (1979) Probability Weighted Moments: Definition and Relation to Parameters of Several Distributions Expressible in Inverse Form. *Water Resources Research* 15:1049–1054. <https://doi.org/10.1029/WR015i005p01049>
- Gu L, Yin J, Schumacher DL, Sippel S, Fischer EM, Chen J, Liu P, Slater LJ, Knutti R (2025) Flash drought impacts on global ecosystems amplified by extreme heat. *Nature Geoscience* 18:709–715. <https://doi.org/10.1038/s41561-025-01719-y>
- Hartigan A, Wong MA (1979) Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society Series C (Applied Statistics)* 28:100–108. <https://doi.org/10.2307/2346830>
- Hosking JRM (1990) L-moments: Analysis and Estimation of Distributions using Linear Combinations of Order Statistics. *Journal of the Royal Statistical Society Series B* 52:105–124. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1990.tb01775.x>
- Hosking JRM, Wallis JR (1993) Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water Resources Research* 29:271–281. <https://doi.org/10.1029/92WR01980>
- Hosking JRM, Wallis JR (1997) Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge University Press
- Hunt ED, Christian JJ, Basara JB, Lowman L, Otkin JA, Bell J, Jarecke K, Wakefield RA, Randall RM (2020) The flash drought of 1936. *Journal of Applied and Service Climatology* 2020:004. <https://doi.org/10.46275/JOASC.2020.11.001>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019a) Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil. 45, Séries Relatórios Metodológicos. <https://www.ibge.gov.br/apps/biomas/#/home/>

- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019b) Censo agropecuário 2017: Resultados definitivos. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=73096>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022) Mapas. <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023) Cidades e estados. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ma.html>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2024) Produção Agrícola Municipal 2023. Rio de Janeiro: IBGE. <https://cidades.ibge.gov.br/>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2025) Renda domiciliar per capita. Rio de Janeiro: IBGE. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=73100>
- IMESC - Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (2022) Boletim Climático do Maranhão. 1. São Luís: IMESC. pp 62. <https://imesc.ma.gov.br/boletim-climatico-2021-v-1-n-3-out-dez/>
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Team, C.W., Lee, H., Romero, J. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp 184. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Kaluba P, Verbist KMJ, Cornelis WM, Van Ranst E (2017) Spatial mapping of drought in Zambia using regional frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal* 62:1825–1839. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1343475>
- Kassam A, Friedrich T, Derpsch R (2022) Successful Experiences and Lessons from Conservation Agriculture Worldwide. *Agronomy* 12:769. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040769>
- Kwiatkowski D, Phillips PCB, Schmidt P, Shin Y (1992) Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: how sure are we that economic time series have a unit root? *Journal of Econometrics* 54:159–178. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(92\)90104-Y](https://doi.org/10.1016/0304-4076(92)90104-Y)
- Landwehr JM, Matalas NC, Wallis JR (1979) Probability weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel Parameters and quantiles. *Water Resources Research* 15:1055–1064. <https://doi.org/10.1029/WR015i005p01055>
- Lee S, Wolberg G, Shin SY (1997) Scattered data interpolation with multilevel B-Splines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 3:228–244. <https://doi.org/10.1109/2945.620490>
- Li M, Liu M, Cao F, Wang G, Chai X, Zhang L (2022) Application of L-moment method for regional frequency analysis of meteorological drought across the Loess Plateau, China. *PLOS ONE* 17:e0273975. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273975>
- Lisonbee J, Woloszyn M, Skumanich (2022) Making sense of flash drought: definitions, indicators, and where we go from here. *Journal of Applied and Service Climatology* 2021. <https://doi.org/10.46275/JOASC.2021.02.001>
- Ljung GM, Box GEP (1978) On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika* 65:297–303. <https://doi.org/10.1093/biomet/65.2.297>
- Lombe P, Carvalho E, Rosa-Santos P (2024) Drought Dynamics in Sub-Saharan Africa: Impacts and Adaptation Strategies. *Sustainability* 16:9902. <https://doi.org/10.3390/su16229902>
- Lyra GB, Correia TP, Oliveira Júnior JF, Zeri M (2018) Evaluation of methods of spatial interpolation for monthly rainfall data over the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology* 134:955–965. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2322-3>
- Lyra MJA, Fedorova N, Levit V (2022) Mesoscale convective complexes over northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 118:103911. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103911>
- Lyra MJA, Fedorova N, Levit V, Freitas IGF (2020) Características dos Complexos Convectivos de Mesoescala no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia* 35:727–734. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786355000001>
- Lyra MJA, Santiago DB, Nobre JPG (2024) Análise sinótica e termodinâmica dos complexos convectivos de mesoescala no nordeste Brasileiro em 2017. *Revista Brasileira de Geografia Física* 17:2190–2203. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.4.p2190-2203>
- Maconga CW (2023) Arid fields where conflict grows: How drought drives extremist violence in Sub-Saharan Africa. *World Development Perspectives* 29:100472. <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2022.100472>
- Menezes RHN (2009) Caracterização agroclimática e análise do rendimento agrícola do Estado do Maranhão, Brasil. Tese, Universidade Federal de Campina Grande. <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2084>
- NASA JPL (2013) NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL1.003>
- Nascimento FCA, Braga CC, Araújo FRCD (2017) Análise estatística dos eventos secos e chuvosos de precipitação no Estado do Maranhão. *Revista Brasileira de Meteorologia* 32:375–386. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863230005>
- Novais GT, Machado LA (2023) Os climas do Brasil: segundo a classificação climática de Novais. *Revista Brasileira de Climatologia* 32:1–39. <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16163>
- NUGEO – Núcleo Geoambiental (2016) Bacias hidrográficas e climatologia no Maranhão. Universidade Estadual do Maranhão
- Núñez JH, Verbist K, Wallis JR, Schaefer MG, Morales L, Cornelis WM (2011) Regional frequency analysis for mapping drought events in north-central Chile. *Water center for arid and semiarid zones of Latin America and the Caribbean. Journal of Hydrology* 405:352–366. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.035>

- Oliveira BCC, Oliveira Júnior JF, Pereira CR, Sobral BS, Gois G, Lyra GB, Machado EM, Correia Filho WLF, Souza A (2021) Spatiotemporal variation of dry spells in the State of Rio de Janeiro: Geospatialization and multivariate analysis. *Atmospheric Research* 257:105612. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105612>
- Otkin JA, Svoboda M, Hunt ED (2018) Flash droughts: A review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 99:911–919. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0149.1>
- Peel MC, Wang QJ, Vogel RM, McMahon TA (2001) The utility of L-moment ratio diagrams for selecting a regional probability distribution. *Hydrological Sciences Journal* 46:147–155. <https://doi.org/10.1080/02626660109492806>
- QGIS Development Team (2022) QGIS Geographic Information System (Versão 3.28.9). Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.org>
- R Core Team (2024) R: A language and environment for statistical computing (Versão 4.4.1). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Rakkasagi S, Goyal MK (2025) Are rapid onset drying events escalating forest fires across India's ecoregions? *Environmental Research Letters* 20:064004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/add1f5>
- Reboita MS, Santos IA (2014) Influência de alguns padrões de teleconexão na precipitação no Norte e Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira De Climatologia* 15:28-48. <https://doi.org/10.5380/abclima.v15i0.37686>
- Rhein S, Jansesberger V (2024) Does drought exposure erode trust in the political system in Sub-Saharan Africa? *Climatic Change* 177:114. <https://doi.org/10.1007/s10584-024-03768-5>
- Rubin DB (1996) Multiple Imputation after 18+ Years. *Journal of the American Statistical Association* 91:473–489. <https://doi.org/10.2307/2291635>
- She D, Xia J, Zhang Y, Shan L (2016) Regional frequency analysis of extreme dry spells during rainy season in the Wei River Basin, China. *Advances in Meteorology Special Issue*. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6427568>
- Shi R, Liu Y, Zhu Y, Ren L, Liu Y, Zhang X, Zhang L (2025) Impact of flash droughts on global crop yields considering crop phenology and irrigation conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 373:110763. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110763>
- Soares LAM, Parise CK, Machado AMB, Carpenedo CB, Furtado TMS, Barreto HN, Lima LG, Sousa HLS (2023) Influences of strong and moderate ENSO events on the Maranhão precipitation from the western equatorial Atlantic SST anomalies. *Ocean and Coastal Research* 71:e23043. <http://doi.org/10.1590/2675-2824072.22057lams>
- Srikanthan R, McMahon TA (1981) Log Pearson type 3 distribution – effect of dependence, distribution parameters and sample size on peak annual flood estimates. *Journal of Hydrology* 52:149-159. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(81\)90101-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(81)90101-3)
- Svoboda M, LeComte D, Hayes M, Heim R, Gleason K, Angel J, Rippey B, Tinker R, Palecki M, Stooksbury D, Miskus D, Stephens S (2002) The Drought Monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83:1181–1190. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1181>
- Ullah H, Akbar M, Khan F (2020) Droughts' projections in homogeneous climatic regions using Standardized Precipitation Index in Pakistan. *Theoretical and Applied Climatology* 140:787-803. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03109-3>
- Unfried K, Kis-Katos K, Poser T (2022) Water scarcity and social conflict. *Journal of Environmental Economics and Management* 113:102633. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102633>
- van Buuren S (2012) Flexible Imputation of Missing Data. 1 Ed. New York, Chapman and Hall/CRC, pp 342. <https://doi.org/10.1201/b11826>
- van Buuren S, Brand JPL, Groothuis-Oudshoorn CGM, Rubin DB (2006) Fully conditional specification in multivariate imputation. *Journal of Statistical Computation and Simulation* 76:1049-1064. <https://doi.org/10.1080/10629360600810434>
- van Buuren S, Groothuis-Oudshoorn K (2011) mice: Multivariate Imputation by Chained Equations in R. *Journal of Statistical Software* 45:1-67. <https://doi.org/10.18637/jss.v045.i03>
- Van Loon AF (2015) Hydrological drought explained. *WIREs Water* 2:359-392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>
- Van Loon AF, Tiedeman E, Wanders N, Van Lanen HAJ, Teuling AJ, Uijlenhoet R (2014) How climate seasonality modifies drought duration and deficit. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119:4640-4656. <https://doi.org/10.1002/2013JD020383>
- Van Loon AF, Van Lanen HAJ (2012) A process-based typology of hydrological drought. *Hydrology and Earth System Sciences* 16:1915-1946. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1915-2012>
- Walker DW, Van Loon AF (2023) Droughts are coming on faster. *Science* 380:130-132. <https://doi.org/10.1126/science.adh3097>
- Walker DW, Vergopolan N, Cavalcante L, Smith KH, Agoungbome SMD, Almagro A, Apurv T, Dahal NM, Hoffmann D, Singh V, Xiang Z (2024) Flash drought typologies and societal impacts: a worldwide review of occurrence, nomenclature, and experiences of local populations. *Weather, Climate, and Society* 16:3-28. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-23-0015.1>
- Yuan X, Wang P, Wu P, Ji P, Sheffield J, Zhang M (2019) Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China. *Nature Communications* 10:4661. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12692-7>
- Yuan X, Wang Y, Ji P, Wu P, Sheffield J, Otkin JA (2023) A global transition to flash droughts under climate change. *Science* 380:187-191. <https://doi.org/10.1126/science.abn6301>
- Zhang M, Yuan X (2020) Rapid reduction in ecosystem productivity caused by flash droughts based on decade-long FLUXNET observations. *Hydrology and Earth System Sciences* 24:5579-5593. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5579-2020>

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Esta pesquisa representa um avanço significativo no entendimento da dinâmica espaço-temporal dos veranicos durante a estação chuvosa no estado do Maranhão. A categorização dos veranicos nas classes A, B, C e D é uma abordagem eficiente para avaliar sua variabilidade espaço-temporal. As classes de veranicos de menor duração, A e B, são mais frequentes em comparação com as classes de maior duração, C e D. O início e o fim da estação chuvosa são períodos propensos à ocorrência de veranicos, principalmente das classes de maior duração. A região centro-sul do Maranhão é mais propensa à ocorrência desses veranicos. A análise de componentes principais revelou que a maior frequência de veranicos classe A durante os meses de dezembro a abril está relacionada a latitudes e altitudes mais elevadas no centro-sul do Maranhão.

No Maranhão, por meio da análise de frequência regional baseada nos momentos L, foram identificadas cinco sub-regiões homogêneas de frequência de veranicos extremos durante a estação chuvosa. As sub-regiões 2 e 5, que abrangem, respectivamente, regiões ao sul e ao norte do estado, são as mais suscetíveis à ocorrência desses eventos.

Esses resultados são essenciais para o desenvolvimento de estratégias localizadas e tomada de decisão eficientes para mitigar os impactos da variabilidade climática atual e o enfrentamento de seus riscos futuros, principalmente nos setores de agricultura, recursos hídricos e ecologia.

Contudo, há algumas limitações na pesquisa. O primeiro estudo não incluiu variáveis como a radiação solar, a velocidade do vento, o tipo de solo e a umidade deste na zona das raízes. Tais variáveis podem apresentar alguma relação com a variabilidade espaço-temporal dos veranicos e/ou caracterizar ainda melhor as condições ambientais nas quais esses eventos ocorrem em determinadas regiões do Maranhão. O segundo estudo, apesar de estimar, com limites de erro, possíveis quantis de veranicos extremos que podem ser ou não excedidos no futuro, é uma abordagem puramente estatística. Esta não leva em conta processos físicos críticos, como mudança de uso da terra, urbanização, emissão de gases de efeito estufa, trocas energéticas terra-atmosfera e oceano-atmosfera, dentre outros, que podem influenciar a variabilidade climática e consequentemente a ocorrência de veranicos mais extremos do que os estimados. Também seria interessante cruzar os dados de veranicos com dados de produtividade das principais culturas agrícolas exploradas no Maranhão (como soja e milho) para identificar possíveis relações entre essas variáveis.

Portanto, estudos que englobem as limitações apontadas, as relações dos veranicos a produtividade agrícola e com modos de variabilidade climática como o ENSO e as anomalias de TSM no Atlântico Tropical, além da análise de frequência regional aplicada aos veranicos extremos para cada mês da estação chuvosa, poderiam avançar significativamente o planejamento agrícola, a previsão e o monitoramento desses eventos no Maranhão.

APÊNDICE A – Tabela A1 com as 112 estações meteorológicas utilizadas no estudo¹.

Tabela A1 Estações meteorológicas com seus identificadores (Id), respectivos estados onde estão instaladas (Bahia – BA, Maranhão – MA, Pará – PA, Piauí – PI e Tocantins – TO), latitude (°), longitude (°), altitude (m), percentual de dados faltantes (%) e precipitação anual média – Paméd. (mm).

Id	Estado	Estações	Lat. (°)	Long. (°)	Alt. (m)	Falhas (%)	Paméd. (mm)
1	MA	Aldeias Altas	-4.6242	-43.4658	71	0.57	1,363.92
2	PA	Alto Bonito	-1.8175	-46.3439	42	1.96	2,378.58
3	MA	Alto Parnaíba	-9.1131	-45.9261	278	0.00	1,249.99
4	MA	Alto Parnaíba (INMET)	-9.1083	-45.9486	342	2.86	1,246.84
5	MA	Alto Turi	-2.9539	-45.6647	39	0.64	1,744.68
6	TO	Ananás	-6.3639	-48.0725	204	4.25	1,632.78
7	MA	Angico	-4.7428	-45.1806	76	0.29	1,471.98
8	TO	Araguaína (INMET)	-7.1039	-48.2014	238	0.08	1,784.32
9	TO	Araguatins	-5.6483	-48.1250	114	3.48	1,592.80
10	MA	Arame	-4.8611	-46.0078	110	1.11	1,033.96
11	MA	Aratôí Grande	-3.7650	-45.2203	29	0.29	1,683.77
12	MA	Babilônia	-8.3175	-45.9678	373	0.32	1,389.47
13	MA	Bacabal (INMET)	-4.2181	-44.7758	27	2.95	1,857.75
14	MA	Balsas	-7.5233	-46.0339	261	1.08	1,204.99
15	MA	Balsas (INMET)	-7.5299	-46.0464	265	3.38	1,217.69
16	MA	Barão de Grajaú	-6.7614	-43.0278	110	0.27	1,016.43
17	MA	Barra da Onça	-3.3647	-42.7239	56	1.31	1,429.99
18	MA	Barra do Corda (INMET)	-5.5064	-45.2372	156	2.49	1,134.33
19	MA	Barra do Fossado	-8.1014	-45.5875	228	0.01	1,129.32
20	PI	Barra do Lance	-7.2453	-43.6444	153	0.39	989.40
21	MA	Barro Duro	-2.9022	-42.3131	10	0.30	1,308.61
22	MA	Boa Vista	-8.7736	-46.1183	336	1.31	1,257.56
23	MA	Boa Vista do Pindaré	-3.4028	-45.0106	9	0.09	1,923.09
24	MA	BR-316 / Rio Paruá	-2.5047	-45.7842	27	0.00	1,892.41
25	MA	Brejo Comprido	-7.9286	-45.9886	339	0.64	1,400.14
26	MA	Brejo do Meio	-3.9400	-43.5206	109	1.98	1,400.89
27	MA	Buritirama	-5.5944	-47.0192	233	0.44	1,242.53
28	MA	Campo Largo	-6.0639	-44.7164	189	1.53	1,261.21
29	MA	Cândido Mendes	-1.4558	-45.7281	7	0.00	2,349.24
30	MA	Cantanhede	-3.6325	-44.3764	26	0.32	1,805.32
31	MA	Carolina	-7.3231	-47.4644	172	0.29	1,564.83
32	MA	Carolina (INMET)	-7.3372	-47.4597	180	1.82	1,799.18
33	MA	Caxias (INMET)	-4.8672	-43.3567	83	4.28	1,513.52
34	MA	Chapadinha (INMET)	-3.7428	-43.3522	103	0.21	1,708.05
35	MA	Codó	-4.4542	-43.8772	42	0.13	1,492.05
36	MA	Colinas	-6.0275	-44.2539	134	0.51	1,210.31
37	MA	Colinas (INMET)	-6.0330	-44.2333	175	1.20	1,279.80
38	MA	Coroatá	-4.1628	-44.1658	48	0.13	1,688.55
39	MA	Cururupu	-1.8261	-44.8678	17	2.29	2,089.16
40	MA	Duque Bacelar	-4.1528	-42.9461	55	0.03	1,648.99
41	PI	Esperantina	-4.0303	-45.7711	47	0.59	1,547.80
42	MA	Esperantina	-3.9033	-42.2294	60	2.35	1,842.90
43	PI	Fazenda Alegria	-4.4100	-42.1953	101	1.14	1,423.70
44	BA	Fazenda Bom Jardim	-10.9925	-45.5267	507	3.14	1,079.01
45	MA	Fazenda Pedreiras	-4.4094	-46.7492	188	1.46	1,320.23
46	MA	Fazenda Piranhas	-6.0392	-45.9206	250	0.00	910.59
47	PA	Fazenda Rural Zebu	-3.3342	-46.8733	67	2.50	1,524.79
48	MA	Fazenda São Vicente	-6.8183	-46.3336	405	0.35	1,144.18

¹ Todo o material do APÊNDICE A ao APÊNDICE G foi incluído como **Material Suplementar** do artigo intitulado “**Dinâmica espaço-temporal de veranicos durante a estação chuvosa no estado do Maranhão, Brasil**” submetido no periódico **Atmospheric Research**.

49	MA	Fazenda Sempre Viva	-6.1928	-46.2689	239	1.30	1,220.34
50	MA	Fazenda Sobral	-4.4644	-43.9311	52	1.60	1,420.23
51	MA	Fazenda Tigre	-7.3419	-45.6064	227	0.59	1,083.44
52	PI	Fazenda Veneza	-5.5728	-43.0242	80	0.00	1,335.00
53	MA	Flores	-5.4197	-44.9283	99	0.28	1,233.22
54	MA	Fortaleza	-5.6044	-46.2386	121	0.27	1,147.60
55	PI	Francisco Eyres	-6.6183	-42.6939	119	0.28	998.58
56	MA	Gonçalo	-3.0439	-43.2367	75	0.27	1,602.22
57	MA	Graça Aranha	-5.4050	-44.3356	199	0.28	1,274.58
58	MA	Guimarães	-2.1294	-44.6069	9	1.60	2,305.53
59	MA	Iguará	-3.5536	-43.8736	23	0.59	1,754.75
60	MA	Inhumas	-8.8211	-45.9681	302	0.02	1,267.31
61	TO	Itacajá	-8.3917	-47.7628	189	0.30	1,742.29
62	TO	Jatobá	-9.9906	-47.4786	218	3.42	1,646.10
63	PA	KM Zero / PA-70	-4.2867	-47.5592	258	0.00	1,581.03
64	MA	Lages	-6.6100	-43.4011	232	0.27	1,169.85
65	MA	Lago Açu	-3.8464	-44.8908	17	1.08	1,868.81
66	MA	Lago da Pedra	-4.5606	-45.1256	87	0.27	1,595.58
67	MA	Lagoa	-5.4844	-43.3586	166	0.28	1,271.18
68	MA	Ligação do Pará	-4.1167	-47.5469	175	1.98	1,534.62
69	PI	Luzilândia	-3.4622	-42.3733	21	0.27	1,345.03
70	TO	Mansinha	-9.4575	-47.3269	331	2.60	1,704.32
71	PA	Marabá (INMET)	-5.3661	-49.1253	106	4.03	1,795.09
72	MA	Maracaçumé	-2.0522	-45.9583	32	0.94	1,842.29
73	MA	Mata Roma	-3.6258	-43.1122	74	0.54	1,551.92
74	MA	Mato Grosso	-6.8442	-45.1092	347	0.41	1,103.43
75	MA	Mendes	-5.7092	-43.5872	126	0.07	1,287.17
76	PI	Miguel Alves	-4.1025	-42.5353	119	0.95	1,613.88
77	MA	Mirador	-6.3692	-44.3594	178	0.28	1,198.57
78	MA	Miranda	-3.5497	-44.5833	49	0.84	1,899.57
79	MA	Morro Vermelho	-7.1578	-46.5544	493	0.81	1,143.24
80	MA	Munim	-3.4600	-43.8994	22	0.47	1,689.14
81	MA	Newton Belo	-3.4244	-45.6694	39	0.30	1,784.69
82	MA	Nina Rodrigues	-3.4594	-43.8989	22	0.28	1,691.69
83	MA	Palmeira do Norte	-4.4206	-43.6492	66	1.67	1,483.36
84	PI	Palmeirais	-5.9756	-43.0617	95	0.00	1,216.27
85	TO	Palmeirante	-7.8594	-47.9289	169	1.85	1,573.39
86	MA	Papagaio	-6.0022	-45.3942	246	1.64	1,191.78
87	PA	Paragominas	-3.0100	-47.3433	85	3.97	1,866.02
88	MA	Passagem Franca	-6.1747	-43.7792	222	1.16	1,239.19
89	MA	Pedras	-3.9436	-44.0175	42	0.59	1,598.95
90	MA	Pedreiras II	-4.5767	-44.5994	36	0.80	1,592.92
91	MA	Pedro Rosário	-2.9708	-45.355	39	1.63	2,392.23
92	MA	Peritoró II	-3.7097	-44.2933	27	0.45	1,767.16
93	MA	Pimenta	-2.5903	-45.3653	32	0.84	1,612.45
94	MA	Pindaré-Mirim	-3.6583	-45.4431	20	0.67	1,823.46
95	MA	Pinheiro	-2.5153	-45.0856	5	1.47	1,730.66
96	MA	Piritoró BR-316	-4.3722	-44.3342	52	0.82	1,519.51
97	MA	Ponte BR-222	-4.2989	-46.4936	62	0.32	1,353.69
98	MA	Porto do Lopes	-6.0103	-44.3444	161	0.27	1,101.95
99	PI	Prata do Piauí	-5.6675	-42.2061	95	0.27	1,255.79
100	MA	Presidente Jucelino	-2.9278	-44.0792	46	0.59	2,276.22
101	MA	Recursos	-7.3314	-46.3075	304	0.60	1,171.69
102	MA	Reta KM-32	-4.8297	-47.2692	350	1.08	1,396.83
103	PI	Ribeiro Gonçalves	-7.5572	-45.2444	209	0.57	1,106.14
104	MA	Sambaíba	-7.1411	-45.3461	208	0.36	1,037.40
105	MA	Santa Helena	-2.2739	-45.2711	16	0.89	1,811.39
106	MA	Santa Vitória	-5.1014	-44.9608	57	0.27	1,299.74
107	MA	São Bento	-2.7011	-44.8233	13	0.28	1,884.62
108	MA	São Félix de Balsas	-7.0814	-44.8125	179	0.30	1,044.82

109	MA	São João do Grajaú	-4.2406	-45.3581	36	0.50	1,747.17
110	MA	São Luís (INMET)	-2.5267	-44.2136	55	1.06	2,219.01
111	MA	São Mateus do Maranhão	-4.0078	-44.4661	44	1.61	1,865.91
112	TO	São Sebastião do Tocantins	-5.2597	-48.2069	122	1.41	1,832.83
113	MA	Sítio Novo	-5.8842	-46.7019	275	2.50	1,209.41
114	PA	Tararua-Ponte	-1.7331	-46.5989	18	1.63	2,036.10
115	PI	Tinguis	-3.7233	-41.9756	17	0.47	1,307.11
116	TO	Tocantinópolis	-6.2886	-47.3919	142	4.46	1,421.69
117	PA	Tracuateua (INMET)	-1.0636	-46.8653	25	0.72	2,434.20
118	MA	Tucumã	-4.2208	-46.1653	270	4.22	1,462.34
119	MA	Turiação (INMET)	-1.6614	-45.3719	43	0.24	2,221.87
120	MA	Vale do Pindaré	-4.6981	-46.9392	163	2.32	1,315.45
121	MA	Vereda Grande	-5.9700	-43.4158	250	1.12	1,241.31
122	PA	Viseu	-1.2314	-46.1878	35	0.00	2,410.05
123	MA	Zé Doca (INMET)	-3.2692	-45.6511	48	0.96	1,841.18

APÊNDICE B – Avaliação das imputações de dados ausentes de precipitação pluvial diária.

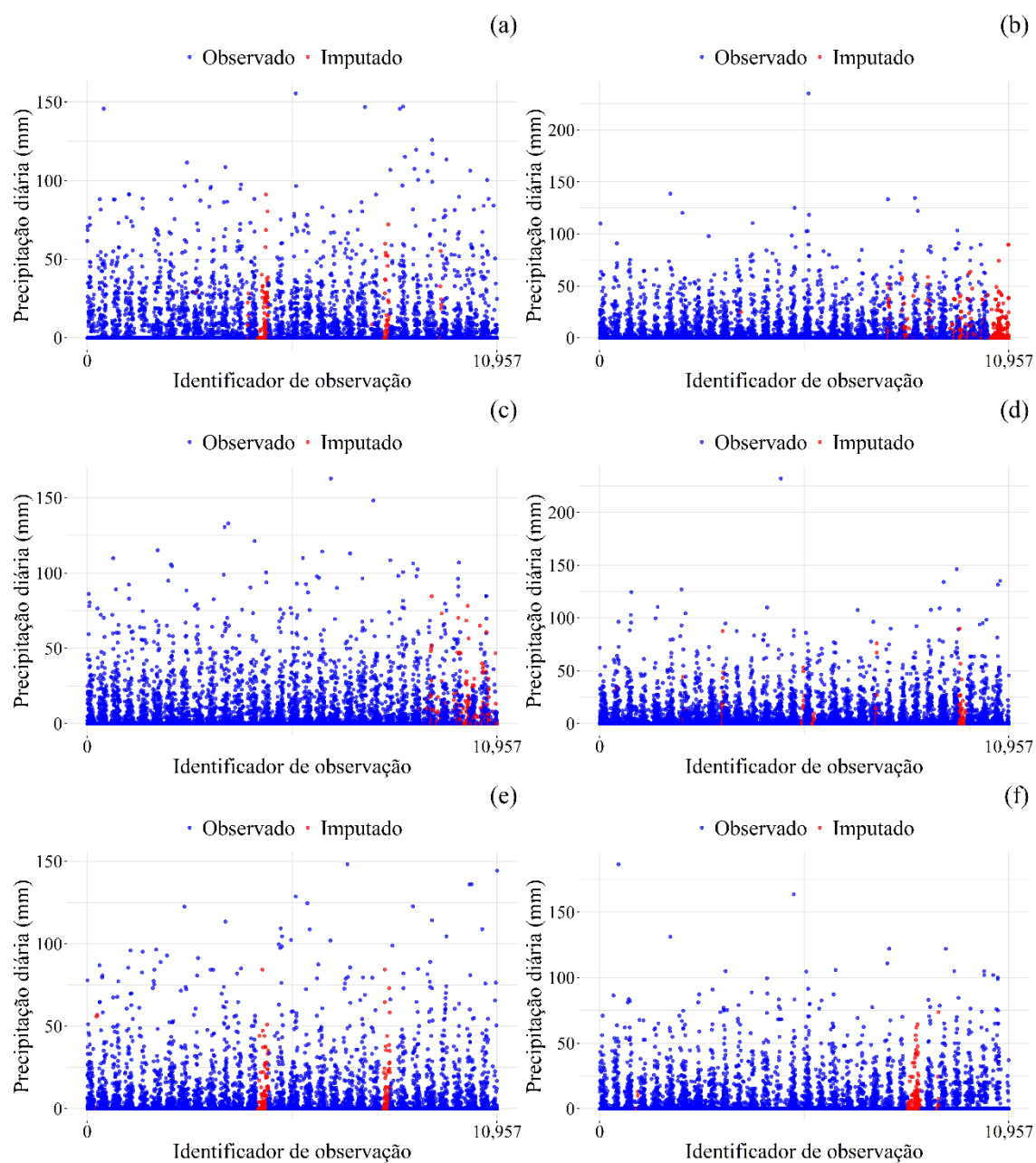


Fig. B1 Stripplots de dados diários de precipitação observados (azul) e imputados (vermelho) usando o método Correspondência de Média Preditiva. Estações meteorológicas – percentual de dados faltantes (**Tabela A1**): Ananás – 4.25% (a); Caxias (INMET) – 4.28% (b); Marabá (INMET) – 4.03% (c); Paragominas – 3.97% (d); Tocantinópolis – 4.46% (e); Tucumã – 4.22% (f).

APÊNDICE C – Script em linguagem R para categorização e contagem de veranicos.

O script em linguagem R criado com o auxílio do assistente Microsoft Copilot® para categorização e contagem de veranicos segue os critérios descritos no subtópico “2.3. *Categorização e contagem de veranicos*” de “2. **Material e métodos**” do material principal.

Conforme mencionado no material principal, foram analisadas 29 estações chuvosas entre 1994 e 2023. Abaixo segue um exemplo de tabulação de dados no Excel para a estação meteorológica Aldeias Altas (**Tabela A1**), e o roteiro abaixo.

Ano	Mes	Dia	prec
1994	12	1	0
1994	12	2	0
1994	12	3	0
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
2023	5	31	0

prec: precipitação diária (mm).

O Script

```
# Carregar pacotes necessários
```

```
library(dplyr)
```

```
library(lubridate)
```

```
# Carregar dados
```

```
dados <- Aldeias.Altas
```

```
# Criar coluna de data e período chuvoso (dezembro a maio)
```

```
dados <- dados %>%
```

```
  mutate(
```

```
    data = make_date(Ano, Mes, Dia),
```

```
    periodo_chuvoso = ifelse(Mes >= 12, paste0(Ano, "/", Ano + 1), paste0(Ano - 1, "/", Ano))
```

```
  )
```

```
# Função para detectar veranicos de 3 a 6 dias (classe A)
```

```
detectar_veranicos <- function(dados, limiar = 1, dias_min = 3, dias_max = 6) {
```

```
  sequencia_seca <- rle(dados$prec < limiar)
```

```
  indices <- which(sequencia_seca$values & sequencia_seca$lengths >= dias_min & sequencia_seca$lengths <= dias_max)
```

```
  veranicos <- lapply(indices, function(i) {
```

```
    start <- if (i == 1) 1 else sum(sequencia_seca$lengths[1:(i-1)]) + 1
```

```
    end <- start + sequencia_seca$lengths[i] - 1
```

```
    data.frame(
```

```
      data_inicio = dados$data[start],
```

```
      data_fim = dados$data[end],
```

```
      duracao = sequencia_seca$lengths[i],
```

```
      mes_inicio = month(dados$data[start]),
```

```
      mes_fim = month(dados$data[end])
```

```
    )
```

```
  })
```

```
  if (length(veranicos) > 0) {
```

```

    do.call(rbind, veranicos)
  } else {
    data.frame()
  }
}

# Aplicar a função por período chuvoso
resultado_final <- lapply(unique(dados$periodo_chuvoso), function(periodo) {
  dados_perodo <- filter(dados, periodo_chuvoso == periodo)
  veranicos <- detectar_veranicos(dados_perodo)
  if (nrow(veranicos) > 0) {
    veranicos$periodo_chuvoso <- periodo
    return(veranicos)
  }
}) %>% bind_rows()

# Alocar os veranicos ao mês de maior ocorrência
resultado_final <- resultado_final %>%
  rowwise() %>%
  mutate(
    dias_mes_inicio = as.integer(days_in_month(data_inicio) - day(data_inicio) + 1),
    mes_final = ifelse(
      mes_inicio == mes_fim,
      mes_inicio,
      ifelse(dias_mes_inicio >= duracao / 2, mes_inicio, mes_fim)
    )
  ) %>%
  ungroup() %>%
  mutate(mes_final = factor(month.abb[mes_final], levels = month.abb)) %>%
  select(-dias_mes_inicio)

# Exibir resultado1
print(resultado_final)

# Salvar resultado
write.csv(resultado_final, file = "x:/caminho/para/salvar/Aldeias.Altas.csv", row.names = FALSE)

Contagem de veranicos por mês
# Lista
meses <- c("Dez", "Jan", "Fev", "Mar", "Abr", "Mai")

# Contar quantas vezes cada mês aparece em 'mes_final'
contagem_meses <- resultado_final %>%
  group_by(mes_final) %>%
  summarise(contagem = n()) %>%
  ungroup()

# Criar um data frame com todos os meses e juntar com a contagem
contagem_completa <- data.frame(mes_final = factor(meses, levels = meses)) %>%
  left_join(contagem_meses, by = "mes_final") %>%
  mutate(contagem = ifelse(is.na(contagem), 0, contagem))

# Exibir o resultado
print(contagem_completa)

# Salvar o resultado2
write.csv(contagem_completa, file = "x:/caminho/para/salvar/Aldeias.Altas.csv", row.names = FALSE)

```

Observações: Para aplicar o script aos veranicos das classes B e C, basta alterar o intervalo da sequência de dias secos na "Função para detectar veranicos" para "dias_min =" e "dias_max =". Por exemplo, para a

classe B, seria "dias_min = 7" e "dias_max = 10". Para veranicos da classe D (≥ 15 dias), seria apenas "dias_min = 15", além de remover "&dry_sequence\$lengths <= dias_max" em "indices".

¹Exemplo de saída: na primeira parte do script, quando os primeiros resultados são obtidos com a opção de salvá-los, a saída é um quadro de dados (**Fig. C1**) com a data de início (data_inicio) e a data de término (data_fim) do veranico, sua duração (duracao), o mês de início (mes_inicio) e o mês de término (mes_fim) do veranico, a estação chuvosa (periodo_chuvoso) em que ocorreu o veranico e, finalmente, o mês para o qual o veranico é contabilizado (mes_final). Portanto, o número de vezes que um determinado mês aparece na coluna "mes_final" indica quantos veranicos ocorreram dentro do período avaliado. Esses resultados são extraídos na segunda parte do script, mostrada a seguir.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
data_inicio	data_fim	duracao	mes_inicio	mes_fim	periodo_chuvoso	mes_final												
26/12/1994	28/12/1994	3	12	12	12 1994/1995	Dec												
02/01/1995	04/01/1995	3	1	1	1 1994/1995	Jan												
06/01/1995	10/01/1995	5	1	1	1 1994/1995	Jan												
04/02/1995	09/02/1995	6	2	2	2 1994/1995	Feb												
11/02/1995	14/02/1995	4	2	2	2 1994/1995	Feb												
15/03/1995	18/03/1995	4	3	3	3 1994/1995	Mar												
20/03/1995	22/03/1995	3	3	3	3 1994/1995	Mar												
28/03/1995	30/03/1995	3	3	3	3 1994/1995	Mar												
10/01/1996	13/01/1996	4	1	1	1 1995/1996	Jan												
16/02/1996	21/02/1996	6	2	2	2 1995/1996	Feb												
24/02/1996	26/02/1996	3	2	2	2 1995/1996	Feb												
08/03/1996	11/03/1996	4	3	3	3 1995/1996	Mar												
13/03/1996	15/03/1996	3	3	3	3 1995/1996	Mar												
10/04/1996	12/04/1996	3	4	4	4 1995/1996	Apr												
01/12/1996	05/12/1996	5	12	12	12 1996/1997	Dec												
15/01/1997	18/01/1997	4	1	1	1 1996/1997	Jan												
23/01/1997	26/01/1997	4	1	1	1 1996/1997	Jan												
06/02/1997	08/02/1997	3	2	2	2 1996/1997	Feb												
15/02/1997	17/02/1997	3	2	2	2 1996/1997	Feb												
11/03/1997	16/03/1997	6	3	3	3 1996/1997	Mar												
18/03/1997	21/03/1997	4	3	3	3 1996/1997	Mar												
30/03/1997	01/04/1997	3	3	4	4 1996/1997	Mar												
10/04/1997	12/04/1997	3	4	4	4 1996/1997	Apr												
10/05/1997	14/05/1997	5	5	5	5 1996/1997	May												
15/12/1997	17/12/1997	3	12	12	12 1997/1998	Dec												
19/12/1997	21/12/1997	3	12	12	12 1997/1998	Dec												
25/12/1997	30/12/1997	6	12	12	12 1997/1998	Dec												

Fig. C1 Exemplo dos resultados do processamento dos dados diários de precipitação da estação meteorológica Aldeias Altas (**Tabela A1**). Estes são os resultados obtidos na primeira parte do roteiro para os veranicos de classe A entre as estações chuvosas de 1994/1995 a 2022/2023.

²Exemplo de saída: Na segunda parte do script, a saída é um quadro de dados (**Fig. C2**) com colunas para "mes_final" e "contagem". A **Fig. C2** mostra quantos veranicos classe A ocorreram em cada mês da estação chuvosa na estação meteorológica Aldeias Altas, entre as estações chuvosas de 1994/1995 a 2022/2023.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
mes_final	contagem																			
Dec	34																			
Jan	51																			
Feb	52																			
Mar	58																			
Apr	52																			
May	42																			

Fig. C2 Resultados da segunda parte do script, que conta quantas vezes um determinado mês da estação chuvosa aparece na coluna "mes_final" do quadro de dados com os resultados da primeira parte do script (**Fig. C1**). O número de vezes que um mês aparece em "contagem" indica quantos veranicos ocorreram naquele mês dentro do período analisado.

APÊNDICE D – Distribuição espacial da média mensal de precipitação e cobertura de nuvens.

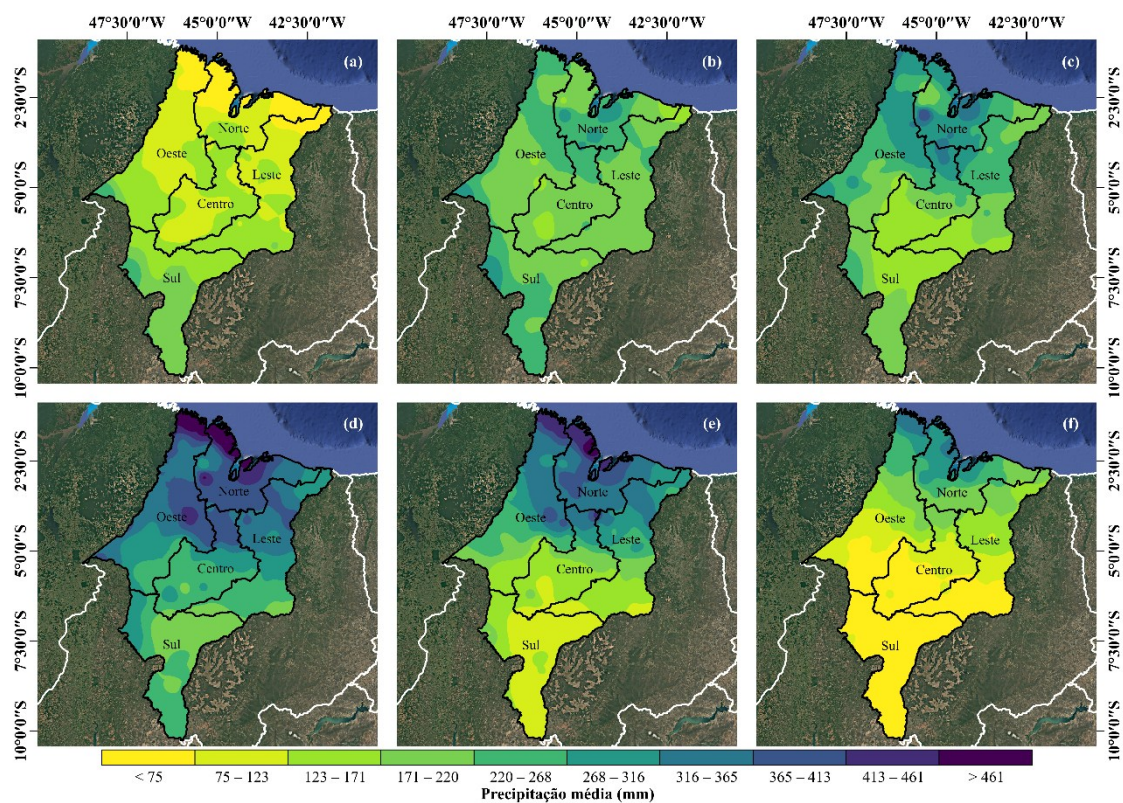


Fig. D1 Distribuição espacial da precipitação média em cada mês da estação chuvosa (dezembro (a)–maio (f)) no estado do Maranhão entre 1994 e 2023.

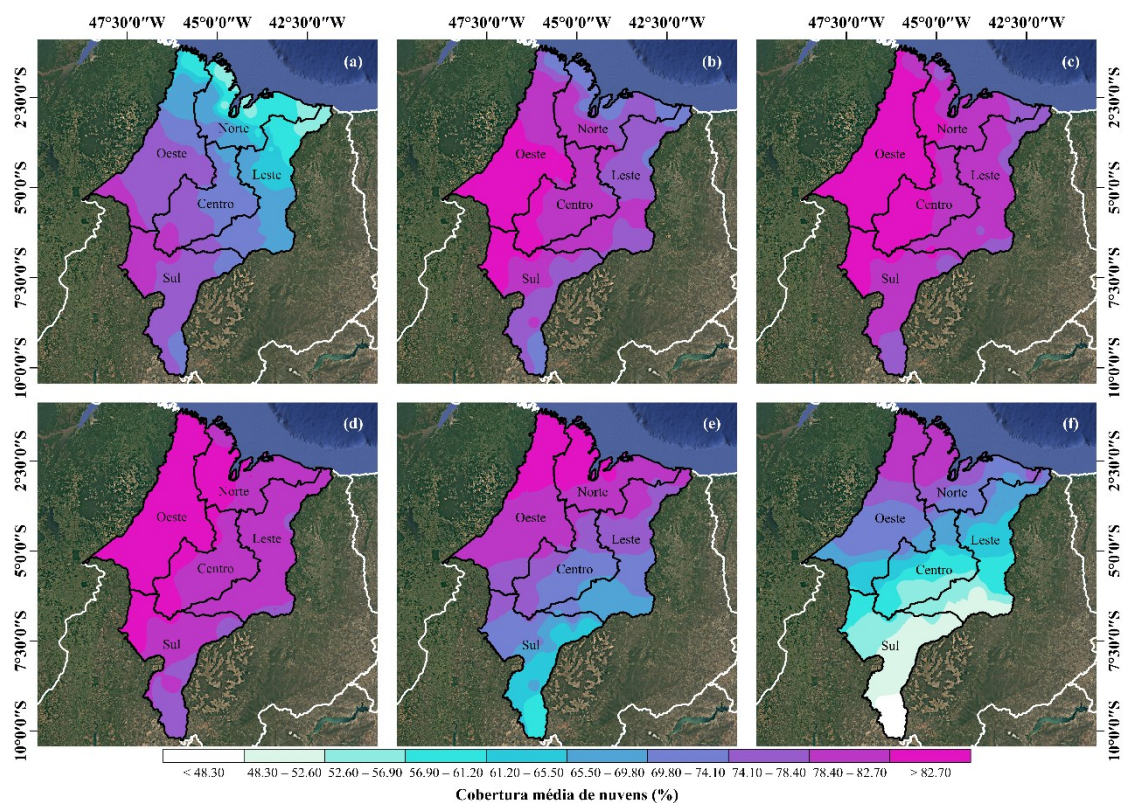


Fig. D2 Distribuição espacial da cobertura média de nuvens durante a estação chuvosa (dezembro (a) - maio (f)) no Maranhão entre 1994 e 2023.

APÊNDICE E – Distribuição espacial da frequência mensal dos veranicos classe A, B, C e D.

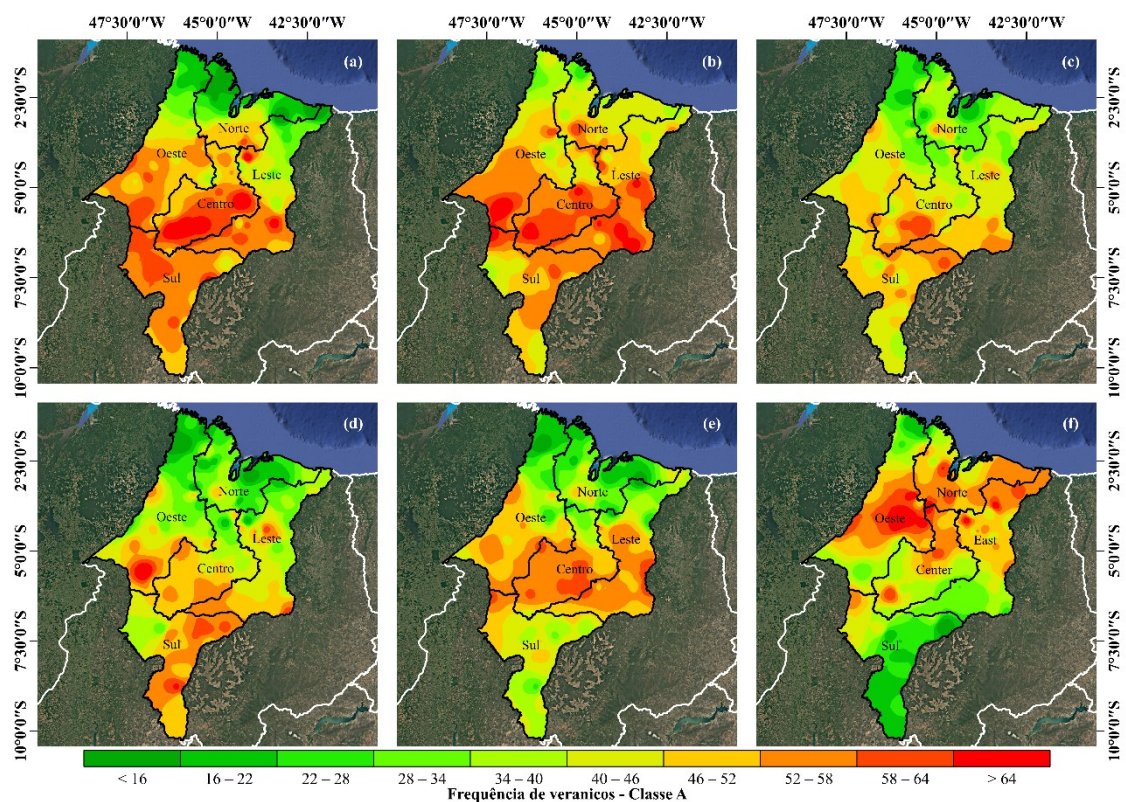


Fig. E1 Distribuição espacial dos veranicos classe A nos meses da estação chuvosa (dezembro (a)–maio (f)) no Maranhão entre 1994 e 2023.

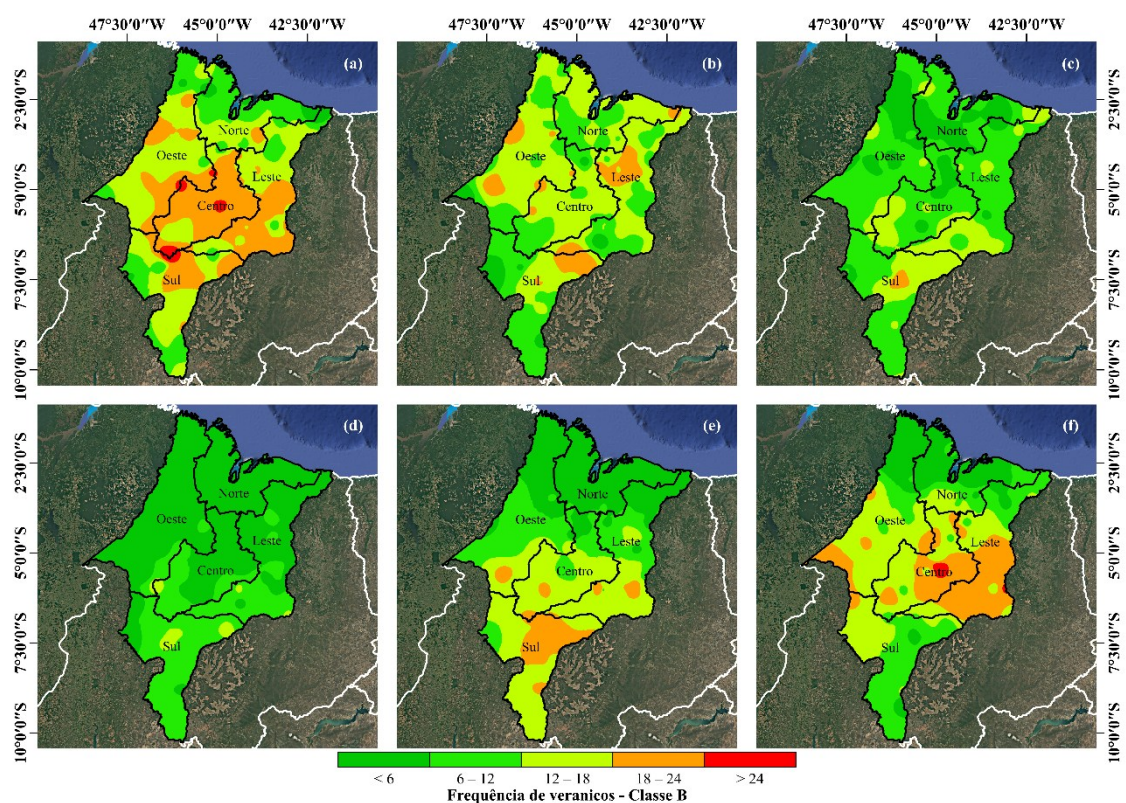


Fig. E2 Distribuição espacial dos veranicos classe B nos meses da estação chuvosa (dezembro (a)–maio (f)) no Maranhão entre 1994 e 2023.

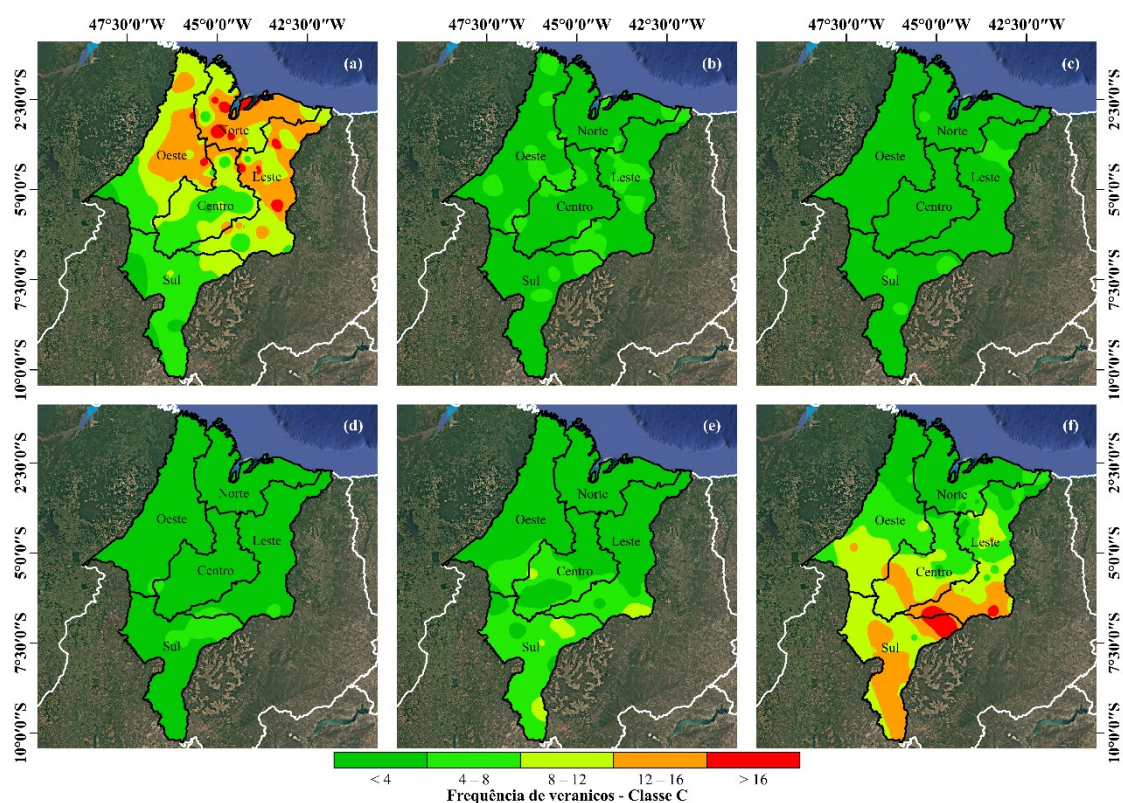


Fig. E3 Distribuição espacial dos veranicos classe C nos meses da estação chuvosa (dezembro (a)–maio (f)) no Maranhão entre 1994 e 2023.

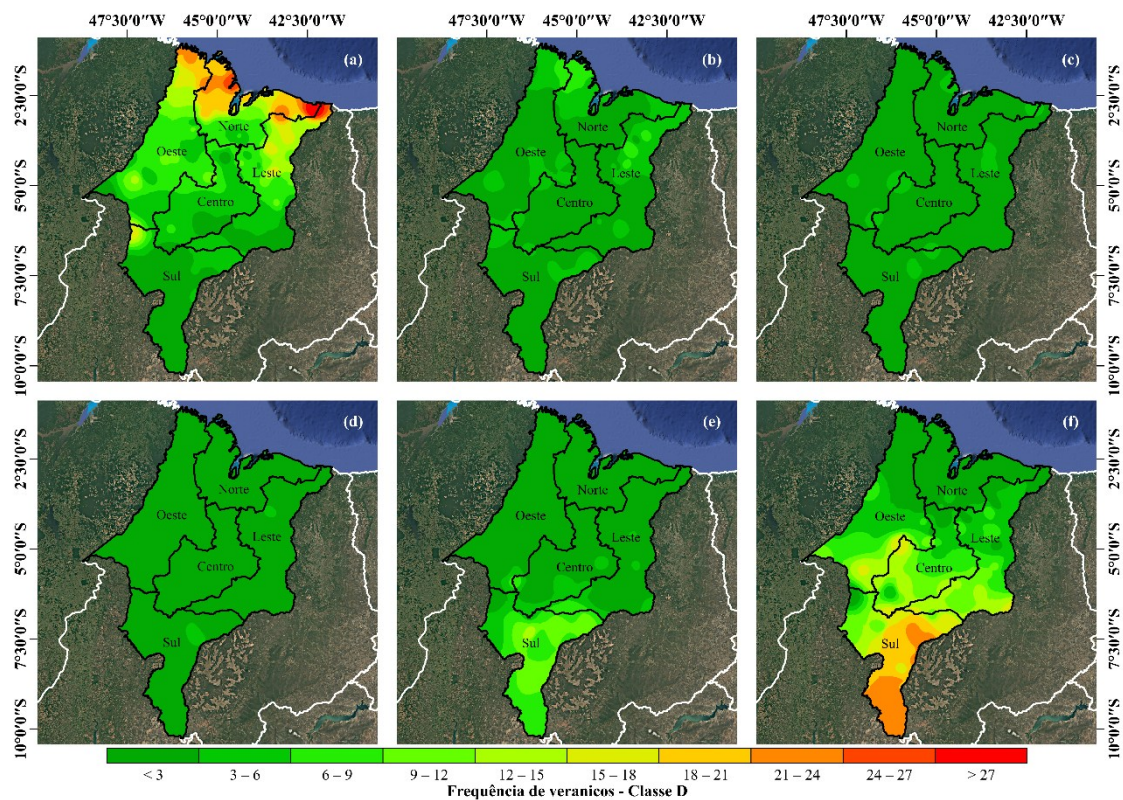


Fig. E4 Distribuição espacial dos veranicos classe D nos meses da estação chuvosa (dezembro (a)–maio (f)) no Maranhão entre 1994 e 2023.

APÊNDICE F – Distribuição espacial das contribuições das estações meteorológicas para os componentes (CP1, CP2 e CP3) da ACP aplicada às classes A e D de veranicos.

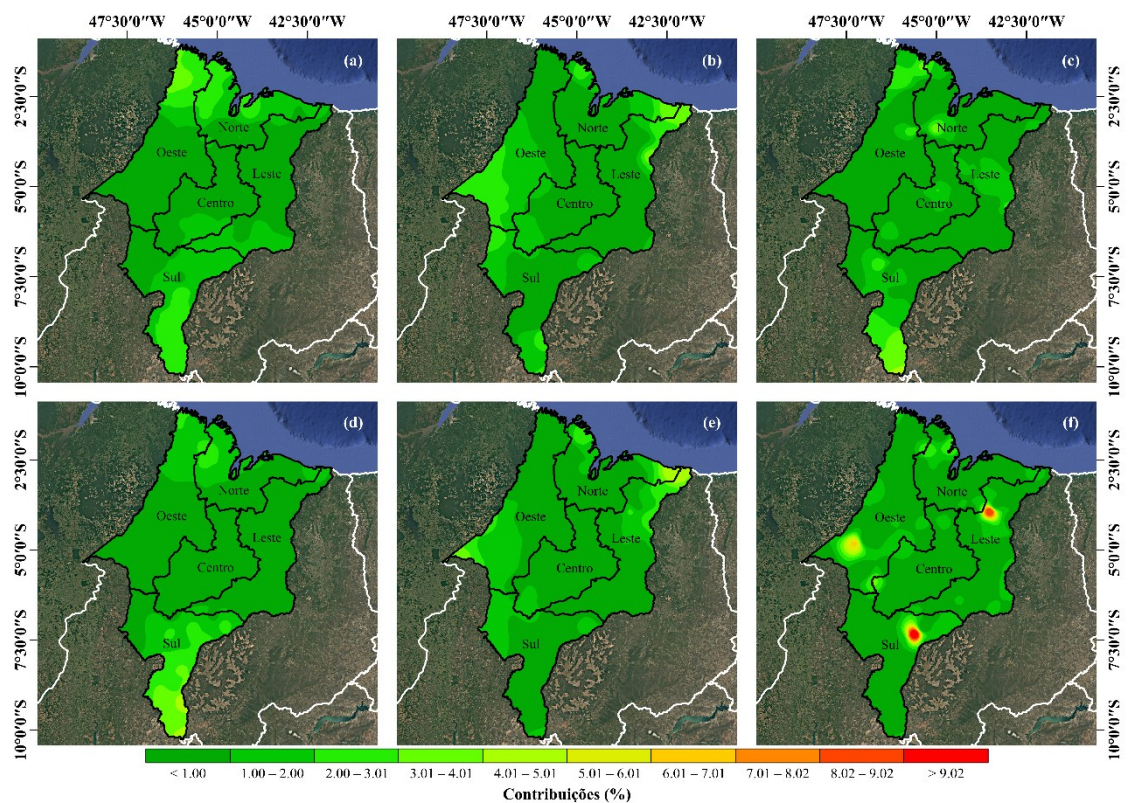


Fig. F1 Distribuição espacial das contribuições das estações meteorológicas para os componentes (CP1, CP2 e CP3) da ACP aplicada às classes A (a–c) e D (d–f) de veranicos.

APÊNDICE G – Distribuição espacial das médias de temperatura e umidade relativa do ar da estação chuvosa.

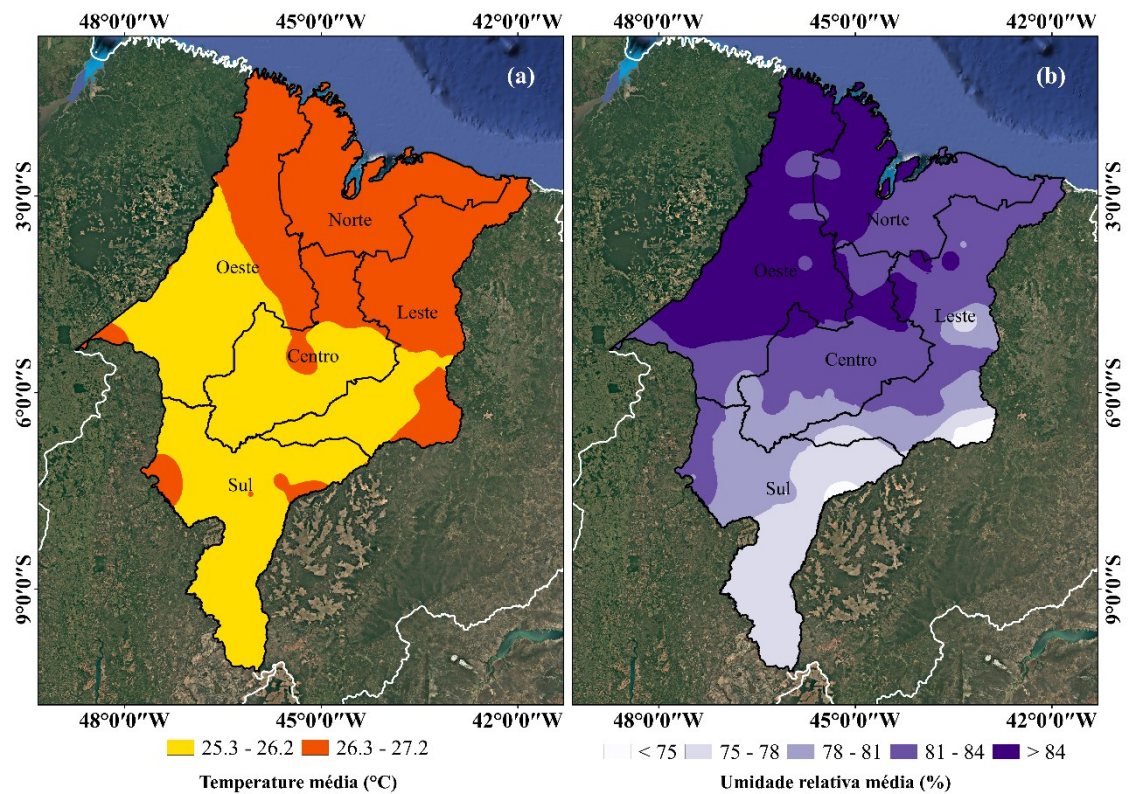


Fig. G1 Distribuição espacial da temperatura (°C, (a)) e umidade relativa (% (b)) médias do ar durante a estação chuvosa (dezembro a maio) no Maranhão entre 1994 e 2023.

APÊNDICE H – Informações complementares referente: aos atributos de latitude, longitude, altitude, proporção de dados faltantes e período de registros de dados de precipitação das estações (**Tabela H1**); resultados dos testes de estacionaridade e independência serial das séries temporais de veranicos extremos (**Tabela H2**); e valores das estatísticas de discordância (D_i), L -CV, L -assimetria e L -curtose (**Tabela H3**)².

Tabela H1 Estações meteorológicas com seus identificadores (Id), respectivos estados onde estão instaladas (Bahia – BA, Maranhão – MA, Pará – PA, Piauí – PI e Tocantins – TO), latitude (°), longitude (°), altitude (m), percentual de dados faltantes (%) e período de registro dos dados de precipitação.

Id	Estado	Estações	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Falhas (%)	Período –2023
1	MA	Aldeias Altas	-4.6242	-43.4658	71	0.57	1986
2	PA	Alto Bonito	-1.8175	-46.3439	42	1.96	1977
3	MA	Alto Parnaíba	-9.1131	-45.9261	278	0.00	1977
4	MA	Alto Parnaíba (INMET)	-9.1083	-45.9486	342	2.86	1985
5	MA	Alto Turi	-2.9539	-45.6647	39	0.64	1974
6	TO	Ananás	-6.3639	-48.0725	204	4.25	1993
7	MA	Angico	-4.7428	-45.1806	76	0.29	1993
8	TO	Araguaína (INMET)	-7.1039	-48.2014	238	0.08	1994
9	TO	Araguatins	-5.6483	-48.1250	114	3.48	1993
10	MA	Arame	-4.8611	-46.0078	110	1.11	1984
11	MA	Aratói Grande	-3.7650	-45.2203	29	0.27	1992
12	MA	Babilônia	-8.3175	-45.9678	373	0.32	1984
13	MA	Bacabal (INMET)	-4.2181	-44.7758	27	2.95	1985
14	MA	Balsas	-7.5233	-46.0339	261	1.08	1990
15	MA	Balsas (INMET)	-7.5299	-46.0464	265	3.38	1985
16	MA	Barão de Grajaú	-6.7614	-43.0278	110	0.27	1982
17	MA	Barra da Onça	-3.3647	-42.7239	56	1.31	1985
18	MA	Barra do Corda (INMET)	-5.5064	-45.2372	156	2.49	1985
19	MA	Barra do Fossado	-8.1014	-45.5875	228	0.01	1985
20	PI	Barra do Lance	-7.2453	-43.6444	153	0.39	1984
21	MA	Barro Duro	-2.9022	-42.3131	10	0.30	1985
22	MA	Boa Vista	-8.7736	-46.1183	336	1.31	1984
23	MA	Boa Vista do Pindaré	-3.4028	-45.0106	9	0.09	1984
24	MA	BR-316 / Rio Paruá	-2.5047	-45.7842	27	0.00	1993
25	MA	Brejo Comprido	-7.9286	-45.9886	339	0.64	1984
26	MA	Brejo do Meio	-3.9400	-43.5206	109	1.98	1986
27	MA	Buritirama	-5.5944	-47.0192	233	0.44	1983
28	MA	Campo Largo	-6.0639	-44.7164	189	1.53	1973
29	MA	Cândido Mendes	-1.4558	-45.7281	7	0.00	1987
30	MA	Cantanhede	-3.6325	-44.3764	26	0.32	1969
31	MA	Carolina	-7.3231	-47.4644	172	0.29	1993
32	MA	Carolina (INMET)	-7.3372	-47.4597	180	1.82	1985
33	MA	Caxias (INMET)	-4.8672	-43.3567	83	4.28	1994
34	MA	Chapadinha (INMET)	-3.7428	-43.3522	103	0.21	1985
35	MA	Codó	-4.4542	-43.8772	42	0.13	1966
36	MA	Colinas	-6.0275	-44.2539	134	0.51	1969
37	MA	Colinas (INMET)	-6.0330	-44.2333	175	1.20	1985
38	MA	Coroatá	-4.1628	-44.1658	48	0.13	1979
39	MA	Cururupu	-1.8261	-44.8678	17	2.29	1993
40	MA	Duque Bacelar	-4.1528	-42.9461	55	0.03	1986
41	PI	Esperantina	-4.0303	-45.7711	47	0.59	1977
42	MA	Esperantina	-3.9033	-42.2294	60	2.35	1991
43	PI	Fazenda Alegria	-4.4100	-42.1953	101	1.14	1984
44	BA	Fazenda Bom Jardim	-10.9925	-45.5267	507	3.14	1978

² Todo o material do **APÊNDICE H** será incluído como **Material Suplementar** do artigo intitulado “Análise de frequência regional de veranicos extremos durante a estação chuvosa no estado do Maranhão, Brasil”, que será submetido no periódico **Climate Change**.

45	MA	Fazenda Pedreiras	-4.4094	-46.7492	188	1.46	1993
46	MA	Fazenda Piranhas	-6.0392	-45.9206	250	0.00	1985
47	PA	Fazenda Rural Zebu	-3.3342	-46.8733	67	2.50	1993
48	MA	Fazenda São Vicente	-6.8183	-46.3336	405	0.35	1985
49	MA	Fazenda Sempre Viva	-6.1928	-46.2689	239	1.30	1985
50	MA	Fazenda Sobral	-4.4644	-43.9311	52	1.60	1992
51	MA	Fazenda Tigre	-7.3419	-45.6064	227	0.59	1992
52	PI	Fazenda Veneza	-5.5728	-43.0242	80	0.00	1987
53	MA	Flores	-5.4197	-44.9283	99	0.28	1992
54	MA	Fortaleza	-5.6044	-46.2386	121	0.27	1992
55	PI	Francisco Eyres	-6.6183	-42.6939	119	0.28	1985
56	MA	Gonçalo	-3.0439	-43.2367	75	0.27	1985
57	MA	Graça Aranha	-5.4050	-44.3356	199	0.28	1985
58	MA	Guimarães	-2.1294	-44.6069	9	1.60	1987
59	MA	Iguará	-3.5536	-43.8736	23	0.59	1992
60	MA	Inhumas	-8.8211	-45.9681	302	0.02	1985
61	TO	Itacajá	-8.3917	-47.7628	189	0.30	1993
62	TO	Jatobá	-9.9906	-47.4786	218	3.42	1994
63	PA	KM Zero / PA-70	-4.2867	-47.5592	258	0.00	1983
64	MA	Lages	-6.6100	-43.4011	232	0.27	1983
65	MA	Lago Açu	-3.8464	-44.8908	17	1.08	1985
66	MA	Lago da Pedra	-4.5606	-45.1256	87	0.27	1985
67	MA	Lagoa	-5.4844	-43.3586	166	0.28	1983
68	MA	Ligação do Pará	-4.1167	-47.5469	175	1.98	1990
69	PI	Luzilândia	-3.4622	-42.3733	21	0.27	1984
70	TO	Mansinha	-9.4575	-47.3269	331	2.60	1984
71	PA	Marabá (INMET)	-5.3661	-49.1253	106	4.03	1994
72	MA	Maracaçumé	-2.0522	-45.9583	32	0.94	1972
73	MA	Mata Roma	-3.6258	-43.1122	74	0.54	1985
74	MA	Mato Grosso	-6.8442	-45.1092	347	0.41	1985
75	MA	Mendes	-5.7092	-43.5872	126	0.07	1971
76	PI	Miguel Alves	-4.1025	-42.5353	119	0.95	1984
77	MA	Mirador	-6.3692	-44.3594	178	0.28	1971
78	MA	Miranda	-3.5497	-44.5833	49	0.84	1985
79	MA	Morro Vermelho	-7.1578	-46.5544	493	0.81	1985
80	MA	Munim	-3.4600	-43.8994	22	0.47	1973
81	MA	Newton Belo	-3.4244	-45.6694	39	0.30	1985
82	MA	Nina Rodrigues	-3.4594	-43.8989	22	0.28	1975
83	MA	Palmeira do Norte	-4.4206	-43.6492	66	1.67	1992
84	PI	Palmeirais	-5.9756	-43.0617	95	0.00	1963
85	TO	Palmeirante	-7.8594	-47.9289	169	1.85	1993
86	MA	Papagaio	-6.0022	-45.3942	246	1.64	1984
87	PA	Paragominas	-3.0100	-47.3433	85	3.97	1992
88	MA	Passagem Franca	-6.1747	-43.7792	222	1.16	1983
89	MA	Pedras	-3.9436	-44.0175	42	0.59	1992
90	MA	Pedreiras II	-4.5767	-44.5994	36	0.80	1973
91	MA	Pedro Rosário	-2.9708	-45.355	39	1.63	1992
92	MA	Peritoró II	-3.7097	-44.2933	27	0.45	1991
93	MA	Pimenta	-2.5903	-45.3653	32	0.84	1985
94	MA	Pindaré-Mirim	-3.6583	-45.4431	20	0.67	1973
95	MA	Pinheiro	-2.5153	-45.0856	5	1.47	1987
96	MA	Piritoró BR-316	-4.3722	-44.3342	52	0.82	1985
97	MA	Ponte BR-222	-4.2989	-46.4936	62	0.32	1993
98	MA	Porto do Lopes	-6.0103	-44.3444	161	0.27	1971
99	PI	Prata do Piauí	-5.6675	-42.2061	95	0.27	1982
100	MA	Presidente Jucelino	-2.9278	-44.0792	46	0.59	1984
101	MA	Recursos	-7.3314	-46.3075	304	0.60	1985
102	MA	Reta KM-32	-4.8297	-47.2692	350	1.08	1993
103	PI	Ribeiro Gonçalves	-7.5572	-45.2444	209	0.57	1978
104	MA	Sambaíba	-7.1411	-45.3461	208	0.36	1985

105	MA	Santa Helena	-2.2739	-45.2711	16	0.89	1987
106	MA	Santa Vitória	-5.1014	-44.9608	57	0.27	1976
107	MA	São Bento	-2.7011	-44.8233	13	0.28	1987
108	MA	São Félix de Balsas	-7.0814	-44.8125	179	0.30	1969
109	MA	São João do Grajaú	-4.2406	-45.3581	36	0.50	1985
110	MA	São Luís (INMET)	-2.5267	-44.2136	55	1.06	1985
111	MA	São Mateus do Maranhão	-4.0078	-44.4661	44	1.61	1984
112	TO	São Sebastião do Tocantins	-5.2597	-48.2069	122	1.41	1993
113	MA	Sítio Novo	-5.8842	-46.7019	275	2.50	1993
114	PA	Tararua-Ponte	-1.7331	-46.5989	18	1.63	1983
115	PI	Tinguis	-3.7233	-41.9756	17	0.47	1984
116	TO	Tocantinópolis	-6.2886	-47.3919	142	4.46	1993
117	PA	Tracuateua (INMET)	-1.0636	-46.8653	25	0.72	1994
118	MA	Tucumã	-4.2208	-46.1653	270	4.22	1989
119	MA	Turiação (INMET)	-1.6614	-45.3719	43	0.24	1985
120	MA	Vale do Pindaré	-4.6981	-46.9392	163	2.32	1994
121	MA	Vereda Grande	-5.9700	-43.4158	250	1.12	1985
122	PA	Viseu	-1.2314	-46.1878	35	0.00	1981
123	MA	Zé Doca (INMET)	-3.2692	-45.6511	48	0.96	1985

Tabela H2 Resultados dos testes de estacionaridade (KPSS) e independência serial (Ljung-Box) aplicados às séries temporais de veranicos extremos. As estações com séries temporais não estacionárias e não independentes estão destacadas em negrito.

Estações	n	KPSS ($\alpha = 0.05$)			Ljung-Box ($\alpha = 0.05$)		
		Estatística	VC	Lags	Estatística	p-valor	Lags
Aldeias Altas	37	0.2982	0.463	9	1.1818	0.7574	3
Alto Bonito	46	0.2204	0.463	9	0.2675	0.9660	3
Alto Parnaíba	40	0.1069	0.463	9	2.3635	0.5005	3
Alto Parnaíba (INMET)	38	0.2393	0.463	9	0.1590	0.9839	3
Alto Turi	49	0.2096	0.463	10	5.2710	0.1530	3
Ananás	30	0.2302	0.463	8	0.4596	0.9277	3
Angico	30	0.2148	0.463	8	3.7803	0.2862	3
Araguaína (INMET)	29	0.2501	0.463	8	5.1542	0.1608	3
Araguatins	30	0.2458	0.463	8	0.6113	0.8938	3
Arame	39	0.3480	0.463	9	1.0234	0.7956	3
Aratói Grande	31	0.3513	0.463	8	1.5866	0.6624	3
Babilônia	39	0.2242	0.463	9	1.0800	0.7819	3
Bacabal (INMET)	38	0.1859	0.463	9	0.5003	0.9188	3
Balsas	33	0.1165	0.463	9	3.1521	0.3688	3
Balsas (INMET)	38	0.2038	0.463	9	3.6649	0.3000	3
Barão de Grajaú	41	0.2212	0.463	9	1.3697	0.7126	3
Barra da Onça	38	0.1424	0.463	9	1.4949	0.6834	3
Barra do Corda (INMET)	38	0.1246	0.463	9	0.3287	0.9545	3
Barra do Fossado	38	0.1929	0.463	9	0.4861	0.9219	3
Barra do Lance	40	0.1309	0.463	9	0.8044	0.8484	3
Barro Duro	38	0.1518	0.463	9	2.1094	0.5500	3
Boa Vista	38	0.4430	0.463	9	1.5846	0.6629	3
Boa Vista do Pindaré	39	0.1858	0.463	9	4.3094	0.2299	3
BR-316 / Rio Paruá	30	0.1467	0.463	8	2.9994	0.3917	3
Brejo Comprido	39	0.3526	0.463	9	1.5219	0.6772	3
Brejo do Meio	37	0.1867	0.463	9	5.5414	0.1362	3
Buritirama	40	0.2606	0.463	9	2.3262	0.5075	3
Campo Largo	51	0.1662	0.463	10	6.6469	0.0840	3
Cândido Mendes	36	0.2441	0.463	9	3.4318	0.3297	3
Cantanhede	54	0.2176	0.463	10	2.4601	0.4825	3
Carolina	30	0.2698	0.463	8	2.7013	0.4400	3
Carolina (INMET)	38	0.3151	0.463	9	3.9836	0.2632	3
Caxias (INMET)	29	0.2632	0.463	8	2.0392	0.5643	3
Chapadinha (INMET)	38	0.3288	0.463	9	1.4611	0.6913	3

Codó	57	0.1294	0.463	10	6.9993	0.1359	4
Colinas	54	0.1063	0.463	10	2.2305	0.5260	3
Colinas (INMET)	38	0.1607	0.463	9	2.0039	0.5716	3
Coroatá	44	0,4880	0,463	9	2.2572	0.5208	3
Cururupu	30	0.1371	0.463	8	4.1507	0.2456	3
Duque Bacelar	37	0.3452	0.463	9	1.3460	0.7182	3
Esperantina	32	0.1672	0.463	9	0.8729	0.8320	3
Esperantina	46	0.1882	0.463	9	0.8615	0.8347	3
Fazenda Alegria	39	0.1748	0.463	9	1.7080	0.6352	3
Fazenda Bom Jardim	45	0,5573	0,463	9	1.6213	0.6546	3
Fazenda Pedreiras	30	0.3099	0.463	8	2.5514	0.4661	3
Fazenda Piranhas	38	0.1149	0.463	9	3.8744	0.2753	3
Fazenda Rural Zebu	30	0.1485	0.463	8	1.8649	0.6009	3
Fazenda São Vicente	38	0.2587	0.463	9	1.3902	0.7078	3
Fazenda Sempre Viva	38	0.2986	0.463	9	5.5947	0.1331	3
Fazenda Sobral	31	0.3277	0.463	8	5.7375	0.1251	3
Fazenda Tigre	31	0.3444	0.463	8	11,3930	0,0098	3
Fazenda Veneza	36	0.3178	0.463	9	1.2118	0.7502	3
Flores	31	0.2026	0.463	8	4.6479	0.1995	3
Fortaleza	31	0.1264	0.463	8	1.1336	0.7690	3
Francisco Eyres	38	0.2448	0.463	9	1.3334	0.7212	3
Gonçalo	38	0.1060	0.463	9	3.0326	0.3866	3
Graça Aranha	38	0.1668	0.463	9	0.9416	0.8154	3
Guimarães	36	0.1176	0.463	9	1.7019	0.6365	3
Iguará	31	0.2401	0.463	8	2.7352	0.4343	3
Inhumas	38	0.1507	0.463	9	2.0607	0.5599	3
Itacajá	30	0.1519	0.463	8	4.7475	0.1912	3
Jatobá	29	0.2548	0.463	8	1.0068	0.7996	3
KM Zero / PA-70	40	0.1417	0.463	9	0.7531	0.8606	3
Lages	40	0.1526	0.463	9	3.4859	0.3226	3
Lago Açu	38	0.1481	0.463	9	1.0480	0.7896	3
Lago da Pedra	38	0.2588	0.463	9	0.8743	0.8316	3
Lagoa	40	0.1845	0.463	9	4.4204	0.2195	3
Ligação do Pará	33	0.1276	0.463	9	0.7586	0.8593	3
Luzilândia	39	0.2708	0.463	9	5.6873	0.1279	3
Mansinha	39	0.1554	0.463	9	2.8578	0.4141	3
Marabá (INMET)	29	0.1594	0.463	8	2.3829	0.4968	3
Maracaçumé	51	0.2136	0.463	10	0.5676	0.9038	3
Mata Roma	38	0.4378	0.463	9	8,4348	0,0378	3
Mato Grosso	38	0.3191	0.463	9	0.3795	0.9444	3
Mendes	52	0.1804	0.463	10	5.5418	0.1362	3
Miguel Alves	39	0.1122	0.463	9	3.6055	0.3073	3
Mirador	52	0.3144	0.463	10	1.8354	0.6073	3
Miranda	38	0.2978	0.463	9	1.2477	0.7416	3
Morro Vermelho	38	0.1993	0.463	9	5.5896	0.1334	3
Munim	50	0.2199	0.463	10	2.5837	0.4603	3
Newton Belo	38	0.2816	0.463	9	3.6291	0.3044	3
Nina Rodrigues	48	0.3241	0.463	9	2.0816	0.5556	3
Palmeira do Norte	31	0.3883	0.463	8	5.1492	0.1612	3
Palmeirais	60	0.1955	0.463	10	9.0794	0.0591	4
Palmeirante	30	0.2069	0.463	8	1.6169	0.6556	3
Papagaio	39	0.3089	0.463	9	1.8505	0.6040	3
Paragominas	31	0.2572	0.463	8	4.5696	0.2062	3
Passagem Franca	40	0.1686	0.463	9	5.3152	0.1501	3
Pedras	31	0.2733	0.463	8	1.8575	0.6025	3
Pedreiras II	50	0.0994	0.463	10	1.5041	0.6813	3
Pedro Rosário	31	0.2271	0.463	8	0.5180	0.9149	3
Peritoró II	32	0.3344	0.463	9	1.4745	0.6882	3
Pimenta	38	0.3434	0.463	9	0.3826	0.9438	3
Pindaré-Mirim	50	0.1754	0.463	10	4.1930	0.2414	3

Pinheiro	36	0.1747	0.463	9	4.3398	0.2270	3
Piritoró BR-316	38	0.2159	0.463	9	3.5239	0.3177	3
Ponte BR-222	30	0.3094	0.463	8	0.4178	0.9365	3
Porto do Lopes	52	0.1229	0.463	10	2.2981	0.5129	3
Prata do Piauí	41	0.4613	0.463	9	0.6566	0.8834	3
Presidente Jucelino	39	0.4408	0.463	9	0.6509	0.8847	3
Recursos	38	0.3362	0.463	9	8,2742	0,0407	3
Reta KM-32	30	0.2841	0.463	8	0.8821	0.8297	3
Ribeiro Gonçalves	45	0.3250	0.463	9	7.7836	0.0507	3
Sambaíba	38	0.1471	0.463	9	1.5212	0.6774	3
Santa Helena	36	0.1597	0.463	9	4.8006	0.1870	3
Santa Vitória	47	0.3845	0.463	9	7.1661	0.0668	3
São Bento	36	0.1331	0.463	9	1.5855	0.6627	3
São Félix de Balsas	54	0.2859	0.463	10	3.1915	0.3630	3
São João do Grajaú	38	0.1220	0.463	9	0.5589	0.9058	3
São Luís (INMET)	38	0.1685	0.463	9	3.0742	0.3803	3
São Mateus do Maranhão	39	0.1200	0.463	9	4.7360	0.1922	3
São Sebastião do Tocantins	30	0.1365	0.463	8	2.4253	0.4889	3
Sítio Novo	30	0.1249	0.463	8	1.2685	0.7366	3
Tararua-Ponte	40	0.1457	0.463	9	2.1742	0.5370	3
Tinguis	39	0.1183	0.463	9	4.2454	0.2362	3
Tocantinópolis	30	0.1176	0.463	8	2.0271	0.5668	3
Tracuateua (INMET)	29	0.2458	0.463	8	5.6525	0.1298	3
Tucumã	34	0.1657	0.463	9	4.8452	0.1835	3
Turiação (INMET)	38	0.2183	0.463	9	4.1353	0.2472	3
Vale do Pindaré	29	0.1879	0.463	8	1.6824	0.6408	3
Vereda Grande	38	0.3491	0.463	9	2.3468	0.5036	3
Viseu	42	0.2888	0.463	9	4.0837	0.2526	3
Zé Doca (INMET)	38	0.1331	0.463	9	2.5089	0.4737	3

n: comprimento da série temporal; VC: valor crítico da estatística de teste com $\alpha = 0.05$.

Tabela H3 Valores das estatísticas de discordância (D_i), L -CV, L -assimetria e L -curtose para as estações em sua respectiva sub-região homogênea.

Estações	Sub-região	D_i	L -CV (t)	L -assimetria (t_3)	L -curtose (t_4)
Aldeias Altas	1	2.17	0.16	0.24	0.18
Barão de Grajaú	1	0.46	0.19	0.24	0.19
Barra da Onça	1	1.79	0.29	0.30	0.22
Barra do Lance	1	0.42	0.24	0.18	0.16
Brejo do Meio	1	0.51	0.23	0.30	0.25
Campo Largo	1	1.25	0.21	0.33	0.27
Caxias (INMET)	1	0.78	0.18	0.15	0.13
Chapadinha (INMET)	1	0.97	0.25	0.24	0.25
Codó	1	0.17	0.20	0.18	0.17
Colinas	1	0.13	0.22	0.18	0.14
Colinas (INMET)	1	0.53	0.19	0.21	0.14
Duque Bacelar	1	1.62	0.22	0.22	0.29
Esperantina	1	2.06	0.26	0.16	0.06
Fazenda Alegria	1	0.59	0.26	0.27	0.19
Fazenda Sobral	1	0.66	0.22	0.32	0.23
Fazenda Veneza	1	1.28	0.22	0.31	0.30
Graça Aranha	1	2.09	0.20	0.12	0.02
Lages	1	1.82	0.22	0.23	0.07
Lagoa	1	0.48	0.21	0.27	0.17
Luzilândia	1	0.95	0.25	0.18	0.18
Mata Roma	1	1.79	0.21	0.04	0.10
Mendes	1	0.69	0.20	0.11	0.09
Miguel Alves	1	1.90	0.29	0.32	0.20
Mirador	1	0.44	0.22	0.25	0.14
Palmeira do Norte	1	1.37	0.19	0.07	0.14

Palmeirais	1	0.32	0.21	0.26	0.18
Passagem Franca	1	0.24	0.20	0.20	0.19
Porto do Lopes	1	0.15	0.20	0.18	0.17
Prata do Piauí	1	0.64	0.24	0.32	0.24
Tinguis	1	2.66	0.19	0.03	0.17
Vereda Grande	1	0.08	0.23	0.23	0.20
Alto Parnaíba	2	1.62	0.17	0.16	0.27
Alto Parnaíba (INMET)	2	2.02	0.18	0.26	0.34
Babilônia	2	0.04	0.21	0.22	0.21
Balsas	2	0.92	0.21	0.31	0.26
Balsas (INMET)	2	1.62	0.17	0.01	0.08
Barra do Fossão	2	0.11	0.22	0.20	0.20
Boa Vista	2	0.58	0.24	0.19	0.12
Brejo Comprido	2	0.40	0.22	0.30	0.24
Buritirama	2	2.13	0.29	0.36	0.26
Fazenda Bom Jardim	2	0.19	0.23	0.18	0.14
Fazenda São Vicente	2	1.95	0.19	0.19	0.10
Fazenda Tigre	2	2.54	0.26	0.45	0.28
Inhumas	2	0.63	0.18	0.09	0.14
Jatobá	2	0.84	0.22	0.14	0.07
Mansinha	2	0.38	0.23	0.17	0.13
Mato Grosso	2	2.13	0.19	0.17	0.07
Morro Vermelho	2	0.75	0.26	0.28	0.23
Recursos	2	0.64	0.21	0.21	0.26
Ribeiro Gonçalves	2	0.06	0.22	0.23	0.18
Sambaíba	2	0.43	0.19	0.19	0.24
São Félix de Balsas	2	0.55	0.20	0.10	0.13
Sítio Novo	2	1.46	0.25	0.16	0.12
Alto Turi	3	1.50	0.30	0.39	0.31
Angico	3	0.71	0.21	0.23	0.27
Arame	3	0.17	0.22	0.26	0.22
Aratói Grande	3	1.17	0.19	0.07	0.07
Bacabal (INMET)	3	0.80	0.18	0.18	0.18
Barra do Corda (INMET)	3	1.03	0.18	0.08	0.09
Boa Vista do Pindaré	3	2.05	0.26	0.30	0.36
BR-316 / Rio Paruá	3	2.95	0.27	0.15	0.10
Cantanhede	3	0.81	0.25	0.17	0.13
Coroatá	3	0.72	0.25	0.22	0.10
Esperantina	3	0.24	0.24	0.26	0.16
Fazenda Rural Zebu	3	2.90	0.33	0.46	0.36
Flores	3	0.80	0.20	0.17	0.07
Iguará	3	1.29	0.25	0.36	0.23
Lago Açu	3	0.01	0.22	0.22	0.19
Lago da Pedra	3	0.88	0.19	0.21	0.17
Miranda	3	0.74	0.23	0.22	0.09
Munim	3	1.08	0.20	0.26	0.16
Newton Belo	3	0.83	0.19	0.13	0.17
Nina Rodrigues	3	0.29	0.22	0.16	0.13
Paragominas	3	1.56	0.27	0.23	0.10
Pedras	3	0.30	0.21	0.24	0.23
Pedreiras II	3	0.18	0.25	0.30	0.22
Peritoró II	3	0.99	0.26	0.38	0.32
Pindaré-Mirim	3	0.01	0.23	0.22	0.18
Piritoró BR-316	3	1.69	0.25	0.25	0.07
Ponte BR-222	3	0.23	0.22	0.18	0.18
Santa Vitória	3	0.31	0.24	0.29	0.27
São João do Grajaú	3	1.93	0.23	0.30	0.37
São Mateus do Maranhão	3	0.44	0.24	0.31	0.29
Tucumã	3	1.60	0.21	0.29	0.17
Zé Doca (INMET)	3	1.82	0.19	0.06	0.14

Ananás	4	0.24	0.21	0.20	0.18
Araguaína (INMET)	4	2.32	0.19	0.11	0.21
Araguatins	4	0.88	0.20	0.23	0.15
Carolina	4	0.94	0.24	0.32	0.18
Carolina (INMET)	4	0.42	0.19	0.14	0.15
Fazenda Pedreiras	4	0.16	0.22	0.20	0.16
Fazenda Piranhas	4	1.06	0.17	0.12	0.14
Fazenda Sempre Viva	4	0.42	0.22	0.24	0.10
Fortaleza	4	1.56	0.23	0.33	0.23
Itacajá	4	1.00	0.24	0.21	0.07
KM Zero / PA-70	4	1.75	0.25	0.22	0.13
Marabá (INMET)	4	0.46	0.21	0.24	0.12
Palmeirante	4	0.41	0.21	0.14	0.10
Papagaio	4	1.35	0.21	0.24	0.09
Reta KM-32	4	2.11	0.20	0.06	0.02
São Sebastião do Tocantins	4	0.47	0.23	0.19	0.08
Tocantinópolis	4	1.68	0.17	0.14	0.20
Vale do Pindaré	4	0.79	0.22	0.30	0.20
Alto Bonito	5	2.71	0.31	0.35	0.21
Barro Duro	5	1.86	0.21	0.26	0.17
Cândido Mendes	5	2.25	0.23	0.31	0.30
Cururupu	5	0.74	0.27	0.27	0.11
Gonçalo	5	0.05	0.26	0.23	0.18
Guimarães	5	0.49	0.27	0.23	0.10
Maracaçumé	5	1.59	0.25	0.17	0.05
Pedro Rosário	5	0.67	0.25	0.13	0.14
Pimenta	5	0.88	0.28	0.14	0.15
Pinheiro	5	0.12	0.27	0.24	0.17
Presidente Jucelino	5	1.63	0.25	0.11	0.20
Santa Helena	5	0.65	0.28	0.15	0.11
São Bento	5	1.01	0.23	0.31	0.22
São Luís (INMET)	5	1.29	0.27	0.36	0.17
Tararua-Ponte	5	0.38	0.26	0.15	0.15
Tracuateua (INMET)	5	0.70	0.25	0.19	0.09
Turiaçu (INMET)	5	0.55	0.27	0.24	0.22
Visau	5	0.42	0.29	0.21	0.15