

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



TESE DE DOUTORADO

Antônia Silânia de Andrade

**Análise do Desempenho dos Índices Climáticos na
Execução do Monitoramento das Chuvas no Estado da
Paraíba**

**Campina Grande-PB
Fevereiro, 2025**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS ÍNDICES CLIMÁTICOS NA
EXECUÇÃO DO MONITORAMENTO DAS CHUVAS NO ESTADO DA
PARAÍBA**

ANTÔNIA SILÂNIA DE ANDRADE

CAMPINA GRANDE – PB

Fevereiro – 2025

ANTÔNIA SILÂNIA DE ANDRADE

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS ÍNDICES CLIMÁTICOS NA
EXECUÇÃO DO MONITORAMENTO DAS CHUVAS NO ESTADO DA
PARAÍBA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, seguindo às exigências para obtenção do Título de Doutora em Meteorologia.

Orientadora: Prof^a. Dra. Célia Campos Braga

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Subárea: Climatologia

CAMPINA GRANDE – PB

Fevereiro – 2025

A553a Andrade, Antônia Silânia de.
Análise do desempenho dos índices climáticos na execução do monitoramento das chuvas no Estado da Paraíba / Antônia Silânia de Andrade. – Campina Grande, 2025.
98 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2025.
"Orientação: Profa. Dra. Célia Campos Braga".
Referências.

1. Índices Climáticos - Paraíba. 2. Produtividade Agrícola - Paraíba. 3. Padrões Climáticos. 4. Monitoramento das Chuvas. 5. Extremos de Precipitação. I. Braga, Célia Campos. II. Título.

CDU 551.583:631(813.3)(043)

ANTÔNIA SILÂNIA DE ANDRADE

ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS ÍNDICES CLIMÁTICOS NA EXECUÇÃO DO
MONITORAMENTO DAS CHUVAS NO ESTADO DA PARAÍBA

TESE APROVADA EM 27/02/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 CELIA CAMPOS BRAGA
Data: 17/03/2025 08:56:59-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. CÉLIA CAMPOS BRAGA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente
 MADSON TAVARES SILVA
Data: 14/03/2025 12:04:33-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente
 JOSE IVALDO BARBOSA DE BRITO
Data: 16/03/2025 00:24:18-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente
 WERONICA MEIRA DE SOUZA
Data: 15/03/2025 11:28:28-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. WERÔNICA MEIRA DE SOUZA
Unidade Acadêmica de Garanhuns
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 Edicarlos Pereira de Sousa
Data: 15/03/2025 12:11:00-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. EDICARLOS PEREIRA DE SOUSA
Instituto de Formação de Educadores
Universidade Federal do Cariri

“Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”. (Josué 1:9)

AGRADECIMENTOS

Chegar ao termo desta tese é um marco que transcende os limites do esforço individual. É uma soma de encontros, aprendizados e contribuições de inúmeras pessoas que, direta ou indiretamente, moldaram este percurso. A cada uma delas, dedico este espaço com imensa gratidão.

À Célia minha orientadora e mentora, expresso minha profunda admiração e respeito. Sua sabedoria, “paciência” e paixão pelo o seu trabalho que iluminaram meu caminho nos momentos de dúvida. Sua dedicação vai além do acadêmico; ela inspira valores que levarei comigo.

Ao meu namorado André Penaforte, por todo amparo, incentivo e acima de tudo por ter acreditado junto comigo.

Aos colegas/Amigas da sala 209 (Geisse e Rebeca), que compartilharam desafios, vitórias e incertezas comigo. O ambiente de troca e apoio mútuo que criamos foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento como pesquisadora.

Ao colega Edivan por me ajudar na estrutura e a entender comandos de Java no script no Google Earth Engine.

À minha família, cujo amor e compreensão foram pilares inabaláveis nesta jornada. Vocês me sustentaram nos momentos mais difíceis e celebraram cada pequena conquista como se fosse a maior das vitórias. Este trabalho é um reflexo da força e do amor que vocês me oferecem todos os dias.

Aos amigos (Patrícia, Welinagila (Nah), Lorena) que, mesmo distantes das investigações acadêmicas, ofereceram ouvidos atentos, palavras de conforto e a leveza necessária para manter o equilíbrio. Vocês foram o respiro que tantas vezes precisei.

Agradeço também às instituições, aos professores e funcionários em especial a Secretaria Arilene Lucena que contribuíram para minha formação e para a realização desta pesquisa, bem como às oportunidades de aprendizado e crescimento que o Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) me proporcionou.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte Financeiro

Por fim, dedico esta tese a todos que, de alguma forma, acreditaram em mim, mesmo quando duvidei de mim mesma. Este trabalho não é apenas o resultado de um esforço acadêmico, mais sim uma jornada que me transformou, me fez crescer e me lembrou da força que existe dentro de mim.

Com o coração cheio de gratidão e emoção, encerro este ciclo com a certeza de que nenhuma conquista é solitária. Obrigada a todos.

RESUMO

Este estudo investiga a relação entre a variabilidade de índices climáticos e a produtividade agrícola no estado da Paraíba, com ênfase na análise do desempenho de índices climáticos para monitoramento das chuvas e na identificação de padrões climáticos de extremos de precipitação. O estado da Paraíba, caracterizado por apresentar uma diversidade climática, enfrenta desafios na gestão da água e da produção agrícola, tornando o monitoramento climático essencial para garantir a eficiência da agricultura local. Inicialmente, a pesquisa explora a aplicação de diferentes índices climáticos, como o Índice de Precipitação Padronizada (SPI) e Índice de Severidade de Seca (DSI), para avaliar a eficácia no monitoramento das chuvas no estado. A análise desses índices permite identificar variações na distribuição temporal e espacial das chuvas, essenciais para diagnosticar períodos secos e chuvosos. Além disso, o estudo aborda os padrões de extremos climáticos de precipitação, com foco em eventos de chuvas intensas e secas prolongadas, que têm se tornado mais frequentes devido às mudanças climáticas. A identificação desses padrões é crucial para a elaboração de estratégias de adaptação, como a escolha de variedades mais resistentes e a adoção de práticas de manejo que aumentem a resiliência das culturas. Por fim, a pesquisa investiga as relações entre a variabilidade climática e a produtividade agrícola, buscando compreender como os índices climáticos podem ser utilizados para prever a produtividade das lavouras, como grãos e frutas, em diferentes regiões do estado. A análise estatística das correlações entre os índices climáticos e a produtividade revela a sensibilidade das culturas a variações climáticas e fornece subsídios para o planejamento agrícola, visando mitigar os impactos negativos da variabilidade climática. O estudo contribui para o desenvolvimento de uma abordagem integrada de monitoramento climático, permitindo aos produtores rurais da Paraíba tomar decisões mais informadas, otimizar a produção e reduzir os riscos associados às mudanças climáticas.

Palavras chaves: Índices climáticos, extremos de precipitação, produtividade agrícola.

ABSTRACTS

This study investigates the relationship between the variability of climate indices and agricultural productivity in the state of Paraíba, with an emphasis on analyzing the performance of climate indices for monitoring rainfall and identifying climate patterns of extreme precipitation. The state of Paraíba, characterized by its climate diversity, faces challenges in water management and agricultural production, making climate monitoring essential to ensure the efficiency of local agriculture. Initially, the research explores the application of different climate indices, such as the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Drought Severity Index (DSI), to assess the effectiveness of monitoring rainfall in the state. The analysis of these indices allows identifying variations in the temporal and spatial distribution of rainfall, essential for diagnosing dry and rainy periods. In addition, the study addresses the patterns of extreme precipitation, focusing on events of intense rainfall and prolonged droughts, which have become more frequent due to climate change. Identifying these patterns is crucial for developing adaptation strategies, such as choosing more resistant varieties and adopting management practices that increase crop resilience. Finally, the research investigates the relationships between climate variability and agricultural productivity, seeking to understand how climate indices can be used to predict the productivity of crops, such as grains and fruits, in different regions of the state. Statistical analysis of the correlations between climate indices and productivity reveals the sensitivity of crops to climate variations and provides support for agricultural planning, aiming to mitigate the negative impacts of climate variability. The study contributes to the development of an integrated approach to climate monitoring, allowing rural producers in Paraíba to make more informed decisions, optimize production and reduce the risks associated with climate change.

Keywords: Climate indices, precipitation extremes, agricultural productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da estrutura da tese. 13

CAPITULO 2

Figura 1: Localização do Estado da Paraíba (Fonte: Autora, 2025)..... 30

Figura 2: Relevo do estado da Paraíba. (Fonte: Adaptado Brasil em Relevo, 2025)..... 31

Figura 3: Distribuição espacial dos totais médio anual da precipitação (mm) no período de 1962 a 2019. (Fonte: Autora, 2025). 32

Figura 4: Espacialização das regiões homogêneas da precipitação obtidas pelo método de Ward 1963 para o período de janeiro de 1962 a dezembro de 2019. (Fonte: Autora, 2025). 35

Figura 5: Variabilidade anual do SPI-3 para a Região Homogênea no Estado da Paraíba no período de 1962 a 2019. 43

Figura 6: Teste de Pettitt aplicado a Serie temporal do SPI-3 para o período de 1962-2019. 48

CAPITULO 3

Figura 1: Localização do Estado da Paraíba (Distribuição do DSI para o ano de 2023) (Fonte: Autora, 2025) 65

Figura 2: Fluxograma da rotina no GEE. (Fonte: Autora, 2025) 67

Figura 3: Totais médios mensais da Precipitação (mm) para as Regiões Homogêneas de precipitação do Estado da Paraíba para no período de 2000 a 2023..... 73

Figura 4: Variabilidade anual dos índices DSI-12 em azul e SPI-12 em vermelho para cada região homogênea..... 76

Figura 5: Digrama de dispersão e curva de regressão linear entre SPI e DSI para as seis Regiões Homogêneas (RH1-RH6)..... 78

Figura 6: Variabilidade espacial do DSI e SPI nos anos mais seco 2015 e 2012 e mais úmido de 2022 e 2009 para a RH-1 (Sertão)..... 79

Figura 7: Variabilidade espacial do DSI e SPI nos anos mais seco 2012 e 2001 e mais úmido 2020 e 2009 para a RH-2 (Alto Sertão) 81

Figura 8: Variabilidade espacial do DSI e SPI nos anos mais seco 2017 e 2015 e mais úmido 2011 e 2009 para a RH-3 (Cariri/Curimataú)..... 82

Figura 9: Variabilidade espacial do DSI e SPI nos anos mais seco 2021 e 2012 e mais úmido 2000 e 2011 para a RH-4 (Agreste)..... 83

Figura 10: Variabilidade espacial do DSI e SPI nos anos mais seco 2021 e 2010 e mais úmido 2009 e 2022 para a RH-5 (Brejo).	84
Figura 11: Variabilidade espacial do DSI e SPI nos anos mais seco 2012 e 2006 e mais úmido 2009 e 2022 para a RH-6 (Litoral).	85
Figura 12: Produção de Algodão em diferentes regiões homogêneas do Estado da Paraíba no período de 2000–2023, correlacionando com os índices de climáticos (DSI e SPI).....	88
Figura 13: Produção de Cana-de-açúcar em diferentes regiões homogêneas do Estado da Paraíba no período de 2000–2023, correlacionando com os índices de climáticos (DSI e SPI).	90
Figura 14: Produção de Feijão em diferentes regiões homogêneas do Estado da Paraíba no período de 2000–2023, correlacionando com os índices de climáticos (DSI e SPI).....	92

LISTA DE TABELAS

CAPITULO 2

Tabela 1: Caracterização dos eventos secos e chuvosos segundo o SPI..... 38

Tabela 2: Resultado do teste não-paramétrico de Mann-Kendall aplicado ao Estado da Paraíba para o SPI-3 no período de 1962-2019..... 46

Tabela 3: Probabilidade de ocorrência de categorias dos eventos secos e chuvosos nas RHs no Estado da Paraíba, para a escala do SPI-3..... 49

CAPITULO 3

Tabela 1. Conjunto de dados usados no estudo..... 66

Tabela 2. Classificação da severidade da seca dos índices DSI e SPI..... 72

LISTA DE QUADROS

CAPITULO 3

Quadro 1. Equações e variáveis do DSI..... 70

Quadro 2. Equação e variáveis do SPI..... 71

LISTA DE SIGLAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas

ANA - Agência Nacional das Águas

API - Application Programming Interfaces

CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data)

DOLs - Distúrbios Ondulatórios de Leste

DSI - Drought Severity Index (Índice de Severidade de Seca)

EOS - Earth Observing System

ETP - Evapotranspiração Potencial

EVI - Enhanced Vegetation Index

GEE - Google Earth Engine

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)

REM - Radiação Eletromagnética

RH - Regiões Homogêneas

SPI - Standardized Precipitation Index (Índice de Precipitação Padronizado)

VCANs - Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

WMO - World Meteorological Organization

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS ÍNDICES CLIMÁTICOS NA EXECUÇÃO DO MONITORAMENTO DAS CHUVAS NO ESTADO DA PARAÍBA	4
ESTRUTURA DA TESE	13
CAPITULO 1	14
1. INTRODUÇÃO	14
2. JUSTIFICATIVA	15
3. OBJETIVOS	16
3.1. Objetivo geral	16
3.2. Objetivos específicos	16
4. REVISÃO DE LITERATURA	16
4.1. Climatologia da chuva no Nordeste brasileiro e no estado da Paraíba	16
4.2. Sensoriamento remoto	17
4.3. Índices de seca	18
4.4. Índice Severidade de Seca (Drought Severity Index – DSI)	20
4.5. Análises de Séries temporais	21
5. REFERÊNCIAS	22
CAPITULO 2	27
PADRÕES CLIMÁTICOS DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DA PARAÍBA	27
RESUMO	27
ABSTRACTS	28
1. INTRODUÇÃO	29
2. MATERIAIS E MÉTODOS	30
2.1. Área de estudo	30
2.2. Clima e relevo	30
2.3. Dados Utilizados	32
2.4. Metodologia	33
2.4.1. Análise de agrupamento (AA)	33
2.4.2. Regiões Homogêneas da precipitação na Paraíba	34
2.4.3. Standardized Precipitation Index – SPI (Índice de precipitação padronizado)	35
2.4.4. Teste de Mann-Kendall	38
2.4.5. Estimador de inclinação de Sen’s slope (Sen)	39
2.4.6. Teste Não Paramétrico de Pettitt	40
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42

3.2. Análise do Índice Padronizado de Precipitação (SPI)	42
3.3. Análise de tendência	45
Figura 6: Teste de Pettitt aplicado a Serie temporal do SPI-3 para o período de 1962-2019.	48
3.4. Probabilidade de ocorrência de diferentes categorias de período úmido e seco	49
4. CONCLUSÃO	51
5. REFERÊNCIAS	52
6. ANEXOS	57
CAPÍTULO 3	63
RELAÇÕES ENTRE A VARIABILIDADE DE ÍNDICES CLIMÁTICOS E A PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA NO ESTADO DA PARAÍBA	63
RESUMO	63
ABSTRACT	63
1. INTRODUÇÃO	64
2. MATERIAIS E MÉTODOS	65
2.1. Área de estudo	65
2.2. Obtenção dos dados para o estudo	66
2.3. Análise dos dados	69
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
3.1. DSI e SPI	74
3.2. Espacialização dos índices DSI e SPI	79
3.3. Produtividade agrícola associada a índices climáticos	86
4. CONCLUSÃO	94
5. REFERÊNCIAS	95
CAPÍTULO 4	98
CONSIDERAÇÕES FINAIS	98

ESTRUTURA DA TESE

A estrutura proposta para a tese consiste na seguinte forma: O Capítulo 1 aborda a introdução, justificativa, objetivo geral e específicos, assim como a revisão de literatura. Capítulo 2 faz-se uma explanação da identificação e compreensão da variabilidade espaço temporal de eventos de secos e chuvosos sazonal (SPI-3) ocorridos no Estado da Paraíba no período de 1962 a 2019, por meio de técnicas multivariadas e análise de tendência, por fim quantifica a frequência e intensidade de eventos secos e chuvosos na Paraíba. Capítulo 3 consiste em uma comparação no desempenho dos índices SPI e DSI, utilizando dados observados e obtidos remotamente através do Google Earth Engine (GEE) e avalia o impacto desses índices na produtividade agrícola do Estado. Por fim no Capítulo 4 serão apresentadas as considerações finais da tese. Na figura 1 a seguir consta as etapas desenvolvidas na tese.



Figura 1: Esquema da estrutura da tese.

CAPITULO 1

1. INTRODUÇÃO

A variabilidade climática é um dos principais fatores que influenciam a dinâmica ambiental, a produtividade agrícola e a gestão dos recursos hídricos, especialmente em regiões semiáridas, como o estado da Paraíba. Essas regiões são marcadas por irregularidades na distribuição espacial e temporal das chuvas, o que resulta em períodos frequentes de seca e condições hídricas adversas. Nesse contexto, o monitoramento das chuvas e a utilização de índices climáticos como ferramentas de análise desempenham um papel crucial na compreensão e mitigação dos impactos gerados por esses fenômenos.

A seca é um dos fatores de influência mais complexo que é impulsionada principalmente pela variabilidade natural do clima e, é caracterizada por desenvolvimento lento de longa duração e com uma ampla gama de influência (Zeng et al., 2022; Zhang et al., 2022). Como consequência das mudanças climáticas globais, a ocorrência de fenômenos climáticos extremos, como a seca, tem se intensificado gradativamente (Qi et al., 2019; Wang et al., 2021).

Vários estudos focaram no desenvolvimento e melhoria de vários índices de seca, alcançando resultados promissores (Brown et al., 2008; Zeng e et al., 2022). Entre eles, SPI e SPEI podem ser calculados com base em escalas de tempo mais longas para refletir as condições de seca agrícola e hidrológica (Russo et al., 2013; Wang et al., 2021).

Entre os índices climáticos mais utilizados o Índice de Precipitação Padronizado (SPI). O SPI é amplamente reconhecido por sua capacidade de avaliar déficits e excessos de precipitação em diferentes escalas temporais, permitindo identificar eventos de seca ou enchentes com maior precisão. Já o Índice de Severidade de Seca (DSI) é um índice que vem sendo estudado que considera o impacto da seca sob o ponto de vista de sua severidade em termos de condições hídricas e ambientais. Esses índices são essenciais para o diagnóstico de eventos climáticos extremos e para a formulação de estratégias de adaptação e mitigação.

No estado da Paraíba, a diversidade de paisagens e condições climáticas cria cenários distintos em suas regiões homogêneas (RHs). A variabilidade pluviométrica é um dos desafios mais significativos, particularmente em áreas como o Sertão, Alto Sertão, Cariri e Curimataú onde a escassez hídrica é mais intensa. Em contrapartida, regiões como o Brejo e o Litoral apresentam maior estabilidade hídrica, o que confere resiliência relativa aos sistemas agrícolas locais. Esse contraste reforça a necessidade de uma abordagem regionalizada para o monitoramento e análise climática.

A agricultura, uma das principais atividades econômicas da Paraíba, é diretamente influenciada pelas condições climáticas. Culturas como milho, feijão e cana-de-açúcar, que predominam no estado, dependem de chuvas regulares e adequadas para garantir produtividade satisfatória. Períodos de seca severa, identificados por índices como o SPI e o DSI, frequentemente resultam em reduções drásticas na produção, impactando negativamente a segurança alimentar e econômica da região. Assim, a utilização de índices climáticos no planejamento agrícola e na gestão hídrica é imprescindível para minimizar os prejuízos e maximizar os benefícios em anos climáticos mais favoráveis.

Dessa forma, a análise da variabilidade climática e o uso de índices como SPI e DSI são fundamentais para entender os impactos das mudanças climáticas na produtividade agrícola da Paraíba. O presente estudo busca preencher essa lacuna, fornecendo subsídios para a gestão hídrica e o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à resiliência climática no estado.

2. JUSTIFICATIVA

A análise do desempenho dos índices climáticos na execução do monitoramento das chuvas no estado da Paraíba é essencial devido à relevância dos recursos hídricos para a região. A Paraíba está inserida em uma área semiárida, caracterizada por chuvas irregulares e vulnerabilidade a eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e enchentes localizadas. Tais fenômenos têm impactos diretos na agricultura, no abastecimento de água, na geração de energia e na qualidade de vida das populações.

O estudo deste tema permite identificar padrões e tendências nas variabilidades climáticas, oferecendo subsídios para a formulação de estratégias de mitigação e adaptação aos eventos climáticos adversos. Além disso, a validação e o aprimoramento dos índices climáticos são fundamentais para melhorar a precisão das previsões e o planejamento de ações voltadas para a gestão sustentável dos recursos naturais.

Ao avaliar o desempenho dos índices climáticos no monitoramento das chuvas, o estudo contribui para a tomada de decisão em áreas estratégicas, como planejamento agrícola, gestão de bacias hidrográficas e políticas públicas voltadas para a convivência com o semiárido. Isso fortalece a resiliência das comunidades locais diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e garante um melhor aproveitamento dos períodos de chuva, minimizando os impactos das irregularidades pluviométricas.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Avaliar o desempenho dos índices climáticos SPI e DSI para o monitoramento de secas e de chuvas no Estado da Paraíba.

3.2. Objetivos específicos

- ✓ Determinar Regiões Homogêneas do Índice de Precipitação Normalizada em diferentes escalas de tempo para o Estado da Paraíba no período de 1962-2019;
- ✓ Quantificar a frequência e intensidade de eventos secos e chuvosos na Paraíba;
- ✓ Avaliar a aplicabilidade do Índice DSI às condições climáticas da Paraíba;
- ✓ Realizar a análise comparativa entre dados medidos de SPI-12 obtidos de estações / postos meteorológicos e de DSI-12 obtido remotamente nas distintas regiões homogêneas do Estado.
- ✓ Verificar a associação dos índices analisado com a produtividade agrícola de culturas com ciclos curtos e longos.

4. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão bibliográfica foi dividida em quatro tópicos, com os principais temas abordados na pesquisa. O primeiro tópico (4.1) aborda a climatologia do regime de chuva no Nordeste brasileiro e em destaque o estado da Paraíba; o segundo (4.2) trata o sensoriamento remoto e as suas múltiplas funcionalidades para análise climatológica; o terceiro (4.3) refere-se ao desenvolvimento e a importância dos índices de seca nos estudos de vulnerabilidade e escassez hídrica no estado; e o último (4.4) diz respeito à relevância de monitorar a seca e sua ferramenta de apoio à decisão na gestão de risco.

4.1. Climatologia da chuva no Nordeste brasileiro e no estado da Paraíba

A distribuição espacial e temporal das chuvas no Nordeste brasileiro é um dos elementos climáticos mais importantes para o entendimento das dinâmicas ambientais e socioeconômicas da região. O clima semiárido prevalente em grande parte do Nordeste, associado à irregularidade pluviométrica, afeta diretamente atividades como a agricultura, a gestão dos recursos hídricos e a segurança alimentar (Moura et al., 2007). O estado da Paraíba é um exemplo significativo dessa realidade, apresentando diferentes padrões de precipitação em suas regiões hidrográficas, que vão desde áreas úmidas no litoral até zonas mais semiárida na região central do estado.

A climatologia das chuvas no Nordeste é influenciada por sistemas atmosféricos como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs), os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) e a atuação de fenômenos globais, como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS). Esses sistemas podem atuar de forma combinada, determinando a variabilidade pluviométrica da região. Em particular, o ENOS é um dos principais moduladores da precipitação no Nordeste, sendo o El Niño associado à redução das chuvas e o La Niña ao aumento delas (Reboita et al., 2010).

No estado da Paraíba, as características climáticas refletem a diversidade das condições atmosféricas regionais. O litoral, por exemplo, apresenta maior regularidade na ocorrência de chuvas, com uma média anual superior a 1.500 mm, enquanto o Sertão, caracterizado pelo clima semiárido, possui chuvas escassas e concentradas em poucos meses do ano (Alves et al., 2019). Essa variação regional ressalta a importância do monitoramento das chuvas para compreender a dinâmica climática e orientar ações voltadas à mitigação de impactos.

4.2. Sensoriamento remoto

A definição clássica de sensoriamento remoto é que ele consiste na obtenção de informações sobre uma área específica da superfície terrestre, que pode ser chamada de alvo, por meio de imagens, sem contato físico entre o sensor e o objeto. Segundo Meneses (2012), o conceito mais científico é uma ciência que visa desenvolver a aquisição de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa da resposta à interação dos objetos imagem com a radiação eletromagnética. O conceito consiste essencialmente num conjunto de tecnologias que permitem que a luz rebata num alvo na superfície terrestre, captando imagens com sensores localizados em satélites ou outros veículos espaciais (Bossle, 2017; Mendonça, 2019).

As informações são derivadas usando sensores para medir a radiação eletromagnética (REM) refletida ou emitida pelo alvo. O espectro REM é dividido em regiões ou intervalos de diferentes comprimentos de onda (chamados de bandas). As bandas mais comumente usadas em sensoriamento remoto por satélite incluem as regiões do visível-VIS (comprimento de onda 0,4–0,7 μm); infravermelho-IR (comprimento de onda 0,7–100 μm) subdividida em infravermelho próximo de 0,7-1,3 μm , infravermelho de 1,2 -2,5 μm e infravermelho médio 3,5–5 μm , infravermelho termal-TIR de 8–14 μm e microondas (comprimento de onda de 3,2–100 cm) (Meneses; Almeida; Baptista, 2019; Kumar; Reshmidevi, 2013).

Um mosaico de paisagem típico é composto de várias unidades bidimensionais que podem ser descritas através de sua configuração, ou seja, os seus arranjos espaciais, tais como

a sua forma ou topologia, e a sua composição, isto é, o seu tipo de cobertura do solo e uso da terra. Dois paradigmas complementares podem ser usados para modelar tais mosaicos, dependendo de como suas unidades constitutivas são tratadas, sejam elas, paisagens vetoriais e raster (Kaufmann et al., 1994; LI.; Reynolds, 1994)

Nas paisagens vetoriais, os segmentos são descritos de acordo com as coordenadas exatas dos elementos de fronteira e estão associados aos tipos de cobertura do solo. Embora conceitualmente consistente com as propriedades observadas dos fragmentos, esta abordagem é menos estudada que o raster (Bonhomme et al., 2017). No entanto, a maioria dos modelos usa um processo de "rasterização" para converter paisagens retas ou vetoriais em pixels de acordo com uma grade regular. Essa abordagem é muito comum por pelo menos dois motivos. Os equipamentos de sensoriamento remoto também usam esse formato baseado em grade, o que torna a modelagem mais simples porque os pixels adjacentes e sua geometria são restringidos por uma representação matricial que reproduz padrões de paisagem observados e, às vezes, trazem percepções profundas sobre os processos subjacentes.

4.3. Índices de seca

Os índices de seca foram criados com o intuito de identificar, avaliar e monitorar o grau de severidade da seca e o seu tempo de duração. Além disso, podem se adaptar a diferentes perspectivas ou categorias de seca. São consideradas ferramentas úteis para a compreensão e avaliação dos fenômenos meteorológicos, hidrológicos e agrícolas, pois são responsáveis pelo monitoramento, caracterização temporal e espacial. O uso dos índices, quando aliados a outras técnicas de análise, possibilita identificar padrões de variabilidade temporal e espacial e tendências dentro das regiões em estudo (Medeiros, et al., 2016; Rosa, et al., 2011).

O estudo da precipitação possibilita o desenvolvimento de vários índices com finalidade de identificar o déficit dessa variável, a partir de Índices tais como: Índice Precipitação Padronizado (Standardized Precipitation Index - SPI), Índice de Precipitação e Evapotranspiração Padronizado (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index -SPEI), Índice da Anomalia da Precipitação (Anomaly Precipitation Index), Índice Chinês Z (China Z Index), dentre outros. Dentre os índices citados, destaca-se o SPI, o qual tem sido amplamente utilizado em pesquisas e foi reconhecido pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO), como um índice de referência global para os estudos de seca meteorológica (Ribeiro Neto, 2017; Hayes et al., 2011).

O SPI apresenta uma série de vantagens associadas ao seu uso, sendo elas: possibilidade de determinação do tempo de retorno da seca, ampla flexibilidade (aplica-se em diferentes

escalas temporais), simplicidade de aplicação, versatilidade (pode ser combinado com outras variáveis), capacidade de adequação às diversas situações climáticas (permite a análise espacial e a comparação de diferentes regiões), possibilita o monitoramento e aviso prévio da seca (Santos, 2020; Svoboda e Fuchs, 2017; Santos e Portela, 2010; López-Moreno et al., 2009;).

Diversos estudos já foram realizados para analisar a capacidade do SPI em identificar e caracterizar eventos de secas. Por exemplo, os trabalhos desenvolvidos por Ganapathi (2018), Zarch et al. (2015) e Wu et al. (2007), onde o primeiro utilizou as informações advindas do índice para identificar a gravidade da seca no Distrito Ahmednagar, na Índia. O autor constatou que o SPI pode ser usado como ferramenta para fins de avaliação e monitoramento da seca na região, podendo ser aplicado em diversas escalas temporais e espaciais, com o intuito de trazer uma melhor análise da severidade da seca. O segundo estudo, os autores analisaram a tendência de ocorrência de secas, no período de 1960 a 2009, para as várias zonas climáticas do planeta. Com isso, eles chegaram à conclusão de que o SPI não tem a capacidade de identificar secas futuras diante da ocorrência do aquecimento global, necessitando assim, ser associado a outros índices. Já na terceira pesquisa os autores, analisaram a atuação do clima árido e dos períodos secos na determinação do SPI de curto prazo para os EUA. Neste estudo, os autores concluíram que, quando existe uma grande quantidade de dias sem ocorrência de precipitação (valor zero), os valores de SPI não indicam adequadamente a ocorrência de secas. Além disso, os autores pedem aos usuários que sejam cautelosos ao aplicar e analisar os valores de SPI em regiões com regimes climáticos variáveis, no caso de clima mais seco, deve-se focar na duração da seca e não apenas na sua gravidade.

Em termos nacionais, os pesquisadores Silva et al. (2020), Gandu et al. (2015), Fachine (2015) e Macedo et al. (2011) realizaram estudos com o intuito de aplicar o SPI no monitoramento e caracterização das secas para vários estados, utilizando uma escala regional, que foi adaptada para a área de estudo. O trabalho realizado por Silva et al. (2020) buscou caracterizar os eventos extremos e suas causas climáticas através da utilização do SPI para o Leste do Nordeste Brasileiro. Desse modo, eles concluíram que, o SPI mostrou-se capaz de quantificar eventos de seca ou de abundância de chuvas, assim como monitorar a precipitação, revelando ser uma ferramenta eficiente para ser utilizada na mitigação de secas.

Já o estudo realizado por Fachine (2015), teve como finalidade identificar as secas meteorológicas na região Metropolitana de Fortaleza, através do SPI. Para a realização da pesquisa, foi utilizado o SPI na escala quadrimestral (04 meses), correspondendo aos meses de fevereiro a maio. Os eventos de seca apontados pelo índice foram correlacionados com os

episódios de El Niño, La Niña, Dipolo do Atlântico Tropical e com a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Desse modo, verificou-se que, quase todos os eventos de seca encontrados pelo índice foram em anos de atuação do fenômeno El Niño, em conjunto com o gradiente meridional de anomalia da Temperatura de Superfície do Mar (TSM). Além disso, também foi observado pelo autor que, as principais secas ocorridas na área de estudo, foram classificadas entre moderadas a severas.

Macedo et al. (2011) realizaram o monitoramento e a identificação da intensidade das secas, assim como dos períodos chuvosos para a cidade de Campina Grande no estado da Paraíba. Para isso, os autores utilizaram o SPI em diversas escalas temporais (01, 03, 06, 12 e 24) e constataram que o índice expressa de forma satisfatória a realidade pluviométrica da região. Neste mesmo contexto, os pesquisadores Gandu, Silva e Martins (2015) buscaram identificar os eventos de seca ocorridos no estado do Ceará, através do SPI. Dessa forma, concluíram que, o SPI nas escalas entre 24 e 36 meses mostraram identificar bem o início e a duração da seca hidrológica no estado. Nascimento et al. (2017) utilizaram a metodologia do SPI para quantificar os eventos extremos de seca e chuva no estado do Maranhão no período de 1987- 2015. Os autores delimitaram o estado em 5 cinco regiões homogêneas, e que o SPI-6 explica bem o regime pluviométrico. A maioria dos eventos secos /chuvosos ocorreram em anos El Niño/La Niña.

Além disso, vários trabalhos têm mostrado que é viável utilizar dados de precipitação advindos de satélites no cálculo do SPI, e que essa técnica apresenta concordância quando comparada aos valores de SPI obtidos através de dados de sensoriamento remoto e postos pluviométricos (Sousa Júnior et al., 2021; Yan et al., 2014; Naumann et al., 2012; Rhee et al., 2010).

4.4. Índice Severidade de Seca (Drought Severity Index – DSI)

O DSI foi desenvolvido para identificar anomalias hídricas em diferentes escalas temporais e espaciais. De acordo com Vicente-Serrano et al. (2010), índices como o DSI são fundamentais para o gerenciamento de recursos hídricos e para a mitigação dos impactos das secas em setores econômicos e ambientais. O DSI permite comparar a severidade das secas em diferentes regiões, levando em conta variáveis climáticas.

O Índice Severidade de Seca - DSI proposto por Mu et al., 2013, utiliza dados de sensores remoto (satélite) em sua composição, afim de monitorar e detectar a seca sobre a superfície terrestre, aumentando quase em tempo real a capacidade de monitoramento de secas sem muitas das restrições encontradas nos métodos mais tradicionais. O algoritmo DSI foi

desenvolvido usando derivados de satélite como: evapotranspiração (ET), evapotranspiração potencial (PET), e NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), produtos utilizados para detectar e monitorar as secas em uma base global. Segundo o autor, a ET é uma métrica do estado funcional dos ecossistemas e está diretamente relacionada com os ciclos de água, carbono e energia da superfície da terra. A relação entre ET e PET é comumente utilizada como um indicador de disponibilidade de água terrestre associado à umidade ou seca. Para cada período composto de 8 dias, mensal e anual, calcula-se a proporção de ET para PET como o desvio padrão temporal da proporção (σ Ratio) e proporção média (\overline{Ratio}).

Silva et al. (2017), utilizaram (DSI), para identificar regiões propensas à seca em escala espacial nos estados do CE, RN, PB, PE e Al, nos anos de 2010 e 2016. Os resultados apontaram variações de DSI nos anos em estudo, no ano de 2010 foram registrados altos padrões de seca no sertão das regiões. Já no ano de 2016 O DSI apresentou maior alcance temporal, com índice de seca extrema.

4.5. Análises de Séries temporais

A definição de séries temporais diz respeito a um conjunto de informações, ou observações, de uma variável ao longo do tempo. Geralmente estas informações são capturadas consecutivamente e igualmente espaçadas, resultando assim em uma sequência ordenada no tempo, e pode ser considerada uma série temporal discreta ou contínua, estacionária ou não estacionária, homogênea ou heterogênea tanto no contexto univariado como no multivariado (Box et al., 2015).

O uso de técnicas multivariadas associadas à geoestatística tem permitido abordagens eficientes, principalmente por considerar, conforme Silva et al. (2010), simultaneamente, a variação espacial de um número elevado de variáveis. Destaca-se também os testes não-paramétrico de Pettitt e Mann-Kendall, os quais são aplicados para identificar se existe uma tendência na série avaliada entre outros.

A análise multivariada - AM é um método estatístico primordial que consiste em analisar simultaneamente múltiplas medidas indivíduos ou objeto sob investigação, obtendo-se padrão de similaridades regionalizado, a partir de suas características peculiares. Em síntese as técnicas de estatísticas multivariadas são usadas para simplificação dos dados por meio da redução de sua dimensão, agrupamentos dos dados, estudo da dependência entre eles e construção de testes de hipóteses (Wilks et al., 2017; Freitas et al., 2013; Hair et al., 2009).

O teste de Mann-Kendall é um método robusto, sequencial e não paramétrico usado para avaliar se determinada série de dados possui uma tendência temporal de alteração

estatisticamente significativa. Por se tratar de um método não paramétrico, este método não requer que os dados apresentem distribuição normal, em virtude disso o teste é frequentemente utilizado para o cálculo de tendências em séries de variáveis ambientais (Yue et al., 2002).

5. REFERÊNCIAS

Alves, J. A.; Araújo, L. M.; Lima, V. F. (2019) Impactos das secas sobre a agricultura no semiárido nordestino: o caso da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n. 1, p. 73-90.

Barreto, E.C.A. (2015). Avaliação do desempenho do sistema de previsão por conjuntos do CPTEC/INPE na detecção de vórtices ciclônicos de altos níveis na região tropical. (*Dissertação de Mestrado*), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

Blain, G.C.; Pezzopane, J.R.M.; Pezzopane, J.E.M.; Bonomo, R. (2010). Índice Padronizado de Precipitação aplicado às condições de seca no Estado do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 10, p. 1067-1073. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010001000007>

Bonhomme, Vincent et al. (2017). Configurational changes of patchy landscapes dynamics. *Ecological Modelling*, v. 363, p. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.08.007>

Bossle, R.C. (2017). *QGIS e geoprocessamento na prática*. 2. ed. São José dos Pinhais, SP: Edição do Autor.

Box, G. E. P.; Jenkins, G. M.; Reinsel, G. C.; Ljung, G. M. (2015). Time series analysis: forecasting and control. [S.l.]: *John Wiley & Sons*.

Brown, J. F., Wardlow, B. D., Tadesse, T., Hayes, M. J., & Reed, B. C. (2008). The vegetation drought response index (VegDRI): A new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation. *GIScience & Remote Sensing*, v. 45, n.1, p.16–46. DOI: <https://doi.org/10.2747/1548-1603.45.1.16>

Dikici, M. (2020). Drought Analysis With Diferente Indices for the Asi Basin (Turkey). *Scientific Reports*, v.10, n.20739. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77827-z>

Fechine, J.A.L. (2015). Identificação de secas meteorológicas na região metropolitana de Fortaleza, usando o Índice de Precipitação Padronizada (SPI). *Boletim de Geografia*, v. 33, n. 2, p. 18. DOI: [10.4025/bolgeogr.v33i2.22671](https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v33i2.22671)

Freitas, J. C.; Andrade, A. R. S.; Braga, C. C., Neto, A. H. G., Almeida, T. F. (2013). Análise de Agrupamentos na Identificação de Regiões Homogêneas de Índices Climáticos no Estado da Paraíba, PB – Brasil. *Brasileira de Geografia Física*, v.6, n.4, p.732 – 748.

Ganapathi, H. (2018). Assessment of drought severity using Standard Precipitation Index in Ahmednagar district, India. *Assessment*, v. 5, n. 5, p. 1777-1780. ISSN: 2395-0056

Gandu, A.W.; Silva, R.F.; Martins, E.S. (2015). Drought identification in Ceará state using the Standardized Precipitation Index (SPI). Proceedings of the VI *Simpósio Internacional de Climatologia*, Natal, Brazil, p.13-16.

Hair, F. J.; Black, W. C.; Babin, B. J.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L. (2009). Análise Multivariada de Dados. *Bookman*, p. 688, Porto Alegre.

Hayes, M.J.; Svoboda, M.V.; Wall, N.; Widhalm, M. (2011) The Lincoln Declaration on Drought Indices: universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, n. 92, v. 4, p. 485- 488. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>

Kaufmann, M.R. et al. (1994). An Ecological Basis for Ecosystem Management. Colorado, EUA: United States Department of Agriculture (USDA), *Forest Service*.

Kumar, D. Nagesh; Reshmidevi, T. V. (2013). Remote sensing applications in water resources. *Journal of the Indian Institute of Science*, v. 93, n. 2, p. 163–188. DOI: https://doi.org/10.1142/9789812777614_0008

Li, H.; Reynolds, J. F. (1994). A Simulation Experiment to Quantify Spatial Heterogeneity in Categorical Maps. *Ecology*, [s. l.], v. 75, n. 8, p. 2446–2455. DOI: <https://doi.org/10.2307/1940898>

Liu, X. F., Feng, X. M., Ciais, P., Fu, B. J., Hu, B. Y., & Sun, Z. L. (2020). Grace satellite-based drought index indicating increased impact of drought over major basins in China during 2002–2017. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.291, n.11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108057>

Lopez-Moreno, J.I.; Vicente-Serrano, S.M.; Beguería, S.; García-Ruiz, J.M.; Portela, M.M. et al. (2009). Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The Lower River Tagus, Spain and Portugal. *Water Resour. Res.*, v. 45, n. 2, p. W02405. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008WR007198>

Macedo, M.J.H.; Guedes, R.V.D.S.; Sousa, F.D.A.S. (2011). Monitoramento e intensidade das secas e chuvas na cidade de Campina Grande/PB. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 8, p. 105-117. DOI: [10.5380/abclima.v8i0.25797](https://doi.org/10.5380/abclima.v8i0.25797)

Mckee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, 17-22 January 1993, 179-184.

Medeiros, G.C.S. de; Maia, A.G.; Medeiros, J.D.F. de. (2016) Seca Hidrológica: uma abordagem sob a perspectiva da demanda hídrica. *Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Aracaju: Departamento de Engenharia Ambiental, p. 1-8.

Mendonça, R. R. (2019). Dinâmica da Vegetação através do índice de vegetação e sua relação com variáveis meteorológicas no município de INGÁ-PB. (*Dissertação de Mestrado*). Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, 56 f.

Meneses, P.R.; Almeida, T.; Baptista, G.M.M. (2019). Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação. São Paulo: *Oficina de Texto*.

Moura, M. S. B.; Galvêncio, J. D.; Sedyama, G. C. Variabilidade climática e suas implicações na agricultura do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 4, p. 307-315, 2007.

MU, Qiaozhen et al. (2013) A remotely sensed global terrestrial drought severity index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, [s. l.], v. 94, n. 1, p. 83–98. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00213.1>

Naumann, G.; Barbosa, P.; Carrao, H.; Singleton, A.; Vogt, J. (2012). Monitoring Drought Conditions and Their Uncertainties in Africa Using CHIRPS Data. *American Meteorological Society, Journal of Applied meteorology and Climatology*, v. 51, n. 10, p. 1867-1874. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0113.1>

Qi, J., Zhang, X., & Wang, Q. (2019). Improving hydrological simulation in the Upper Mississippi River Basin through enhanced freeze-thaw cycle representation. *Journal of Hydrology*, v.571, p.605–618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.020>

Reboita, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

Ribeiro Neto, G.G. (2017). Monitoramento e Caracterização de Secas da América do Sul com Sensoriamento Remoto. (*Dissertação de Mestrado*), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 76p.

Russo, S., Dosio, A., Sterl, A., Barbosa, P., & Vogt, J. (2013). Projection of occurrence of extreme dry-wet years and seasons in Europe with stationary and nonstationary Standardized Precipitation Indices. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, v.118, n.14, p.7628–7639. DOI: <https://doi.org/10.1002/jgrd.50571>

Santos, J.F.; Portela, M.M. (2010). Caracterização de Secas em Bacias Hidrográficas de Portugal Continental: Aplicação do Índice de Precipitação Padronizada, SPI, a Séries de Precipitação e de Escoamento. Lisboa: *Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos*, p. 1-19.

Santos, K.M.S. (2020) Avaliação da Eficiência do Monitor de Secas para Definição de Secas em Sergipe. (*Dissertação de Mestrado*), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 147 p.

Silva, D.F da.; Lima, M.J.S.; Souza Neto, P.F.; Gomes, H.B.; Silva, F.D.S. et al. (2020). Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no Índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 2, p. 449-464. DOI: [10.26848/rbgf.v13.2.p449-464](https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p449-464)

Silva, M. O.; Freire, M. B. G. S.; Mendes, A. M. S.; Freire, F. J.; Campos, M. C. C.; Amorim, L. B. (2010). Discriminação de diferentes classes de solos irrigados com águas salinas, na região de Mossoró, RN, com o uso de análise multivariada. *Ambiência*, v. 6, n. 2, p. 261-270.

Sousa Jr, M.F.de; Uliana, E.M.; Carvalho, M.- A.C.C.de; Mendes, M.A.D.S.A.; Lisboa, L. (2021). Monitoramento de seca meteorológica com dados CHIRPS para uma região produtora

de grãos do Brasil. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 2. DOI: [10.6008/CBPC2179-6858.2021.002.0024](https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.002.0024)

Svoboda, M.; Fuchs, B. (2017). *Handbook of Drought Indicators and Indices Integrated Drought Management Programme (IDMP)*. World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), Integrated Drought Management Programme (IDMP), *Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2*. Geneva.

Vicente-Serrano, S. M., Begueria, S., & Lopez-Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, v.23, n.7, p.1696–1718, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009jcli2909.1>

Wable, P.S.; JHA, M.K.; Shekhar, A. (2019). Comparison of Drought Indices in a SemiArid River Basin of India. *Water Resources Management*, v.33, n.1, p.75–102. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2089-z>

Wang, Q., Zeng, J., QI, J., Zhang, X., Zeng, Y., Shui, W., Xu, Z., Zhang, R., Wu, X., & Cong, J. (2021). A multi-scale daily SPEI dataset for drought characterization at observation stations over mainland China from 1961 to 2018. *Earth System Science Data*, v.13, n.2, p.331–341. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-13-331-2021>

Wilk, J.; Andersson, L.; Graham, L. P.; Wikner, J. J.; Mkwato, S.; Petja, B. (2017). From forecasts to action – what is needed to make seasonal forecasts useful for South African smallholder farmers?. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 25, p. 202-211. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.07.002>

Wu, H.; Svoboda, M.D.; Hayes, M.J.; Wilhite, D.A.; We, F. (2007). Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology*, v. 27, n. 1, p. 65-79. DOI: [10.1002/joc.1371](https://doi.org/10.1002/joc.1371)

Wu, X., Zhang, R., Bento, V. A., Leng, S., QI, J., Zeng, J., & Wang, Q. (2022). The effect of drought on vegetation gross primary productivity under different vegetation types across China from 2001 to 2020. *Remote Sensing*, v.14, n.18, p.4658. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14184658>

Yan, N.; Wu, B.; Chang, S.; Bao, X. (2014). Evaluation of CHIRPS Precipitation Product for Meteorological Drought Monitoring in Hai Basin. 35th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE35), IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, p. 012093. DOI: [10.1088/1755-1315/17/1/012093](https://doi.org/10.1088/1755-1315/17/1/012093).

Yue, S.; Pilon, P.; Cavadias, G. (2002). Power of the Mann-Kendall and spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, v. 259, n. 1-4, p. 254-271. DOI: [10.1016/S0022-1694\(01\)00594-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7)

Zarch, M. A.A.; Sivakumar, B.; Sharma, A. (2015). Droughts in a warming climate: a global assessment of Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought index (RDI). *Journal of Hydrology*, v. 526, p.183-195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.071>

Zeng, J., Zhang, R., QU, Y., Bento, V. A., Zhou, T., Lin, Y., Wu, X., Qi, J., Shui, W., & Wang, Q. (2022). Improving the drought monitoring capability of VHI at the global scale via ensemble indices for various vegetation types from 2001 to 2018. *Weather and Climate Extremes*, v. 35, p. 100412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100412>

Zhang, R., Wu, X., Zhou, X., Ren, B., Zeng, J., & Wang, Q. (2022c). Investigating the effect of improved drought events extraction method on spatiotemporal characteristics of drought. *Theoretical and Applied Climatology*, v.147, n.1, p.395–408. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03838-z>

CAPITULO 2

PADRÕES CLIMÁTICOS DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DA PARAÍBA

RESUMO

A seca é uma anomalia (evento) meteorológica, transitória ou prolongada, recorrente em uma determinada região, onde as chuvas ficam abaixo dos limites mínimos para a manutenção da vida de modo geral (vegetação, animal e humana). Avaliar as secas e seus efeitos não é uma tarefa fácil devido a escassez de dados pluviométricos, tornando-se um desafio para a comunidade científica, principalmente nas regiões áridas e semiáridas. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento espaço temporal dos eventos secos e chuvosos, em regiões homogêneas-RH da precipitação no estado da Paraíba, região Nordeste do Brasil-NEB. O SPI é uma ferramenta que permite ao pesquisador determinar a frequência de ocorrência de um evento anômalo numa escala de tempo específica para qualquer região do globo a partir do histórico da precipitação. Assim, determinou-se o Índice de Precipitação Padronizada - SPI, na escala de tempo sazonal (SPI-3) em cada RH no período de 1962 a 2019. Para a avaliar a tendência do SPI-3 em cada RH aplicou-se o teste de Mann-Kendall para o nível de significância de $\alpha=0,05$. Os resultados indicaram que a variabilidade das condições dos eventos secos e chuvosos, em cada RH neste período, diferiram em intensidade e magnitude. O SPI-3 identificou que, as regiões mais secas estão na região central (Cariri/Curimataú) e a úmida no litoral, concordando com o regime pluviométrico do estado. Com relação às frequências de ocorrências dos eventos secos e chuvoso obtidas para o SPI-3, as secas leves ocorreram com maior probabilidade na escala de tempo de três meses. Já na tendência úmida, a chuva leve apresentou maior probabilidade. A identificação dos eventos extremos e seu monitoramento fornecem um conjunto de informações, que podem auxiliar em distintos setores da sociedade, atenuando assim, os possíveis impactos causados por tais eventos.

Palavras-chave: Índice de seca, Eventos extremos, variabilidade

CLIMATE PATTERNS OF PRECIPITATION EXTREMES IN THE STATE OF PARAÍBA

ABSTRACTS

Drought is a meteorological anomaly (event), transient or prolonged, recurring in a given region, where rainfall is below the minimum limits for the maintenance of life in general (vegetation, animal and human). Assessing droughts and their effects is not an easy task due to the scarcity of rainfall data, making it a challenge for the scientific community, especially in arid and semi-arid regions. In this context, the objective of this study was to evaluate the spatial and temporal behavior of dry and rainy events, in homogeneous regions-RH of precipitation in the State of Paraíba in the Northeast region of Brazil-NEB. The SPI is a tool that allows researchers to determine the frequency of occurrence of an anomalous event on a specific time scale for any region of the globe based on precipitation history. Thus, the Normalized Difference Precipitation Index - SPI was determined, on the seasonal time scale (SPI-3) in each RH in the period from 1962 to 2019. To evaluate the SPI-3 trend in each RH, the Mann-Kendall test for a significance level of $\alpha=0.05$. The results indicated that the variability of the conditions of dry and rainy events, in each RH in this period, differed in intensity and magnitude. SPI-3 identified that the driest regions are in the central region (Cariri/Curimataú) and the wet ones are on the coast, in agreement with the state's rainfall regime. Regarding the frequencies of occurrence of dry and rainy events obtained for SPI-3, mild droughts occurred with greater probability on the three-month time scale. In the humid trend, light rain was more likely. The identification of extreme events and their monitoring provide a set of information that can help different sectors of society, thus mitigating the possible impacts caused by such events.

Keywords: Drought index, Extreme events, variability

1. INTRODUÇÃO

Padrões climáticos extremos têm sido alvo de discussões, em estudos científicos no mundo todo, devido aos seus impactos socioeconômicos e ambientais. Eventos de extremos de precipitação, como chuvas intensas ou secas prolongadas, afetam de forma significativa a disponibilidade hídrica, a produção agrícola e a segurança das populações, especialmente em regiões vulneráveis. No tocante ao estado da Paraíba destaca-se pela sua localização em uma área predominantemente semiárida (86,99%), onde as condições climáticas adversas são intensificadas pela irregularidade das chuvas e pela suscetibilidade a secas prolongadas (Marengo et al., 2016).

Estudos indicam que as mudanças climáticas globais têm potencial para alterar a frequência e a intensidade dos eventos extremos, resultando em maior ocorrência de períodos de chuvas excessivas intercalados com secas mais severas (IPCC, 2021). Particularmente no Estado da Paraíba, onde a agricultura de subsistência e o abastecimento hídrico dependem diretamente das condições pluviométricas, compreender os padrões de extremos de precipitação é essencial para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos e agrícolas (Silva et al., 2020).

A análise dos extremos de precipitação requer o uso de ferramentas e indicadores climáticos que possibilitem a identificação de tendências, variabilidades e anomalias desses extremos. Índices como o SPI (Índice de Precipitação Padronizada) têm sido amplamente utilizados para monitorar e quantificar a intensidade e a frequência desses eventos (Vincent et al., 2018). Tais indicadores permitem avaliar os impactos das mudanças nos padrões climáticos e subsidiar a formulação de estratégias de mitigação e adaptação.

Além disso, o estado da Paraíba apresenta características climáticas diversificadas, com transição entre áreas úmidas e semiáridas, o que torna o estudo dos padrões climáticos extremos ainda mais relevante. A topografia e os sistemas atmosféricos que atuam na região influenciam significativamente os regimes de precipitação, gerando desafios para a previsão e o monitoramento (Alves et al., 2017).

Portanto, neste estudo buscou-se analisar os padrões climáticos de extremos de precipitação no estado da Paraíba, considerando sua variabilidade espacial e temporal. Então, avaliou-se os eventos secos e chuvosos e as tendências sazonais do SPI-3 no período de 1962 a 2019 no estado, identificando e diagnosticando os principais fatores que mais contribuem para o clima regional, fornecendo assim, subsídios para a gestão de riscos associados aos eventos críticos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estado da Paraíba localiza-se na região Nordeste do Brasil com uma área de 56.372 km², correspondente a 0,66% do território nacional, estando posicionado entre os paralelos 6°02'12" e 8°19'18"S, e entre os meridianos de 34°45'54" e 38°45'45"W. Ao norte, limita-se com o estado do Rio Grande do Norte; a leste, com o Oceano Atlântico; a oeste, com o Estado do Ceará; e ao sul, com o estado de Pernambuco (Figura 1), (IBGE, 2022).

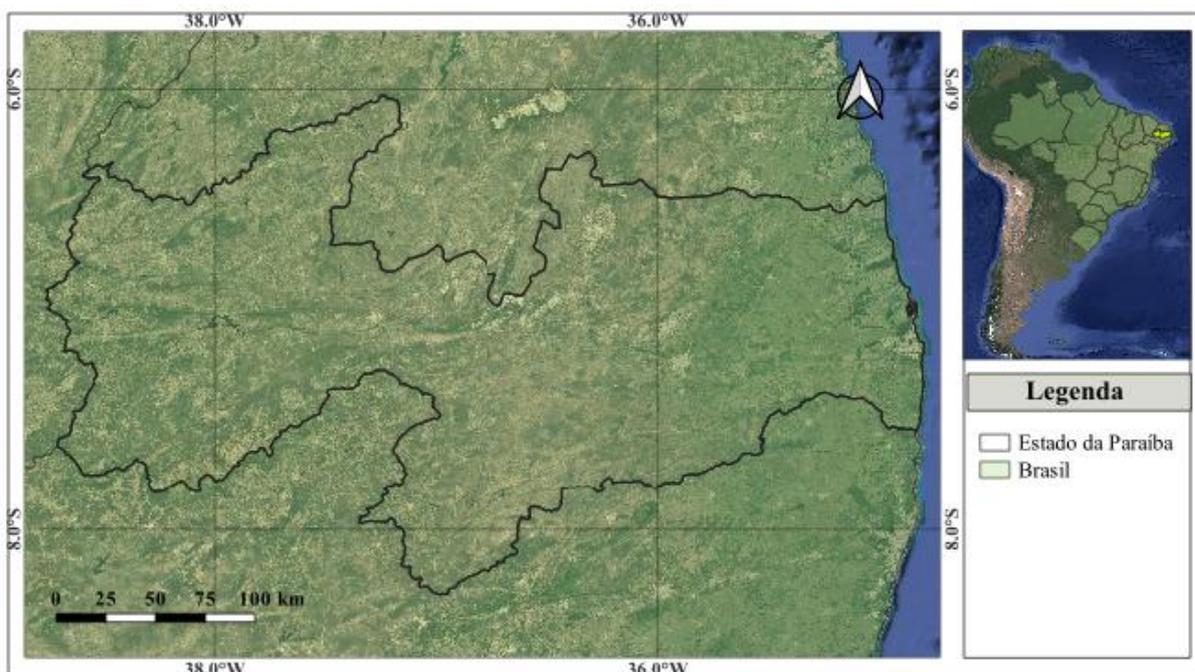


Figura 1: Localização do Estado da Paraíba (Fonte: Autora, 2025).

2.2. Clima e relevo

O relevo da Paraíba se apresenta bastante diversificado em sua forma geral, o qual sofre distintos processos, atuando sob climas diferentes e sobre rochas pouco ou muito desiguais (Francisco e Santos, 2017) (Fig. 2). Quanto à geomorfologia, encontram-se dois grupos composto por tipos climáticos mais importantes do Estado: úmido, subúmido e semiárido, quais sejam: Setor Oriental úmido e subúmido e Setor Ocidental subúmido e semiárido (Francisco e Santos, 2017). De acordo com Sales e Ramos (2000), em todo Nordeste brasileiro, assim como no território paraibano, as oscilações de temperatura do ar baseiam-se mais nas condições topográficas locais de cada região. Apresenta clima Tropical quente, com média de temperatura que varia de 28°C no litoral, 22°C no Planalto da Borborema, chegando a 30°C no interior (AESAs, 2024).

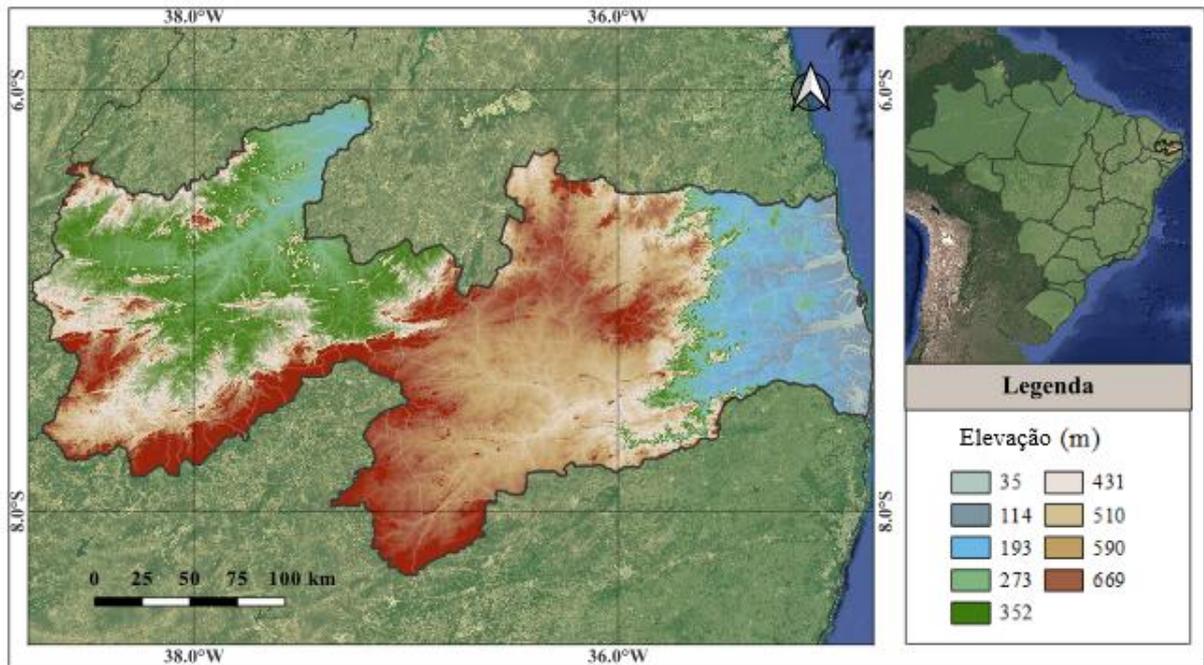


Figura 2: Relevo do estado da Paraíba. (Fonte: Adaptado Brasil em Relevo, 2025).

De acordo com Barros et al. (2012), a região Nordeste apresenta clima semiárido associado a uma vegetação xerófito em cerca de 50% do seu território. Esse clima é caracterizado pelas irregularidades espaciais e temporais do regime de chuvas, com maior destaque nas mesorregiões do agreste e do sertão. Estudos climáticos indicam que fenômenos do tipo El Niño - Oscilação Sul (ENOS) e a circulação geral da atmosfera seriam os responsáveis pela ocorrência de baixos totais pluviométricos (Nobre, 1996).

A variabilidade espaço-temporal da precipitação é bastante diversificada, como consequência da atuação de diferentes sistemas atmosféricos ou resposta aos efeitos dinâmicos provocados pela sua posição geográfica e orografia. Os totais médios anuais de precipitação decrescem rapidamente no sentido Leste-Oeste até região central, em seguida aumenta gradativamente até o extremo oeste do estado, com precipitações que variam entre 300 mm na região central (mais seca) até superiores a 1900 mm no litoral como é identificado na Fig. 3. As chuvas no estado são afetadas pela atuação de diferentes sistemas atmosféricos que atua em distintas épocas do ano, tais como: ZCIT, VCAS, Ondas de Leste, Brisas (Gan e Kousky, 1986; Uvo, 1989; Ferreira e Mello, 2005). No setor leste o período mais chuvoso ocorre de maio a julho, cuja precipitação é proveniente dos sistemas de leste, tais como ondas de leste e brisas (Ferreira; Mello, 2005). Na região central e oeste o trimestre mais chuvoso de fevereiro a abril, os quais são influenciados pela ZCIT e VCANs (Uvo, 1989) e efeitos dinâmicos devido à orografia (planalto da Borborema).

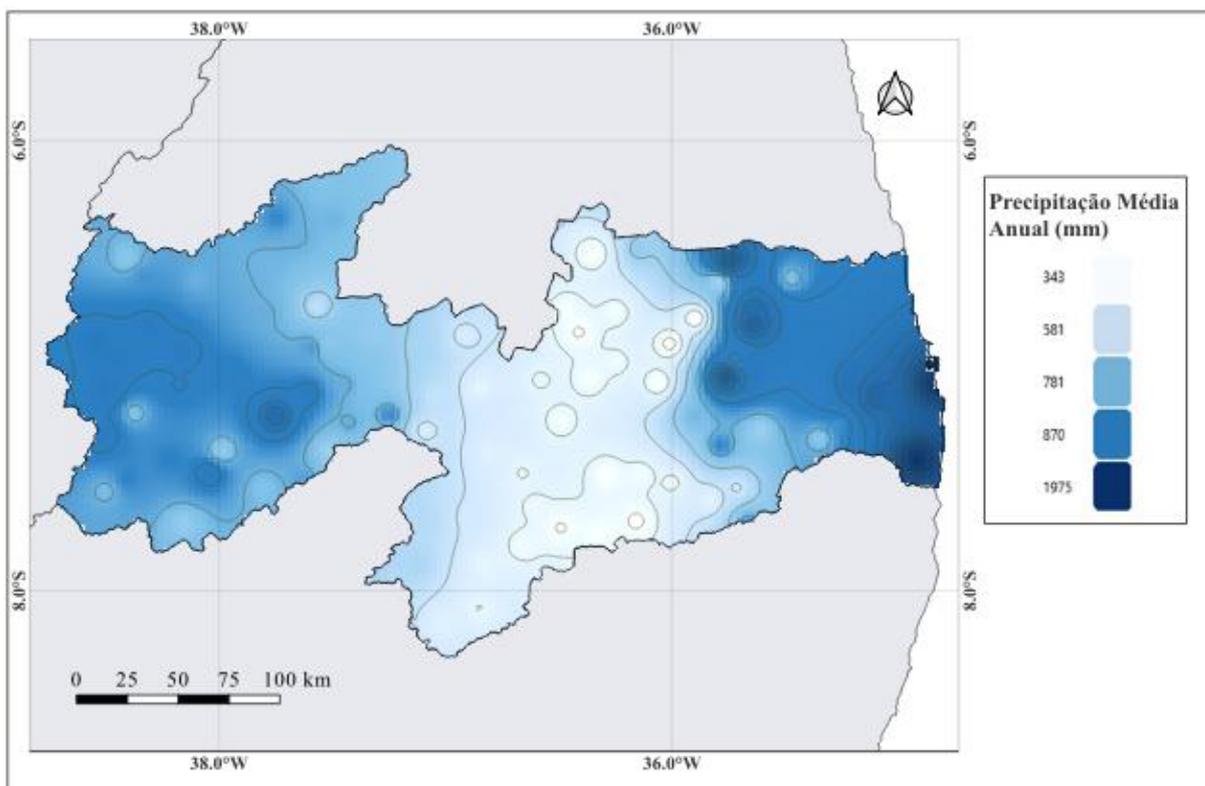


Figura 3: Distribuição espacial dos totais médio anual da precipitação (mm) no período de 1962 a 2019. (Fonte: Autora, 2025).

Sendo a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal sistema meteorológico provedor de chuvas no setor norte do NEB, onde o Estado da Paraíba está inserido. Normalmente a ZCIT migra sazonalmente de sua posição mais ao norte, aproximadamente 12N°, em agosto-setembro, para posições mais ao sul e aproximadamente 4S°, em março-abril (UVO, 1989). Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) que atingem a região Nordeste do Brasil formam-se no Oceano Atlântico entre os meses de outubro e março, e sua trajetória normalmente é de leste a oeste, com maior frequência durante os meses de janeiro e fevereiro (Gan; Kousky, 1986).

2.3. Dados Utilizados

Os dados mensais de precipitação pluviométrica utilizados neste estudo são provenientes de 96 postos/estações meteorológicas distribuídos no estado da Paraíba no período de 1962 a 2019. Esses dados foram obtidos da Agência Nacional das Águas (ANA) e da Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs). Determinou-se o Índice de Seca na escala de tempo sazonal (SPI-3) para seis regiões homogêneas previamente determinadas.

2.4. Metodologia

2.4.1. Análise de agrupamento (AA)

A análise de agrupamentos é um processo de formação de grupos (clusters) de objetos semelhantes de um determinado conjunto de dados. Os agrupamentos têm a característica de que objetos pertencentes ao mesmo grupo sejam "similares" uns aos outros, enquanto objetos de dois grupos diferentes são "dissimilares" (Osiński, 2005). Ahmad e Starkey (2018) citam que o agrupamento é um dos métodos de análise de dados mais utilizados, em inúmeras aplicações práticas em diversas áreas de pesquisa.

Ahmad e Starkey (2018) afirmam que a Análise de Agrupamentos envolve o processo de organização de objetos em grupos, encontrando a classe dos objetos de forma que os objetos em uma classe sejam semelhantes entre si e diferentes dos objetos de outra classe. Enfim, Karaboga e Ozturko (2011) que o objetivo da Análise de Agrupamentos é agrupar dados em clusters de tal forma que as semelhanças entre membros de dentro do mesmo cluster sejam máximas, enquanto as semelhanças entre membros de diferentes clusters são mínimas

O método de agrupamento hierárquico de Ward que utiliza como a função de agrupamento a distância Euclidiana e o critério de agregação a soma dos quadrados dos desvios. O método de Ward interliga as amostras por suas associações e considera, para a formação inicial dos grupos, aqueles indivíduos que proporcionam a menor soma de quadrados dos desvios. As regiões homogêneas foram obtidas por meio de uma matriz de dados, organizada da seguinte maneira: as linhas são compostas pelas microrregiões e as colunas pelos valores médios da precipitação para todo o período. Logo, para medir a similaridade entre as estações, empregou-se a distância euclidiana quadrática, que é a soma dos quadrados das diferenças (HAIR et al., 2005; Wilks (2006); Bem et al 2015). Logo, a distância euclidiana é obtida pela equação (1):

$$d_{ij} = [X_i - X_j] = \left[\sum_{k=1}^p (X_{i,k} - X_{j,k})^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

em que:

X_{ik} é o valor da variável X_k para o objeto i ;

X_{jk} é o valor da variável X_k para o objeto j e

p variáveis usadas X_1, \dots, X_p

O método hierárquico de Ward procura por partições que minimizem a perda associada a cada agrupamento (Everitt, 1974; Bussab et al., 1990; Mingoti, 2005). A perda é calculada

mediante diferença entre a soma dos erros quadráticos de cada padrão e a média da partição em que está contido, conforme Equação (2):

$$SQD = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (2)$$

em que:

n é o número total de elementos do agrupamento e

xi é o i-ésimo elemento do agrupamento.

2.4.2. Regiões Homogêneas da precipitação na Paraíba

Trabalho realizado por Brito e Braga (2005) dividiram o Estado da Paraíba em seis Regiões Homogêneas-RH de precipitação. Neste estudo, utilizou-se séries de precipitação atualizada e fez-se uma nova classificação das regiões RH, no sentido de verificar se houve ou não alterações geográficas das obtidas anteriormente, pelos referidos autores. Então, utilizou-se a mesma metodologia de classificação hierárquica para encontrar as RH, ou seja, o método proposto por Ward (1963), tendo como métrica a função de agrupamento a distância euclidiana e critério de agregação à soma dos quadrados dos desvios (Everitt, 1993; Wilks, 2006). O número de RH foi determinado a partir de cortes transversais no dendrograma (arvore de classificação), efetuado com base no critério de agrupamento e do conhecimento prévio do regime de chuva da Paraíba. É importante salientar que a precipitação total média anual no Estado, oscila de 300 mm nas regiões mais semiáridas e superam os 1600 mm na região litorânea (Figura 3). Levando em consideração estes procedimentos o estado foi subdividido em seis (06) Regiões Homogêneas da precipitação do ponto de vista de sua variabilidade sazonal e interanual, concordando os resultados de Brito e Braga (2005). As RH da precipitação pluvial estão ilustradas na Figura 4.

As RH1 e RH2 referentes ao Sertão e Alto Sertão, as chuvas se concentram em sua maioria nos meses de fevereiro- março- abril com totais anuais, variando de 700 e 900 mm. Nas RH3, situadas na região central (Cariri e Curimataú) as chuvas decrescem atingindo valores próximos a 300 mm no Cariri As RH4 e RH5 situadas no Agreste e Brejo os índices pluviométricos oscila de 400 a 1100 mm. Por fim a RH6 que corresponde ao litoral onde as precipitações superam 1900 mm.

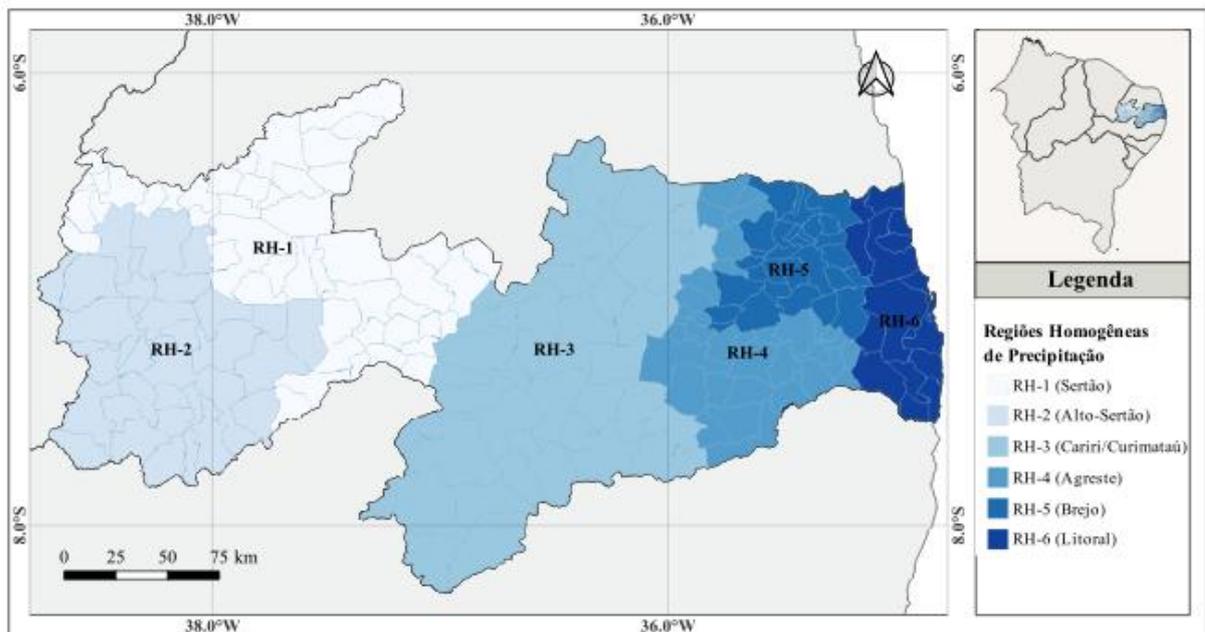


Figura 4: Espacialização das regiões homogêneas da precipitação obtidas pelo método de Ward 1963 para o período de janeiro de 1962 a dezembro de 2019. (Fonte: Autora, 2025).

Nascimento et al. (2019) afirmam que nível de precipitação ocorre em maior intensidade no Litoral e Agreste, são influenciados por sistemas de leste. Já no Sertão e alto sertão as chuvas em sua maioria ocorrem devido a atuação da ZCIT e VCAN (Gan e Kousky, 1986; Ferreira e Mello, 2005; Braga et al. 2014). Por outro lado, no Cariri e Curimataú as precipitações são menores devido ao Planalto da Borborema, que serve de obstáculo e dificulta a passagem da umidade oriunda o Oceano Atlântico (Farias, 2020).

2.4.3. Standardized Precipitation Index – SPI (Índice de precipitação padronizado)

Na primeira etapa do estudo foi determinado SPI para Estado da Paraíba em diferentes escalas de tempo. O SPI é um índice bastante utilizado para estudar flutuação da precipitação de um determinado local em diferentes escalas de tempo, necessitando apenas dos dados da precipitação da região pesquisada. Neste estudo, foram discutidos os padrões do SPI nas escalas de tempo sazonal, para cada região homogênea da precipitação no estado da Paraíba. As referidas escalas refletem as condições de curto prazo que são importantes para monitoramento das precipitações nas escalas mensais, sazonais e anuais.

O cálculo do SPI consiste inicialmente em ajustar uma função densidade de probabilidade à distribuição de frequência da precipitação de uma determinada estação meteorológica. Existe uma variedade de distribuições de probabilidade que podem ser usadas para representar um conjunto de dados. A distribuição que melhor se ajusta aos dados de

precipitação, é a distribuição Gama (WILKS, 2006). A função densidade de probabilidade Gama é dada pela seguinte expressão:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \text{ para } x > 0 \quad (3)$$

Em

que:

$\alpha > 0$ (parâmetro de forma)

$\beta > 0$ (parâmetro de escala)

$x > 0$ (quantidade de precipitação)

(4)

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (\text{função Gama})$$

Os parâmetros acima são estimados considerando-se especificidades como, por exemplo, a estação e a escala temporal escolhida pelo pesquisador. Segundo Thom (1966), citado por Edwards e McKee (1997), as equações (5) e (6) podem ser utilizadas para uma estimativa de $\hat{\alpha}$ e $\hat{\beta}$, a partir do método da máxima verossimilhança:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (5)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (6)$$

Sendo:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x) \quad (7)$$

\bar{x} (média aritmética da precipitação); n (número de observações da série de precipitação)

Então, estimados $\hat{\alpha}$ e $\hat{\beta}$, calcula-se a distribuição de probabilidade acumulada de um evento extremo de chuva num dado período de tempo. A distribuição de probabilidade acumulada é dada por:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t/\hat{\beta}} dt \quad (8)$$

Fazendo $t = x/\hat{\beta}$, a equação (9) torna-se uma função Gama incompleta, descrita a seguir:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^k t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad (9)$$

Conforme definição, a função Gama não admite valores nulos. No entanto, essa variável pode conter valores de x iguais a zero. Nesses casos, Edwards e McKee (1997) sugerem o método proposto Thom (1966) para obter a probabilidade cumulativa mista de precipitação:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (10)$$

Em que:

$$q = \frac{m}{n} \quad (\text{probabilidade de ocorrência de precipitação nula}) \quad (11)$$

m é o número de zeros numa série temporal de precipitação

n é o número total de observações da série de precipitação

$G(x)$ é a probabilidade acumulada da precipitação

A probabilidade acumulada da série temporal de chuva, de acordo com Edwards e McKee (1997), é então transformada num conjunto de novas variáveis aleatórias Z , com média aritmética zero e variância um. Esses novos valores representam o SPI.

Os valores de SPI podem ser obtidos a partir das equações fornecidas por Abramowitz e Stegun (1972), pelas quais há um ajuste da probabilidade acumulada a uma distribuição normal:

$$Z = \text{SPI} = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (12)$$

$$Z = \text{SPI} = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0,5 < H(x) \leq 1,0 \quad (13)$$

$$t = \sqrt{\ln \left\{ \frac{1}{[H(x)]^2} \right\}} \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (14)$$

$$t = \sqrt{\ln \left\{ \frac{1}{1,0 - [H(x)]^2} \right\}} \quad \text{para } 0,5 < H(x) \leq 1,0 \quad (15)$$

Nos casos em que a série pesquisada se ajustar a uma distribuição gaussiana, o SPI pode ser obtido simplesmente subtraindo-se cada valor da precipitação a sua média e dividindo pelo desvio-padrão (WILKS, 2006):

$$\text{SPI} = Z_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{\sigma_i} \quad (16)$$

Sendo:

i : escala temporal (3, 6 ou 12 meses)

X_i : precipitação acumulada no período considerado

\bar{X}_i : média da série precipitação no período considerado

σ_i : desvio-padrão da série de precipitação no período considerado

A precipitação total para o período é então especificada com um valor de SPI consistente com a probabilidade. Ou seja, valores de SPI positivos ou negativos significam valores superiores ou inferiores à mediana da precipitação. Os valores diferentes de zero são uma medida probabilística da gravidade de um evento ser chuvoso ou seco, que pode ser usado para avaliação de risco. O valor zero indica precipitação média. Na Tabela 1 constam as categorias de SPI de acordo com o descrito por McKee et al. (1993). Neste estudo foi calculado o SPI nas escalas de tempo que melhor representem o monitoramento da escassez e/ou dos excessos de precipitação para o Estado da Paraíba.

Tabela 1: Caracterização dos eventos secos e chuvosos segundo o SPI

Valor do SPI	Categoria
> 2,00	Chuva Extrema
1,51 a 2,00	Chuva Severa
1,01 a 1,50	Chuva Moderada
0,51 a 1,00	Chuva Fraca
-0,50 a 0,50	Normal
-0,51 a - 1,00	Seca Fraca
-1,01 a - 1,50	Seca Moderada
-1,51 a - 2,00	Seca Severa
< -2,00	Seca Extrema

Fonte: adaptado de McKee et al. (1995)

2.4.4. Teste de Mann-Kendall

O teste paramétrico de Mann Kendall é derivado dos estudos propostos por Mann (1945) e Kendall (1975), sendo amplamente utilizado na análise de tendências de secas hidrológicas e meteorológicas (Guedes, et al., 2019). Esse teste verifica a existência de uma tendência em uma determinada serie temporal, identificando eventuais variações nas tendências ao longo do tempo além detectar os possíveis pontos de mudança na série do SPI.

A estatística usada é calculada dada uma série temporal t_1, t_2, \dots, t_n e sua sequência de dados correspondentes x_1, x_2, \dots, x_n , sendo n o número de pontos de dados. A hipótese nula do teste indica uma amostra com variáveis aleatórias e identicamente distribuídas, enquanto a hipótese alternativa indica distribuições não idênticas para X_t e X_j (Kazemzade; Malekian, 2018), calculado como:

$$S = \sum_{i=j}^{n-1} \sum_{j=1+i}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (17)$$

em que: x_i e x_j são valores de dados para os anos; n o número de pontos de dados usados, i e j ($j > i$), respectivamente, e $\text{sgn}(x_j - x_i)$ é a função do sinal, dada como:

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (18)$$

A variância dessa distribuição é calculada pelas Equações 19 e 20:

$$var(S)_n = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^p t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (19)$$

Em que: p é o número de grupos empatados, o sinal de soma (p) indica a soma de todos os grupos vinculados, e t_i é o número de valores no grupo (Piyooosh; Ghosh, 2017).

$$Z_s = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{var(s)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{var(s)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (20)$$

Em que: Z caracteriza se existe tendência no teste para os dados utilizados. Os valores Z positivos indicam uma tendência crescente e os valores Z negativos indicam uma tendência decrescente. Se o valor de Z for 0, não há tendência.

O Tau Kendall (Kendall, 1938, Kendall, 1948) mede a força da relação monotônica entre x e y . O coeficiente de correlação tau de Kendall é dado por:

$$\tau = \frac{x_i - x_j}{i - j} \text{ for all } j < i \quad (21)$$

2.4.5. Estimador de inclinação de Sen's slope (Sen)

O teste de inclinação não paramétrico de Sen foi desenvolvido por Sen (1968) cujo intuito é calcular a magnitude das tendências. Para o cálculo de Sen's slope, computam-se todas as curvaturas de todos os pares dos valores apresentados em determinada série temporal. É um método insensível a outliers e dados ausentes, sendo mais rigoroso do que a curvatura da regressão linear, provendo uma medida mais real das tendências em séries temporais (Alcântara et al., 2019). A inclinação é obtida através da Equação (22):

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \text{ for } i = 1 \dots, n \quad (22)$$

em que: x_j e x_k são os valores nos tempos j e k ($j > k$), respectivamente. Se houver n valores de x na série temporal, obtemos até $N = n(n-1)/2$ estimativas de inclinação Q_i . Os valores N de Q_i são classificados do menor ao maior, e o estimador de inclinação de Sen é a mediana dos valores N de Q_i ; este valor é estimado conforme Equação (23):

$$Q_{med} = \begin{cases} Q\left(\frac{n+1}{2}\right) & \text{se } N \text{ for impar} \\ \frac{Q\left(\frac{n}{2}\right) + Q\left(\frac{n+2}{2}\right)}{2} & \text{se } N \text{ for par} \end{cases} \quad (23)$$

O sinal de Q_{med} retrata a tendência dos dados, sendo o valor a inclinação da tendência. Para determinar se a inclinação média é significativamente diferente de zero, o intervalo de confiança de Q_{med} deve ser obtido em uma probabilidade específica. Conforme Gilbert, (1987) o intervalo de confiança levando em conta a inclinação de tempo, pode ser calculado conforme Equação (24):

$$Ca = Z_{1-\alpha/2} - a/2 \sqrt{\overline{var}(s)} \quad (24)$$

em que: $Z_{1-\alpha/2}$ é obtido por meio de uma tabela de distribuição normal padrão. Então, em seguida $M1 = (n - Ca) / 2$ e $M2 = (n + Ca) / 2$ são calculados. Os limites inferior e superior do intervalo de confiança, Q_{min} e Q_{max} , é o $M1^o$ maior e $(M2 + 1)$ o maior das estimativas de inclinação ordenada n , respectivamente (Gilbert, 1987). A inclinação Q_{med} é significativa diferente de zero se os dois limites (Q_{min} e Q_{max}) tiverem sinais semelhantes.

2.4.6. Teste Não Paramétrico de Pettitt

Como complemento para o teste de tendências de Mann-Kendall e Sen's slope, encontra-se na literatura o teste de ruptura de Pettitt (Pettitt, 1979). O teste de Pettitt, é considerado também um teste não-paramétrico, que utiliza uma versão do teste de Mann-Whitney, onde é levando em consideração uma sequência de variáveis aleatórias X_1, X_2, \dots, X_N , esta sequência possui um ponto de mudança em τ para o caso em que X_t para $t = 1, \dots, \tau$ tenha uma função de distribuição comum $F_1(x)$ e X_t para $t = \tau + 1, \dots, N$ possua uma função de distribuição comum $F_2(x)$, desde que $F_1(x) \neq F_2(x)$ (Back, 2001; Uliana et al., 2015; Salehi et al., 2019). Assume-se como problema de teste a hipótese nula do caso “sem mudança”, confrontando com a hipótese alternativa de “mudança” (Pettitt, 1979).

Tendo em conta então a problemática da mudança abrupta, Pettitt (1979) modifica a estatística de Mann-Whitney, de forma a ser utilizada para o teste da “não mudança”, confrontando com a “mudança”, derivando sua probabilidade de significância em uma estatística não paramétrica. Yang et al. (2018) define o teste de Pettitt como uma forma de determinar o ponto de mudança mais significativo de uma série. O teste, conforme proposto por Pettitt (1979) pode ser representado pela Equação (25):

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + j \sum_j^n \text{sgn}(X_t - X_j), \text{ para } t=2, \dots, N \quad (25)$$

em que:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{para } x > 0 \\ 0, & \text{para } x = 0 \\ -1, & \text{para } x < 0 \end{cases}$$

Portanto, o teste estatístico conta o número de vezes que um membro da primeira amostra excede um membro da segunda amostra (Santos et al., 2016). Sendo assim, a estatística é dada pela Equação (26):

$$K_t = \max |U_{t,N}| \quad (26)$$

Yang et al. (2018) afirmam que o ponto de mudança mais significativo pode ser identificado como o ponto em que o valor de $U_{t,N}$ é máximo, com sua significância sendo representada pela Equação (27).

$$\rho = 2_{exp} \left\{ \frac{-6(K_t)^2}{(N^3 + N^2)} \right\} \quad (27)$$

Sendo a hipótese nula para o teste de Pettitt a não ocorrência de um ponto de mudança, valores de significância calculados que sejam inferiores à significância adotada ao teste, na maior parte das vezes 0,05, indicam rejeição à hipótese nula. Logo, para estes casos, o teste indica a presença de um ponto de mudança significativo para a série histórica, ocorrendo no ano t (Yang et al., 2018).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.2. Análise do Índice Padronizado de Precipitação (SPI)

A seguir são descritas e analisadas as principais características dos eventos secos e úmidos em cada região homogênea para o SPI-3, a fim de identificar as condições alternadas de períodos mais secos e úmidos ao longo do período estudado. É notório salientar que o índice apresenta comportamento semelhante entre as regiões homogêneas (Fig. 4), porém diferindo na duração, intensidade e magnitude dos fenômenos analisados.

Os valores obtidos para o SPI-3 para a RH-1 ilustrado na Fig. 5 é possível verificar que os anos que se destacaram com valores elevados de SPI negativos, na região ocorreram nos anos de 1983, 1998, 2012 e 2016 mostrando que os resultados encontrados do SPI-3 se assemelham aos eventos de seca moderadas nas escalas maiores do SPI.

Os resultados permitiram verificar características bastante particulares da seca, e, sua capacidade de se tornar mais evidente, a sazonalidade da precipitação indica dependência de um período chuvoso bem definido, típico de regiões semiáridas ou com clima tropical seco. O SPI-3 sugere que a região tem enfrentado secas mais severas e frequentes nas últimas décadas, o que pode ser corroborado pela análise de tendências decrescentes na RH-1. Para os valores positivos do SPI-3 indicados nas Fig. 5, para as RH1 pode-se observar que os maiores picos úmidos ocorreram nos anos chuvoso de 1974 e 1985 com valores superiores 1,3 (Anexo 1), fato este que está associado diretamente aos eventos de La Niña moderada e dipolo negativo influenciado fortemente as chuvas na região.

Os valores correspondentes ao SPI-3 da RH-2 ilustrados na Fig.5 mostram que a região a apresenta três longos períodos secos, quais sejam: 1980-1984; 1990-1993 e 2012-2018, coincidindo com os anos que se destacaram com valores elevados de SPI negativos, mostrando que esses resultados se assemelham aos de Andrade et al. (2023), para a microrregião de Sousa, que encontraram para os anos 1981, 1993, 1998, 1999, 2013 e 2018, valores do SPI-3, com pico máximo negativo de -2,57 (Anexo 2) em 2013).

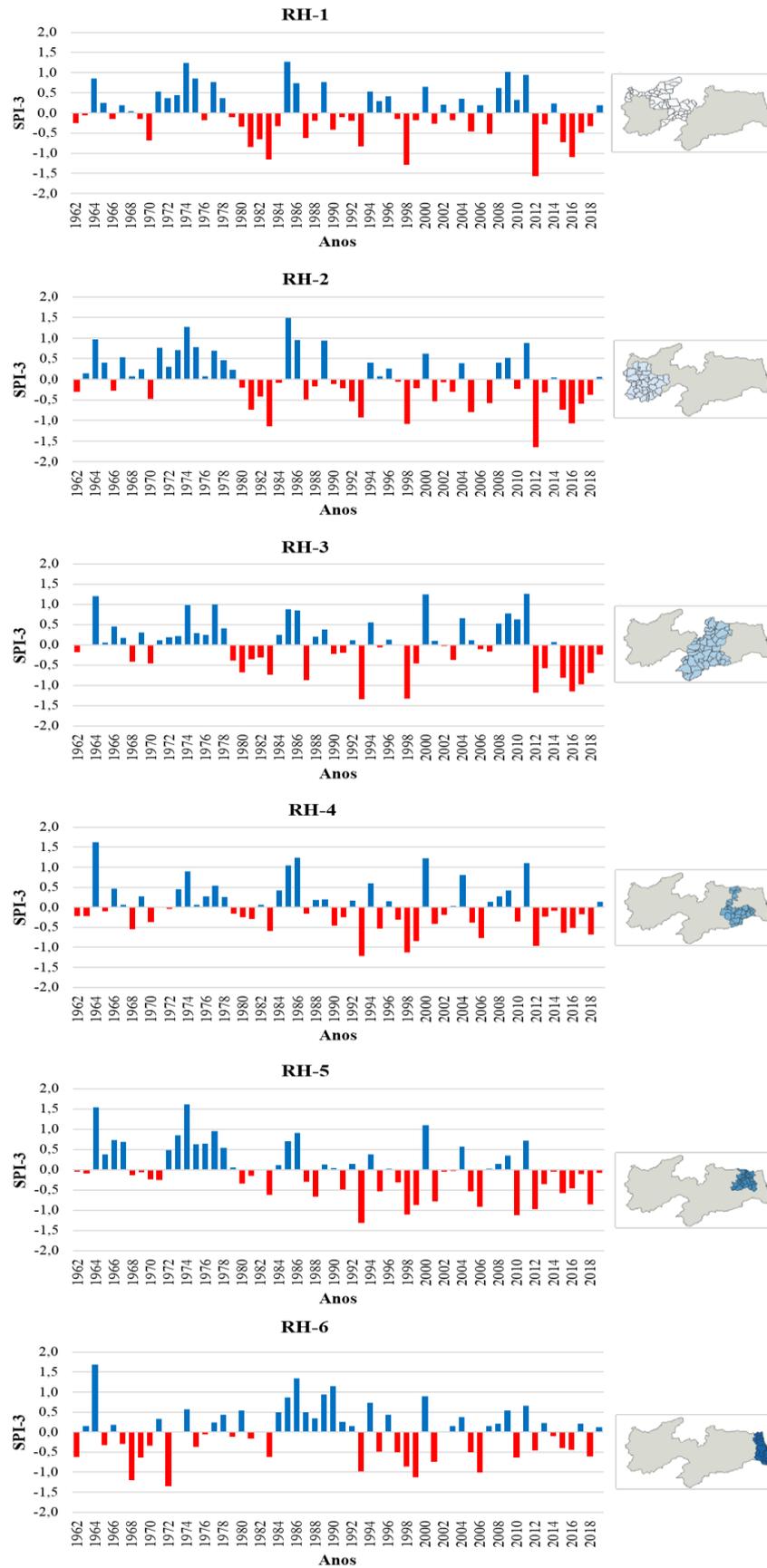


Figura 5: Variabilidade anual do SPI-3 para a Região Homogênea no Estado da Paraíba no período de 1962 a 2019.

As series temporais da RH-3 ilustrada na Fig. 5, pode-se observar que os períodos úmidos se destacam os anos de 1964, 1974, 1985, 2000 e 2009 com picos de SPI positivos, diminuindo as condições mais úmidas, enquanto nos períodos secos as décadas de 1990 e, especialmente, os anos após 2010 apresentam predominância de condições secas, com maior frequência e intensidade de déficits. A região parece sofrer um aumento na severidade e frequência das condições de seca nas últimas décadas. Nestas regiões o SPI-3 apresentou alta flutuação entre negativos (secas) e positivos (chuvosos), tendo assim, poucos períodos com meses seguidos considerados normais (sem anomalias). Da Silva et al. (2021) encontraram resultados semelhantes na Sub-Bacia Choró no Ceará, para as escalas SPI-3 e SPI-6 e que os principais eventos de seca aconteceram justamente em 1983, 1992/1993, 1997-1999, 2012/2013, 2015/2016, categorizando condições Severamente e Extremamente Secas.

Analizando as séries temporais do SPI-3 da RH-4, (Fig. 5) observam-se especialmente no período que decorre durante a década de 70 a 80, a ocorrência dos maiores registros de umidade na escala sazonal e que os menores valores ocorreram nos anos 1993 e 1998, influenciados por El Niño forte e Dipolo positivo (INPE, 2021)

O comportamento dos valores encontrados para as séries temporais do SPI-3 da RH-5, (Fig. 5), se difere principalmente na fase úmida apresentando períodos mais extensos como: 1964-1967 e 1972-1978. Quanto ao período mais seco, destacaram-se os anos de 1993, 1998, 2010, 2012 e 2018, sendo de 2012 a 2019 o mais longo nessa fase, assim como outras regiões homogêneas, a RH-5 também foi influenciada por El Niño forte e Dipolo positivo (INPE, 2021).

Para a RH-6, (Fig. 5) os extremos positivos ocorreram principalmente em 1964, 1985, 1990 e 2000 atingindo valores do SPI-3 de 2,94 (Anexo 6) em 1964 e 2,35 (Anexo 6) em 1990. Notificando que os eventos chuvosos observados nessa região coincidem com os episódios de La Niña: 1967-1968 1988-1989 e 1999-2000 (INPE, 2021). Já o período mais seco ocorreu nos anos de 1968, 1972, 1993, 1999 e 2006, tendo em vista que a RH-6 é a região litorânea que tem regime de chuvas mais regular, com episódios de seca bem menor que as demais, em intensidade e magnitudes.

Considerando que o período chuvoso RH-6 se inicia em abril e vai até julho, sendo junho o mês com índices de precipitação mais elevados. Observa-se ainda, que para todos os meses do ano os totais pluviométricos mais elevados ocorrem no litoral sul da Paraíba. As chuvas nesta região são mais regulares e favorecidas pelas Ondas de Leste (são ondas que se formam no campo de pressão atmosférica, na faixa tropical do globo terrestre, na área de influência dos

Ventos Alísios, que se deslocam de Oeste para Leste, desde a costa da África até o Litoral leste do Brasil (Nascimento, *et al.* 2019).

Nesse contexto, José et al. (2022) avaliaram a distribuição espacial do risco climático referente à seca para a atividade agrícola nas mesorregiões da Bahia. Os autores observaram tendências de diminuição das chuvas locais e alta condição de vulnerabilidades dos agricultores das regiões seca, e, quanto um evento de múltiplas proporções, pode agravar risco, as condições de vulnerabilidades locais.

3.3. Análise de tendência

Para a avaliar as tendências dos eventos extremos das séries temporais do SPI-3, em cada uma das regiões homogêneas do Estado da Paraíba, aplicou-se o teste não paramétrico de Mann-Kendall.

Na tabela 2 constam os resultados do teste de Mann-Kendall aplicado nas diferentes regiões (RH1 a RH6). Esse teste estatístico é utilizado para detectar tendências (crescentes ou decrescentes) em séries temporais, sendo acompanhado pela estimativa da orientação de Sen, que quantifica a magnitude da tendência. Os valores apresentados incluem: Tau de Kendall que mede a associação monotônica entre as variáveis (negativo indica tendência decrescente). Inclinação de Sen representa a orientação estimada da tendência (valores negativos indicam decréscimos) e p-valor indica o nível de significância estatística (um p-valor inferior a 0,05 geralmente sugere uma tendência significativa).

As regiões 2 e 5 apresentaram tendências decrescentes estatisticamente significativas. Como as outras regiões não demonstraram evidências estatísticas suficientes para confirmar tendências relevantes, embora Tau de Kendall seja consistentemente negativo (indicando uma tendência possível geral decrescente).

Além disso, recentemente ocorreu um dos períodos de seca mais severo dos últimos tempos, isso pode ter influenciado na distribuição espacial das declividades de Sen. Marengo et al. (2017) apontaram que dos 21 eventos de secas mais severos que atingiram o Nordeste desde 1900, seis estão inseridos no período de análise deste estudo, com destaque especial para os anos de 1997–1998 e 2012–2015. Este último evento mais recente que atingiu a região Nordeste, fez com que quase 1000 cidades decretassem estado de emergência e impulsionou conflitos sociais e econômicos. Nesse sentido, um dos motivos que pode ter influenciado as declividades negativas tão expressivas foi o aparecimento desse evento de seca nos últimos anos. Além disso, conforme discutido por Pascoa et al. (2017) e Guo et al. (2018a), nota-se que

quanto menor o período dos dados, mais expressivas tendem a ser as declividades de tendências das séries.

Tabela 2: Resultado do teste não-paramétrico de Mann-Kendall aplicado para o Estado da Paraíba para o SPI-3 no período de 1962-2019.

TESTE DE MANN-KENDALL			
REGIÕES HOMOGENEAS	Tau de Kendall	Sen's slope	p-valor
1	-0,130	-0,006	0,151
2	-0,247	-0,013	0,006
3	-0,152	-0,008	0,092
4	-0,164	-0,008	0,070
5	-0,280	-0,016	0,002
6	-0,024	-0,0008	0,799

Rahman et al. (2018) utilizaram informações de 15 estações pluviométricas em uma província do Paquistão para fazer uma avaliação de tendência dos índices SPI-1 e SPI-12 ao longo do tempo. Os autores aplicaram o teste de Mann-Kendall para analisar tanto as tendências das precipitações quanto nas secas em todos os meses. Os resultados mostraram que as secas de curto e longo prazo são similares, de modo que para as secas de curto prazo, o sudoeste apresentou tendências positivas em todos os meses, enquanto nordeste teve maioria de tendências negativas. O padrão espacial foi mantido para as secas de longo prazo, mas os resultados apontaram que no geral a tendência é positiva sobre a área de estudada.

O teste de Pettitt (figura 6) identifica o ponto de mudança em uma série temporal, que pode indicar uma alteração significativa no comportamento da variável em análise (neste caso, SPI-3). A mudança geralmente está associada a fatores climáticos, como variações nos regimes de previsão, possivelmente devido à variabilidade climática natural ou mudanças climáticas antropogênicas.

Os gráficos (figura 6) mostram séries temporais do SPI-3 com as médias indicadas antes e depois do ponto de mudança. A RH-1 (Sertão) estabelece condições predominantemente normais. No entanto, apresenta ausência de uma mudança clara que pode sugerir estabilidade relativa no regime deste período. Já na RH-2 (Alto Sertão) mostra uma mudança na série apresentando dois comportamentos antes da mudança, sugerindo maior frequência de condições úmidas no início da série e depois da mudança indica uma transição para condições mais secas. Esse padrão é consistente com a intensificação das secas nas últimas décadas.

A RH-3 (Cariri/Curimataú) mostra que a região apresenta maior tendência de níveis secos ou condições normais. Uma mudança bloqueada pelo teste de Pettitt pode estar associada à variabilidade climática interna da região. A RH-4 (Agreste) também não exibiu mudanças aparentes no regime, a constância das condições sugere maior estabilidade relativa no SPI-3.

Na figura 6 a RH-5 (Brejo) mostra claramente um ponto de mudança, antes da ruptura o comportamento da série indica maior frequência de chuvas e depois da mudança, aponta uma transição para períodos mais secos. Isso pode refletir os impactos de eventos climáticos, extremos e alterações na distribuição. Por fim a RH-6 (Litoral) exibe uma média geral neutra, apesar disso, é visível certa variabilidade interanual, possivelmente influenciada por fatores como El Niño e La Niña.

Nas regiões com transições para condições mais secas (RH-2 e RH-5), a produtividade agrícola pode ser comprometida, especialmente em cultivos dependentes da chuva. As mudanças identificadas podem indicar maior pressão sobre reservatórios e sistemas de abastecimento em regiões como o Alto Sertão e Brejo. A detecção de mudanças ajuda na formulação de estratégias de redução para eventos extremos e no desenvolvimento de políticas públicas adaptativas.

Botai et al. (2017) em seus estudos para África do Sul, determinaram o SPI nas escalas de sazonal, semestral e anual (SPI-3, SPI-6 e SPI- 12) para avaliar as características das secas e suas tendências para o período de 1985–2016. Os resultados mostraram também que há grande variabilidade espaço-temporal quanto à magnitude das tendências das secas. Nas zonas sul e oeste, os eventos foram mais frequentes, duradouros, severos e intensos. Além disso, o estudo mostrou que com o aumento da escala temporal também há aumento na duração, severidade e intensidade dos eventos de secas de longo prazo e que esses valores são mais expressivos do que os das secas de curto prazo.

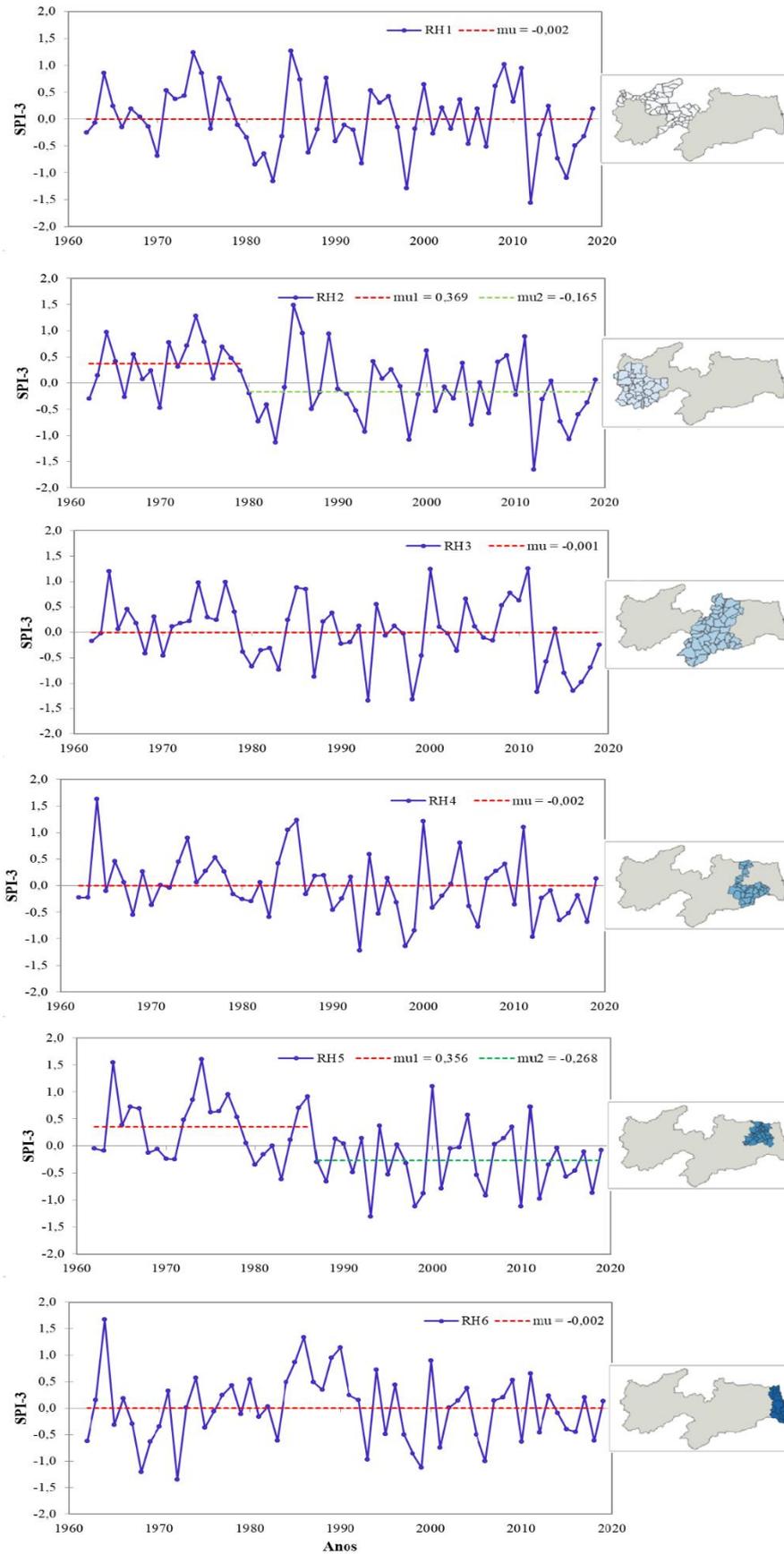


Figura 6: Teste de Pettitt aplicado a Serie temporal do SPI-3 para o período de 1962-2019.

3.4. Probabilidade de ocorrência de diferentes categorias de período úmido e seco

A tabela 3 apresenta a distribuição percentual das categorias do índice SPI-3 (Índice Padronizado de Precipitação) para diferentes regiões homogêneas (RH-1 a RH-6) do Estado da Paraíba.

A probabilidade de ocorrência das categorias dos eventos de períodos úmidos e secos na RH1 apresenta-se da seguinte maneira: normal de probabilidade de ocorrência de (28,4%); Chuva Fraca (26,7%) chuva de moderada a extrema (11,2%), e Seca fraca (21,6%) e de moderada a extrema (12,1%). Ressalta-se que, os eventos extremos (Chuva Extrema e Seca Extrema) são pouco frequentes (< 1%).

Os resultados obtidos na tabela 3 para a RH-2 mostram que o período chuva fraca (29,5%) é a categoria mais comum, seguida por eventos normais (25%). Seca moderada (33,9%) aparece com alta frequência, aumentando vulnerabilidade a déficits hídricos. A persistência de período de seca requer atenção, visto que, os eventos menos intensos de secas podem se desenvolver para mais intensos, provocado pela atuação de fenômenos externos, podendo agravar ainda mais os setores hídricos (Nascimento, et al, 2017).

Tabela 3: Probabilidade de ocorrência de categorias dos eventos secos e chuvosos nas RHs no Estado da Paraíba, para a escala do SPI-3.

SPI-3	Classificação	RH-1 (%) (Sertão)		RH-2 (%) (Alto-Sertão)		RH-3 (%) (Cariri /Curimatã)		RH-4 (%) (Agreste)		RH-5 (%) (Brejo)		RH-6 (%) (Litoral)	
> 2,00	Chuva Extrema	0,9	37,9	0,9	41,1	1,6	29,5	0	34,6	0,9	37,6	0	37,1
1,51 a 2,00	Chuva Severa	1,7		1,8		0		1,9		1,8		0,9	
1,01 a 1,50	Chuva Moderada	8,6		8,9		8,2		8,7		5,5		8,6	
0,51 a 1,00	Chuva Fraca	26,7		29,5		19,7		24		29,4		27,6	
-0,50 a 0,50	Normal	28,4		25		40,2		26,9		27,5		28,4	
-0,51 a -1,00	Seca Fraca	21,6	33,7	22,3	33,9	18	30,3	25	38,5	22,9	34,8	24,1	34,5
-1,01 a -1,50	Seca Moderada	9,5		9,8		9		8,7		9,2		9,5	
-1,51 a -2,00	Seca Severa	1,7		0,9		3,3		4,8		1,8		0,9	
< -2,00	Seca Extrema	0,9		0,9		0		0		0,9		0	

Os valores encontrados para RH-3. Revelaram que a categoria normal apresentou a maior probabilidade de ocorrência 40,2 %. Já para os períodos de eventos úmidos, a probabilidade de ocorrência foi de 29,5%, e, extremamente úmidos apresentou probabilidade percentual de 1,6%. Enquanto os períodos secos totalizaram 30,3% com intensidades variadas

Os resultados obtidos na tabela 3 para o RH-4 mostram alta incidência de seca moderada (30,3%) e normal (26,9%). Os eventos de chuva (Chuva Fraca a Chuva Extrema) são menos frequentes. Na RH-5 pode-se observar que a ocorrência de eventos extremos secos e chuvoso

verifica-se em 1 a cada 57 anos respectivamente. Para os períodos úmidos a probabilidade de ocorrência é 37,6%. Já para os períodos secos foi de 33,9%. Diferente das demais regiões que na categoria normal não apresentou a maior porcentagem e probabilidade de ocorrência. Nesta região a categoria que teve maior probabilidade de ocorrência de chuva fraca foi de 1 a cada 1,8 anos da ordem 29,4%.

Para a RH-6, a distribuição de frequência do SPI-3 (tabela 3) registrou a distribuição de eventos 27,6% de chuva fraca, 8,6% de chuva moderada, 0,9% de chuva severa. O maior valor de SPI positivo registrado foi de +2,85 em 1989, ano que houve atuação do fenômeno La Niña de forte intensidade conforme CPTEC (2018) o que intensifica o evento de precipitação.

Os resultados apresentados na tabela 3, relacionados às categorias do SPI-3 nas regiões homogêneas de precipitação do estado da Paraíba, têm implicações significativas para a agricultura e os recursos hídricos, especialmente em um estado marcado por forte variabilidade climática e longos períodos de seca. Os impactos na agricultura devido a predominância de períodos secos em regiões como RH-1 (Sertão), RH-2 (Alto Sertão) e RH-4 (Agreste) pode levar à redução da produtividade agrícola, especialmente em cultivos dependentes de chuva, como milho e feijão. Secas severas (valores negativos acentuados do SPI-3) afetam o ciclo produtivo, diminuindo a disponibilidade de água no solo e diminuindo as taxas de germinação e crescimento.

As secas também comprometem a produção de pastagens e a disponibilidade de água para o gado, afetando tanto a produção de leite quanto de carne. Regiões como o Agreste (RH-4) e Alto Sertão (RH-2), que dependem da pecuária de subsistência, são particularmente vulneráveis. E em regiões como Brejo (RH-5) e Litoral (RH-6), onde há maior frequência de chuvas fracas a moderadas, a agricultura irrigada pode enfrentar limitações durante secas prolongadas, dependendo das reservas hídricas.

As quantidades de secas leves e secas moderadas foram maiores que os de chuvas leves e chuvas moderadas em todas as RH's analisadas; a persistência de secas com intensidade leve requer atenção, visto que, os eventos menos intensos de secas podem se desenvolver para mais intensos, consoante à atuação de fenômenos externos (Nascimento *et al.*, 2017), contribuindo com possíveis agravamentos nos setores hídrico, e agro econômico. Cabe ressaltar que, todos os episódios de secas leves de cada cidade ultrapassam o total de todas as respectivas chuvas juntas.

O SPI tem sido utilizado para classificação de secas por diferentes pesquisadores em todo mundo, dentre eles destacam-se: Piauí (Guedes *et al.*, 2012); Espírito Santo (Uliana *et al.*,

2015); Bahia (Sousa *et al.*, 2016); Maranhão (Nascimento *et al.*, 2017); Amazônia (Santos *et al.*, 2017); São Paulo (Bonfim & Da Silva, 2018); Estados Unidos (Cañón *et al.* (2007); na Bacia do rio Huaihe na Yan-jun *et al.* (2012) dentre outros, mostrando que SPI é uma importante ferramenta na detecção dos eventos extremos de chuvas/secas.

Segundo Bonfim e Da Silva (2018) as ocorrências de extremos de chuvas ocasionam um aumento significativo na intensidade e não necessariamente na frequência de eventos de chuvas. Os casos de chuvas leves a extremas se apresentam em menor número, mas com maior intensidade.

Recentemente Da Silva *et al.* (2020) analisaram casos/anos de eventos secos e chuvosos no período de 1961 a 2014, para o leste do Nordeste do Brasil através do índice mensal SPI-1 e na distribuição de frequência do SPI, verificaram que 38,42% dos eventos ocorreram na categoria de seca e 27,32 % dos eventos na categoria úmida. O SPI-3 e SPI-6 indicam tendências sazonais em médio prazo na precipitação e que pode estar associado a fluxos anômalos e níveis de reservatórios, SPI-12, SPI-24 e SPI-48 que pode ser usado como um indicador para redução da recarga do reservatório e da água subterrânea, todos mostram tendência negativa (Svoboda, *et al.*, 2012).

4. CONCLUSÃO

A partir da metodologia do SPI aplicada aos dados pluviométricos do Estado da Paraíba, foi possível avaliar e quantificar o número de eventos extremos climáticos, que ocorreram no Estado no período de 1962-2019, chegando as seguintes conclusões:

Todas as regiões mostraram uma tendência de aumento nos eventos secos a partir da década de 2000. Eventos úmidos foram mais concentrados antes da década de 1990. O padrão indica mudanças climáticas e variações sazonais, que podem estar relacionadas às mudanças na dinâmica hídrica e climática.

O teste de Pettitt aplicado às séries do SPI-3 revelou pontos importantes de mudança nas regiões RH-2 e RH-5, diminuindo tendências preocupantes de seca. Essas informações são fundamentais para orientar a gestão hídrica e o planejamento agrícola na Paraíba.

As maiores probabilidades de ocorrência dos eventos secos predominaram em todas as RH's do Estado. Quanto à tendência úmida, a chuva leve apresentou a maior probabilidade de ocorrência na RH-2 (29,5) e RH-5 (29,4)). É notório enfatizar que o aumento da temperatura no período seco é motivo de grande preocupação, pois favorece o aumento da evapotranspiração afetando, portanto, a agricultura e os recursos hídricos do Estado.

5. REFERÊNCIAS

- AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas (2024). Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/>
- ANA - Agência Nacional das Águas (2024). Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>
- Ahmad, A. U., Starkey, A. (2018). Aplicação de métodos de seleção de recursos para análise automatizada de agrupamento: uma revisão sobre conjuntos de dados sintéticos. *Neural Comput & Applic* 29, p. 317–328. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-017-3005-9>
- Alcântara, L. R. P., Costa, I. R. A., Barros, V. H. O., Santos Neto, S. M., Coutinho, A. P. Antonino, A. C. D. (2019) Análise de Tendência para dados pluviométricos no município de Toritana-PE. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 4(2), 130-139. DOI: <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.1.82116>
- Alves, J. M. B. et al. Análise da variabilidade climática e impactos na disponibilidade hídrica no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 1, p. 1-12, 2017.
- Andrade, A. S., Braga, C. C., Sousa, W. G., Silva, M. T. (2023) Análise de tendência do índice de precipitação padronizado na microrregião de Sousa-PB. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v.13, n.3, 432-443. DOI: <https://doi.org/10.29150/jhrs.v13.3.p432-443>
- Back, A.J. (2001). Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 36(5): 717-726. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100204X2001000500001>
- Barros, A. H. C.; Araújo Filho, J. C.; Silva, A. B.; Santiago, G. A. C. F. (2012). Climatologia do Estado de Alagoas. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, Recife: Embrapa Solos, n. 211, 32p. ISSN 1678-0892
- Bem, J. S., Giacomini, N. M. R., Waismann, M. (2015). Utilização da técnica da análise de Clusters ao Emprego da Indústria Criativa entre 2000 e 2010: Estudo da Região do Consinos, RS. *Interações*, Campo Grande, 16, 27-41. DOI: <https://doi.org/10.1590/151870122015102>
- Bonfim, O. E. T., Da Silva, D. F. (2018). Influência do ENOS canônico e modoki sobre a ocorrência de eventos extremos na bacia hidrográfica Aguapé–Peixe (SP). *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 9, n. 3, p. 83-94. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.003.0007>
- Botai C.M., Botai J.O., WIT J.P., Ncongwane K.P. E Adeola A.M. (2017). Drought characteristics over the Western Cape Province, South Africa. *Water*, v.9, n.11, p.876–89. DOI: <https://doi.org/10.3390/w9110876>
- Braga, C. C., Amanajás, J. C., Cerqueira, H. D. V., Vitorino, M. I. (2014). The Role of the Tropical and Pacific Oceans SST in Modulating the Rainfall of Paraíba State, Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 32, n. 1, p. 97-107. DOI: <http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v32i1.399>
- Brito, J. I. B. de; Braga, C. C. (2005). Chuvas no estado da Paraíba em 2004. *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia*. V. 29, n. 1.

Bussab, W. de O., Miazaki, E. S., & Andrade, D. F. de. (1990). *Introdução à análise de agrupamentos*. São Paulo: IME-USP.

Cañón, J., González, J., Valdés, J.(2007). Precipitation in the Colorado River Basin and its low frequency associations with PDO and ENSO signals. *Journal of Hydrology*, v. 333, p. 252-264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.08.015>

Da Silva, D. F., Lima, M. J. S., Souza Neto, P. F., Gomes, H. B., Silva, F. D. S., Almeida, H. R. R. C., & Pereira, M. P. S. (2020). Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no Índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 2, p. 449-464. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p449-464>

Da Silva, G.K.; Júnior, A. D. M.; Lima, C. E. S.; Silva, M. V. M.; Silveira, C. S.; Silva, E. M.; Lima, I. R. (2021). Análise da Variabilidade Espaço-Temporal do SPI: Um Estudo de Caso para a Sub-Bacia Choró, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, n. 3, p.539-549. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863630005>

Dos Santos, S. R. Q. D., Braga, C. C., Sansigolo, C. A., & Santos, A. P. P. D. (2017). Determinação de regiões homogêneas do Índice Padronizado de Precipitação(SPI) na Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.32, n. 1, p. 111-122. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-778632120160013>

Everitt, B. S. (1974). *Cluster Analysis*. London: *Heinemann Educational Books*, p.121.

Farias, T. Da S. (2020). Áreas de propensão a seca no Estado da Paraíba: uma análise espacial dos decretos de situação de emergência e a atuação da operação pipa. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 6, p. 71-79. DOI: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2020v6n1ID19035>

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*, v. 1, n. 1, p. 15 – 28.

Francisco, P. R. M., Santos, D. (2017). *Climatologia do Estado da Paraíba*, Campina Grande: ADUFCG, 75p.

Gan, M. A., Kousky, V. E. (1986). Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 1, p. 19-28.

Gilbert, R.O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. New York, *John Wiley & Sons*, 320p. ISBN 0-442-23050-8

Guedes, H. A. S., Priebe, P. S., Manke, E. B. (2019). Tendências em Séries Temporais de Precipitação no Norte do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.34, n.2, p.283 291. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786334023>

Guedes, R.V. S., Macedo, M. J. H., Sousa, F. A. S. (2012). Análise espacial de eventos de secas com base no índice padronizado de precipitação e análise de agrupamento. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 23, p. 55-65.

Guo H., Bao A., Liu T., Jiapaer G., Ndayisaba F., Jiang L., Kurban A. E De Maeyer P. (2018a). Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966–2015. *Science of*

the Total Environment, v.624, p.1523–1538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.120>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Portal Cidades, (2022). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>

INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais (Brasil). (2021). El Niño e La Niña. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

Karaboga, D., Ozturk, C. (2011). A novel clustering approach: Artificial Bee Colony (ABC) algorithm. *Applied soft computing*, v. 11, n. 1, p. 652-657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.12.025>

Kazemzadeh, M., Malekian, A. (2018). Homogeneity analysis of streamflow records in arid and semi-arid regions of northwestern Iran. *Journal of Arid Land*, v.10, p.493–506. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0064-4>

Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods. Griffin.

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, v.13, n.3, p.245-259. DOI: <https://doi.org/10.2307/1907187>

Marengo, J. A. et al. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. *Revista Climática*, v. 2, p. 15-27, 2016.

Marengo, J. A., Torres, R. R., & Alves, L. M. (2017). Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, 1189-1200. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>

Mckee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1995). Drought monitoring with multiple time scales. In: Conference on Applied Climatology, 9, 1995. Dallas, Texas. *American Meteorological Society*, p. 233-236.

McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993) The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, 17-22 January 1993, 179-184.

Mingoti, S. A. (2007). *Análise de Dados Através de Métodos de Estatística Multivariada: Uma abordagem Aplicada*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 297p.

Nascimento, F. C. A., Braga, C. C., Araújo, F. R. C. D. (2017). Análise Estatística dos Eventos Secos e Chuvosos de Precipitação do Estado do Maranhão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 3, p. 375-386. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863230005>

Nascimento, M. B. DO; Bandeira, M. M., Araújo, L. E. DE. (2019). Variabilidade climática da precipitação do município de Areia/Paraíba, Brasil. *Gaia Scientia*, v. 13, n. 3, p. 24-37. DOI: <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2019v13n3.41925>

Nobre, P.; Shukla, J. (1996). Variations of Sea Surface Temperature, Wind, Stress, and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate*, v.9, p. 2464-2479. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<2464:VOSSTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<2464:VOSSTW>2.0.CO;2)

Osiński, S., Weiss, D. (2005). A concept-driven algorithm for clustering search results. *IEEE Intelligent Systems*, v. 20, n. 3, p. 48-54. DOI: 10.1109/MIS.2005.38

Páscoa P., Gouveia C.M., Russo A. E Trigo R.M. (2017). Droughts trends in the Iberian Peninsula over the last 112 years. *Advances in Meteorology*, v.2017, p.1–13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/4653126>

Pettitt, A.N.A. (1979). Non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2): 126-135. DOI: <https://doi.org/10.2307/2346729>

Rahman G., Atta-Ur-Rahman, Samiullah e Dawood M. (2018). Spatial and temporal variation of rainfall and drought in Khyber Pakhtunkhwa Province of Pakistan during 1971–2015. *Arabian Journal of Geosciences*, v.11, n.3, p.1–13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3396-7>

Salehi, S.; Dehghani, M.; Mortazavi, S.M. & Singh, V.P. (2019). Trend analysis and change point detection of seasonal and annual precipitation in Iran. *International Journal of Climatology*, 40(1): 308-323. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.6211>

Sales, M.C.L., Ramos, V.M., (2000). Caracterização ambiental das áreas sob influência do reservatório de Bocaina (PI) com base na compartimentação geomorfológica. *Carta CEPRO 18*, p. 149-161.

Santos, C. A.; Lima, A. M. M.; Farias, M. H. C. S.; Aires, U. R. V.; Serrão, E. A. DE O. (2016). Análise Estatística Da Não Estacionalidade De Séries Temporais De Vazão Máxima Anual Diária Na Bacia Hidrográfica Do Rio Pardo. *Holos*, v.7, p.179. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2016.4892>

Santos, S. R. Q., Braga, C. C., Sansigolo, C. A., Santos, A. P. P. (2017). Determinação de Regiões Homogêneas do Índice Padronizado de Precipitação(SPI) na Amazônia Oriental, *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 1, p. 111-122. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-778632120160013>

Sen, P.K., (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American statistical association* 63, 1379-1389. DOI: <https://doi.org/10.2307/228589>

Silva, R. M. et al. Índices de extremos climáticos no semiárido brasileiro: tendências recentes. *Climatic Change*, v. 162, p. 1-15, 2020.

Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (2012). *Standardized precipitation index user guide*. World Meteorological Organization Geneva, Switzerland.

Uliana, E. M., Dos Reis, E. F., De Souza A. P., Da Silva, J. G. F. e Xavier, A. C. (2015). Utilização do Índice de Precipitação Padronizado para a Região Norte do Estado do Espírito Santo. *Revista Irriga*, Botucatu, v. 20, n. 3, p. 414-428. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2015v20n3p414>

- Uliana, E.M.; Silva, D.D.; Uliana, E.M., Rodrigues, B.S. & Paula Corrêdo, L.P. (2015). Análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação: Uso de teste estatístico não paramétrico. *Revista Ambiente e Água*, 10(1): 82-88. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambiente-agua.1427>
- Uvo, C. B. A (1989). Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua Relação com a Precipitação na Região Norte do Nordeste Brasileiro (*Dissertação de Mestrado em Meteorologia*). INPE, São José dos Campos-SP.
- Vincent, L. A. et al. Observed trends in indices of daily temperature extremes and precipitation over South America 1960–2000. *Journal of Climate*, v. 31, p. 1-20, 2018.
- Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, v. 58, p. 236-244.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2 ed, 649p.
- Yan-Jun, L., Zheng, X., LU, V., MA, J. (2012). Analysis of Drought Evolvement Characteristics Based on Standardized Precipitation Index in the Huaihe River Basin. *Procedia Engineering*, v. 28, p. 434-437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.746>

6. ANEXOS

Anexo 1

RH-1 (Sertão)									
Sequência Chuvosa do SPI-3					Sequência Seca do SPI-3				
Ínicio	Fim	Duração (meses)	Pico Máximo	Média	Ínicio	Fim	Duração (meses)	Pico Máximo	Média
fev/63	mai/63	4	0,94	0,61	dez/62	jan/63	2	-0,53	-0,44
nov/63	nov/64	13	1,9	1,1	jun/63	out/63	5	-2,27	-1,07
mar/65	ago/65	6	1,46	0,9	dez/64	fev/65	3	-1,37	-0,78
jun/66	set/66	4	1,02	0,6	nov/65	mai/66	7	-1,59	-0,76
mar/67	jul/67	5	1,54	1,12	dez/66	fev/67	3	-1,44	-0,57
mar/68	jul/68	5	1,01	0,59	out/67	dez/67	3	-0,81	-0,49
jul/69	set/69	3	1,2	0,91	ago/68	nov/68	4	-0,87	-0,68
jan/71	nov/71	11	0,94	0,64	jan/69	abr/69	4	-0,93	-0,45
jul/72	out/72	4	2	1,44	out/69	dez/69	3	-1,07	-0,93
dez/72	jan/73	2	1,03	0,7	fev/70	dez/70	11	-1,76	-0,78
abr/73	nov/73	8	1,34	0,82	dez/71	fev/72	3	-0,67	-0,44
jan/74	dez/75	24	2,07	1,05	fev/73	mar/73	2	-1,21	-0,75
mar/76	abr/76	2	0,28	0,25	jan/76	fev/76	2	-0,9	-0,58
out/76	set/77	12	1,64	1,12	mai/76	set/76	5	-1,92	-1,07
out/79	nov/79	2	0,7	0,55	out/77	nov/77	2	-0,73	-0,58
fev/80	mar/80	2	0,81	0,71	dez/78	set/79	10	-0,6	-0,25
nov/80	dez/80	2	0,76	0,54	dez/79	jan/80	2	-0,54	-0,4
nov/81	dez/81	2	0,4	0,38	abr/80	out/80	7	-1,92	-0,87
abr/84	jul/84	4	0,99	0,64	jan/81	fev/81	2	-1,15	-0,65
set/84	out/84	2	0,27	0,18	jun/81	out/81	5	-2,29	-2,01
jan/85	set/85	9	2,56	1,65	jan/82	mai/82	5	-1,8	-0,93
dez/85	jun/86	7	1,25	0,91	jul/82	mar/84	21	-2,13	-1,04
ago/86	dez/86	5	1,2	0,74	nov/84	dez/84	2	-1,35	-0,84
abr/88	jun/88	3	0,78	0,72	out/85	nov/85	2	-0,59	-0,44
dez/88	jan/89	2	0,37	0,3	jan/87	fev/87	2	-0,64	-0,53
abr/89	fev/90	11	1,88	0,96	abr/87	jul/87	4	-0,77	-0,41
set/90	nov/90	3	0,49	0,23	set/87	mar/88	7	-2,11	-1,08
jan/91	mar/91	3	0,25	0,15	jul/88	nov/88	5	-1,04	-0,49
mai/91	jul/91	3	0,29	0,16	fev/89	mar/89	2	-0,7	-0,57
jan/92	mar/92	3	0,73	0,43	mar/90	ago/90	6	-1,91	-0,87
set/93	nov/93	3	0,83	0,53	ago/91	dez/91	5	-0,66	-0,42
jan/94	ago/94	8	1,62	0,94	abr/92	set/92	6	-0,75	-0,49
abr/95	set/95	6	1,5	0,69	nov/92	ago/93	10	-2,52	-1,2
nov/95	jan/96	3	1,57	0,91	set/94	mar/95	7	-0,72	-0,39
mar/96	jul/96	5	0,98	0,61	fev/97	set/97	8	-0,81	-0,43
set/96	jan/97	5	0,99	0,53	fev/98	abr/99	15	-2,63	-1,35
out/97	jan/98	4	0,74	0,44	ago/99	set/99	2	-1,45	-1,14
out/99	abr/00	7	1,94	0,92	jan/01	jul/01	7	-1,21	-0,8
ago/00	dez/00	5	2,11	1,22	ago/02	dez/02	5	-1,01	-0,58
out/01	mar/02	6	2,33	1,2	mar/03	out/03	7	-0,76	-0,45
mai/02	jul/02	3	0,24	0,14	abr/04	jun/04	3	-1,47	-0,87
jan/03	mar/03	3	0,46	0,34	out/04	jun/05	9	-1,13	-0,64
jan/04	mar/04	3	2,95	2,45	set/05	nov/05	3	-1,65	-1,04
jul/04	set/04	3	0,94	0,51	ago/06	set/06	2	-0,68	-0,55
jul/05	ago/05	2	0,24	0,16	nov/06	jan/07	3	-1,69	-0,8
fev/06	jul/06	6	1,16	0,77	mai/07	fev/08	10	-1,14	-0,61
fev/07	abr/07	3	0,72	0,39	out/08	dez/08	3	-1,13	-0,47
mar/08	set/08	7	2,19	1,33	fev/10	mai/10	4	-1,27	-0,9
jan/09	out/09	10	1,99	1,23	jan/12	mai/13	17	-2,66	-1,56
dez/09	jan/10	2	0,52	0,41	fev/14	mar/14	2	-0,61	-0,44
out/10	abr/11	7	2,92	1,71	jan/15	jul/15	7	-1,17	-0,7
jun/11	dez/11	7	1,82	1,03	out/15	dez/15	3	-2,43	-1,62
jun/13	set/13	4	1,25	0,56	mar/16	jul/17	16	-2,67	-1,11
nov/13	jan/14	3	1,52	0,83	out/17	jan/18	4	-1,52	-1,13
abr/14	jul/14	4	0,66	0,37	jul/18	out/18	4	-1,97	-1,41
set/14	dez/14	4	1,44	0,65					
ago/15	set/15	2	0,69	0,5					
jan/16	mar/16	3	0,98	0,47					
ago/17	set/17	2	0,63	0,59					
fev/18	abr/18	3	0,46	0,26					
nov/18	mai/19	7	1,01	0,65					

Anexo 2

RH-2 (Alto-Sertão)									
Sequência Chuvosa do SPI-3					Sequência Seca do SPI-3				
Ínicio	Fim	Duração (meses)	Pico Máximo	Média	Ínicio	Fim	Duração (meses)	Pico Máximo	Média
nov/62	dez/62	2	0,25	0,13	jun/63	set/63	4	-1,99	-1,17
fev/63	mai/63	4	1,44	0,88	dez/65	jun/66	7	-1,48	-0,9
out/63	nov/64	14	1,79	1,09	ago/67	fev/68	7	-1,47	-0,53
mar/65	ago/65	6	1,15	0,73	ago/68	dez/68	5	-0,89	-0,37
out/65	nov/65	2	0,85	0,61	fev/69	mar/69	2	-0,75	-0,63
jul/66	set/66	3	0,91	0,68	fev/70	set/70	8	-1,83	-0,79
nov/66	dez/66	2	0,52	0,44	jan/73	mar/73	3	-0,85	-0,36
fev/67	jul/67	6	2,24	1,6	nov/75	jan/76	3	-1,65	-0,82
mar/68	jul/68	5	1,19	0,69	mai/76	ago/76	4	-1,18	-0,88
abr/69	out/69	7	1,48	0,68	out/77	nov/77	2	-0,61	-0,48
out/70	nov/70	2	0,45	0,44	dez/79	jan/80	2	-0,62	-0,58
jan/71	nov/71	11	1,2	0,86	abr/80	set/80	6	-1,91	-0,84
jul/72	out/72	4	1,28	0,95	jun/81	out/81	5	-2,76	-2,12
abr/73	out/75	31	2,06	1,13	fev/82	fev/82	8	-1,51	-0,86
fev/76	abr/76	3	0,32	0,19	jan/83	mar/84	15	-2,03	-1,11
set/76	set/77	13	2,05	1,09	ago/84	set/84	2	-0,78	-0,45
dez/77	abr/78	5	1,15	0,5	jan/87	fev/87	2	-0,76	-0,41
jun/78	nov/78	6	1,46	0,74	mai/87	jul/87	3	-0,73	-0,45
jan/79	abr/79	4	0,64	0,35	set/87	mar/88	7	-2,53	-1,04
set/79	nov/79	3	1,13	0,87	jul/88	nov/88	5	-1	-0,53
fev/80	mar/80	2	0,75	0,75	fev/89	mar/89	2	-0,57	-0,45
out/80	jan/81	4	1,23	0,5	fev/90	mai/90	4	-1,97	-0,68
mar/81	mai/81	3	0,83	0,33	set/90	ago/90	2	-0,54	-0,33
nov/81	jan/82	3	0,98	0,71	dez/90	jun/91	7	-0,75	-0,31
out/82	dez/82	3	0,69	0,45	ago/91	set/91	2	-0,67	-0,39
mar/84	jul/84	4	0,95	0,61	abr/92	ago/93	17	-2,29	-1,03
out/84	out/85	13	2,33	1,31	out/94	nov/94	2	-1,11	-0,86
dez/85	dez/86	13	1,58	0,99	jan/95	abr/95	4	-0,56	-0,2
mar/87	abr/87	2	0,23	0,16	ago/95	out/95	3	-1,73	-0,69
abr/88	jun/88	3	0,94	0,87	ago/97	out/97	3	-0,98	-0,74
dez/88	jan/89	2	0,85	0,73	fev/98	jun/99	17	-2,32	-1,03
abr/89	jan/90	10	1,96	1,19	ago/99	set/99	2	-1,65	-1,3
set/90	nov/90	3	0,82	0,66	jan/01	set/01	9	-1,87	-0,92
jan/92	fev/92	2	0,36	0,23	abr/02	jun/02	3	-1,2	-0,63
set/93	nov/93	3	0,43	0,19	set/02	dez/02	4	-1,33	-0,97
jan/94	mar/94	3	1,46	1,27	abr/03	dez/03	9	-0,97	-0,51
jun/94	set/94	4	1,57	0,8	abr/04	jun/04	3	-1,11	-0,65
mai/95	jul/95	3	1,15	0,94	out/04	nov/05	14	-3,19	-0,81
nov/95	jan/96	3	0,94	0,48	jan/06	fev/06	2	-1,44	-0,9
mar/96	jul/96	5	0,77	0,52	ago/06	jan/07	6	-1,16	-0,53
nov/97	jan/98	3	0,76	0,7	mar/07	dez/07	10	-1,15	-0,62
out/99	abr/00	7	1,57	0,89	out/08	mar/09	6	-1,66	-0,69
ago/00	dez/00	5	1,74	0,95	fev/10	jun/10	6	-1,99	-1,15
out/01	mar/02	6	2,28	1,05	abr/11	mai/11	2	-0,79	-0,58
jul/02	ago/02	2	0,53	0,27	jan/12	jun/13	18	-2,6	-1,54
jan/03	mar/03	3	0,41	0,31	fev/14	ago/14	7	-0,8	-0,32
jan/04	mar/04	3	2,32	2,11	jan/15	jul/15	7	-1,82	-1,03
jul/04	set/04	3	1,04	0,64	out/15	dez/15	3	-1,25	-1,05
mar/06	jul/06	5	1,23	0,78	abr/16	jun/17	15	-2,32	-1,17
jan/08	jul/08	7	2,13	1,16	out/17	jan/18	4	-1,76	-1,35
abr/09	out/09	7	1,53	1,02	jul/18	out/18	6	-1,88	-1,01
dez/09	jan/10	2	0,14	0,1	ago/19	out/19	3	-0,52	-0,3
out/10	mar/11	6	2,11	1,66					
jun/11	dez/11	7	2,31	1,01					
jul/13	ago/13	2	0,97	0,69					
out/13	jan/14	4	1,4	0,69					
set/14	dez/14	4	1,2	0,67					
ago/15	set/15	2	0,81	0,75					
jul/17	set/17	3	0,7	0,51					
fev/18	abr/18	3	0,43	0,27					
nov/18	abr/19	6	1,27	0,62					

Anexo 3

RH-3 (Cariri/Curimataú)									
Sequência Chuvosa do SPI-3					Sequência Seca do SPI-3				
Ínicio	Fim	Duração (meses)	Pico Máximo	Média	Ínicio	Fim	Duração (meses)	Pico Máximo	Média
fev/63	mai/63	4	0,8	0,52	jul/62	set/62	3	-0,5	-0,27
nov/63	nov/64	13	2,57	1,43	nov/62	jan/63	3	-0,66	-0,32
abr/65	ago/65	5	1,19	0,55	jun/63	out/63	5	-1,43	-1,17
out/65	dez/65	3	0,62	0,4	dez/64	mar/65	4	-1,2	-0,83
jun/66	set/66	4	1,43	1,05	ago/67	nov/67	4	-0,62	-0,36
nov/66	dez/66	2	1,12	0,85	jul/68	dez/68	6	-1,59	-1,06
mar/67	jul/67	5	1,15	0,68	out/69	dez/69	3	-0,89	-0,65
dez/67	jan/68	2	0,66	0,52	fev/70	jul/70	6	-0,89	-0,61
mar/68	jun/68	4	0,67	0,28	out/70	mar/71	6	-1,51	-1,19
mar/69	set/69	7	1,55	0,79	jan/72	mar/72	3	-0,9	-0,42
ago/70	set/70	2	0,52	0,39	jan/73	mar/73	3	-0,99	-0,47
abr/71	dez/71	9	1,08	0,51	jan/75	abr/75	4	-0,58	-0,26
abr/72	out/72	7	1,23	0,51	mai/76	set/76	5	-1,06	-0,58
abr/73	jun/73	3	0,53	0,23	dez/77	jan/78	2	-0,79	-0,42
ago/73	set/74	14	1,8	1,05	dez/78	ago/79	9	-1,13	-0,69
nov/74	dez/74	2	0,68	0,38	abr/80	nov/80	8	-2,46	-1,02
jul/75	set/75	3	1,59	1,22	jun/81	nov/81	6	-2,26	-1,79
dez/75	abr/76	5	1,19	0,45	fev/82	mai/82	4	-1,54	-0,8
out/76	fev/77	5	1,98	1,17	set/82	jan/83	5	-1,04	-0,49
abr/77	nov/77	8	2,43	1,4	mar/83	set/83	7	-1,38	-0,91
fev/78	nov/78	10	0,99	0,63	nov/83	mar/84	5	-1,93	-1,07
set/79	nov/79	3	1,14	0,44	out/85	nov/85	2	-0,68	-0,34
fev/80	mar/80	2	0,32	0,26	jan/87	fev/87	2	-1,28	-0,95
dez/80	mai/81	6	2,07	0,91	abr/87	jan/88	10	-1,9	-0,96
dez/81	jan/82	2	1,04	0,65	out/88	nov/88	2	-0,87	-0,47
jun/82	ago/82	3	0,39	0,22	jan/89	mar/89	3	-1,11	-0,71
abr/84	nov/84	8	1,24	0,83	mar/90	ago/90	6	-1,05	-0,79
fev/85	jun/85	5	3,06	2,18	nov/91	dez/91	2	-0,99	-0,9
ago/85	set/85	2	0,32	0,27	mai/92	ago/92	4	-1	-0,57
dez/85	dez/86	13	1,56	0,79	dez/92	dez/93	13	-2,01	-1,33
fev/88	jun/88	5	1,27	0,67	out/95	mar/96	6	-1,95	-0,65
ago/88	set/88	2	0,64	0,44	jul/96	ago/96	2	-0,73	-0,42
abr/89	out/89	7	1,18	0,74	jun/97	nov/97	6	-1,1	-0,47
dez/89	fev/90	3	1,55	0,75	jan/98	set/98	9	-2,52	-1,49
set/90	dez/90	4	0,69	0,33	nov/98	out/99	12	-1,49	-0,82
mar/91	mai/91	3	0,5	0,37	fev/01	jul/01	6	-0,92	-0,5
jan/92	abr/92	4	1,11	0,8	abr/02	jun/02	3	-0,74	-0,46
set/92	nov/92	3	0,83	0,56	ago/02	set/03	14	-1,04	-0,46
jan/94	mar/94	3	0,53	0,48	nov/03	dez/03	2	-0,91	-0,57
jun/94	dez/94	7	1,51	0,79	abr/04	mai/04	2	-0,6	-0,31
fev/95	mai/95	4	0,45	0,25	out/04	dez/04	3	-1,39	-0,87
jul/95	set/95	3	0,53	0,27	jan/06	mar/06	3	-0,64	-0,4
abr/96	jun/96	3	0,42	0,31	set/06	jan/07	5	-1,1	-0,66
set/96	jan/97	5	1,24	0,69	mai/07	set/07	5	-0,53	-0,27
mar/97	mai/97	3	0,6	0,47	dez/07	fev/08	3	-0,59	-0,3
nov/99	jan/01	15	2,33	1,14	nov/08	jan/09	3	-1,12	-0,7
ago/01	mar/02	8	1,52	0,9	mar/10	mai/10	3	-0,82	-0,61
jan/04	mar/04	3	3,72	3,11	mar/12	jul/13	17	-2,89	-1,43
jun/04	set/04	4	0,84	0,45	mar/14	jun/14	4	-0,74	-0,47
mai/05	ago/05	4	0,63	0,4	ago/14	set/14	2	-0,54	-0,33
abr/06	ago/06	5	0,94	0,47	jan/15	jul/15	7	-1,58	-1,2
out/07	nov/07	2	0,58	0,33	out/15	nov/15	2	-1,35	-1,32
mar/08	out/08	8	2,13	1,05	mar/16	nov/16	9	-3,16	-1,75
fev/09	out/09	9	1,52	1,07	jan/17	jul/17	7	-2,04	-1,2
dez/09	fev/10	3	0,95	0,47	out/17	jan/18	4	-1,86	-1,12
jun/10	ago/10	3	1,03	0,76	jul/18	nov/18	5	-2,51	-1,79
out/10	dez/11	15	2,59	1,43	nov/19	dez/19	2	-1,89	-1,43
ago/13	fev/14	7	1,25	0,48					
out/14	dez/14	3	1,43	0,9					
ago/15	set/15	2	0,53	0,39					
dez/15	fev/16	3	1,34	0,79					
ago/17	set/17	2	0,18	0,13					
fev/18	jun/18	5	0,59	0,25					
fev/19	abr/19	3	0,19	0,14					
ago/19	out/19	3	0,7	0,41					

Anexo 4

RH-4 (Agreste)									
Sequência Chuvosa do SPI-3					Sequência Seca do SPI-3				
Ínioio	Fim	Duração (meses)	Pico Máximo	Média	Ínioio	Fim	Duração (meses)	Pico Máximo	Média
out/62	nov/62	2	0,62	0,56	mai/63	out/63	6	-1,24	-0,85
nov/63	nov/64	13	3,04	1,79	dez/64	mai/65	6	-1,2	-0,58
out/65	fev/66	5	0,84	0,48	mar/66	jun/66	4	-0,99	-0,39
jul/66	jan/67	7	1,37	0,91	jun/68	abr/69	11	-1,51	-0,94
abr/67	mai/67	2	0,39	0,28	out/69	mar/70	6	-1,25	-0,56
mai/69	set/69	5	2,16	1,29	jun/70	jul/70	2	-0,76	-0,69
abr/70	mai/70	2	0,28	0,16	nov/70	abr/71	6	-2,31	-1,45
ago/70	out/70	3	1,12	0,99	jan/72	abr/72	4	-1,27	-0,68
mai/71	jul/71	3	0,35	0,24	fev/75	jun/75	5	-1,24	-0,8
set/71	dez/71	4	1,85	1,17	ago/76	set/76	2	-0,65	-0,57
mai/72	jun/72	2	0,4	0,28	dez/77	mar/78	4	-1,69	-1,04
ago/72	out/72	3	1,08	0,56	fev/79	jan/79	5	-1,61	-0,94
dez/72	jan/75	26	1,79	0,63	mai/80	out/80	6	-1,39	-0,76
jul/75	out/75	4	1,41	0,94	jun/81	out/81	5	-2,1	-1,85
dez/75	jun/76	6	0,93	0,48	mar/82	mai/82	3	-0,52	-0,51
out/76	jan/77	5	1,82	0,86	dez/82	fev/83	3	-0,73	-0,5
mai/77	nov/77	7	1,18	0,82	mar/83	set/83	6	-1,27	-0,83
abr/78	jan/79	10	1,49	0,72	nov/83	mar/84	5	-0,67	-0,42
set/79	abr/80	8	1,76	0,49	set/87	fev/88	6	-1,4	-0,83
nov/80	mai/81	7	1,65	0,58	jan/89	mar/89	3	-0,99	-0,69
nov/81	fev/82	4	1,82	0,97	fev/90	set/90	8	-1,78	-0,65
out/82	nov/82	2	0,54	0,51	nov/90	abr/91	6	-0,99	-0,47
abr/84	dez/84	9	1,49	0,67	jun/91	set/91	4	-0,53	-0,4
fev/85	out/85	9	2,99	1,46	dez/92	fev/94	15	-1,57	-1,07
jan/86	jan/87	13	1,98	1,2	jan/95	mai/95	5	-1,08	-0,55
mar/87	mai/87	3	0,75	0,41	set/95	mar/96	7	-2,48	-1,09
mar/88	jun/88	4	1,1	0,75	jul/96	ago/96	2	-0,73	-0,47
ago/88	dez/88	5	0,4	0,16	jun/97	nov/97	6	-2,19	-0,96
abr/89	jan/90	10	1,11	0,48	fev/98	set/98	8	-2,89	-1,41
out/91	nov/91	2	0,27	0,15	nov/98	nov/99	13	-1,83	-1,04
fev/92	mai/92	4	1,14	0,72	fev/01	jul/01	6	-1,23	-0,86
out/92	nov/92	2	0,35	0,3	abr/02	jun/02	3	-0,97	-0,8
mar/94	dez/94	10	2,02	0,81	set/02	jan/03	5	-0,89	-0,48
jun/95	ago/95	3	0,7	0,48	set/03	dez/03	4	-0,5	-0,23
abr/96	jun/96	3	0,78	0,65	out/04	mai/05	8	-2,03	-1,16
set/96	dez/96	4	1,4	0,83	nov/05	mar/07	17	-1,73	-0,73
mar/97	mai/97	3	0,87	0,64	nov/08	jan/09	3	-0,98	-0,63
dez/97	jan/98	2	0,38	0,23	nov/09	dez/09	2	-1,45	-1,21
dez/99	abr/00	5	1,07	0,66	mar/10	nov/10	9	-1,5	-0,56
jun/00	jan/01	8	2,58	1,54	nov/11	dez/11	2	-0,67	-0,37
dez/01	mar/02	4	0,97	0,56	mar/12	jun/12	4	-3,16	-1,53
jul/02	ago/02	2	0,21	0,17	set/12	mai/13	9	-2,46	-1,61
fev/03	abr/03	3	0,88	0,67	mar/14	ago/14	6	-1,22	-0,9
jan/04	set/04	9	3,41	1,47	jan/15	jul/15	7	-1,71	-0,87
jun/05	ago/05	3	1,39	1,27	out/15	nov/15	2	-1,54	-1,41
out/07	nov/07	2	0,55	0,55	jun/16	nov/16	6	-3,25	-1,82
mar/08	out/08	8	1,15	0,6	fev/17	jun/17	5	-0,99	-0,49
fev/09	out/09	9	1,06	0,87	dez/17	jan/18	2	-0,65	-0,46
jan/10	fev/10	2	0,58	0,37	jun/18	jan/19	8	-2,59	-1,51
dez/10	out/11	11	2,85	1,28					
jan/12	fev/12	2	0,75	0,74					
jul/12	ago/	2	0,22	0,22					
jun/13	fev/14	9	1,03	0,54					
set/14	dez/14	4	1,8	0,94					
ago/15	set/15	2	0,25	0,16					
dez/15	mar/16	4	2,02	1,22					
dez/16	jan/17	2	0,84	0,56					
jul/17	set/17	3	0,5	0,35					
fev/18	mai/18	4	1,31	0,95					
fev/19	abr/19	3	0,78	0,71					
jul/19	out/19	4	0,69	0,44					

Anexo 5

RH-5 (Brejo)									
Sequência Chuvosa do SPI-3					Sequência Seca do SPI-3				
Ínicio	Fim	Duração (meses)	Pico Máximo	Média	Ínicio	Fim	Duração (meses)	Pico Máximo	Média
mar/62	jun/62	4	0,51	0,41	jul/62	set/62	3	-0,74	-0,61
out/62	nov/62	2	0,34	0,34	dez/62	jan/63	2	-0,99	-0,91
fev/63	mai/63	4	1,21	0,72	jun/63	nov/63	6	-0,88	-0,63
dez/63	nov/64	12	2,23	1,69	dez/64	mar/65	4	-1,06	-0,53
abr/65	ago/65	5	1,57	0,69	abr/66	mai/66	2	-0,66	-0,44
out/65	mar/66	6	1,28	0,84	jun/68	mai/69	12	-1,33	-0,65
jun/66	jan/67	8	1,3	0,86	out/69	mar/70	6	-0,79	-0,43
mar/67	mai/68	15	1,23	0,8	jun/70	jul/70	2	-0,63	-0,47
jun/69	set/69	4	1,04	0,72	nov/70	set/71	11	-2,22	-0,97
abr/70	mai/70	2	0,51	0,42	mar/75	mai/75	3	-1,13	-0,83
ago/70	out/70	3	0,97	0,88	set/76	out/76	2	-0,59	-0,31
out/71	fev/72	5	1,66	0,86	fev/79	jun/79	5	-1,55	-0,85
abr/72	fev/75	35	2,01	1,03	mai/80	out/80	6	-1,68	-1,05
jun/75	ago/76	15	1,85	1,04	jun/81	out/81	5	-1,72	-1,39
nov/76	dez/77	14	1,64	0,94	mar/82	ago/82	6	-0,94	-0,55
abr/78	jan/79	10	1,12	0,7	dez/82	set/83	10	-1,67	-0,73
set/79	abr/80	8	1,94	0,74	nov/83	abr/84	6	-1,2	-0,47
nov/80	jan/81	3	0,75	0,38	jun/87	abr/88	11	-1,61	-0,72
mar/81	mai/81	3	1,41	0,95	jun/88	nov/88	6	-1,19	-0,75
nov/81	fev/82	4	1,7	1,02	jan/89	mar/89	3	-0,71	-0,37
set/82	nov/82	3	0,7	0,48	jan/90	abr/90	4	-1,18	-0,47
mai/84	jul/84	3	1,09	0,81	jan/91	out/91	10	-1,18	-0,62
set/84	set/85	13	2,24	0,83	dez/92	fev/94	15	-2,11	-1,1
jan/86	jun/86	6	1,29	0,92	out/94	jun/95	9	-0,9	-0,36
ago/86	jan/87	6	1,66	1,01	ago/95	mar/96	8	-2,1	-0,78
abr/87	mai/87	2	0,56	0,31	jul/96	ago/96	2	-1,07	-0,74
abr/89	jun/89	3	0,73	0,59	jul/97	set/98	15	-2,46	-1,18
set/89	dez/89	4	0,64	0,32	nov/98	out/99	13	-1,78	-1,03
mai/90	jun/90	2	0,47	0,31	jan/01	nov/01	11	-1,4	-0,87
ago/90	dez/90	5	0,73	0,36	abr/02	jun/02	3	-0,81	-0,57
nov/91	dez/91	2	0,18	0,12	set/02	nov/02	3	-0,84	-0,55
fev/92	mai/92	4	1,17	0,78	set/03	dez/03	4	-0,76	-0,6
out/92	nov/92	2	0,04	0,03	set/04	mai/05	9	-2,07	-1,1
mar/94	set/94	7	1,41	0,79	set/05	mai/07	21	-2,42	-0,82
abr/96	jun/96	3	0,77	0,47	nov/08	jan/09	3	-1,32	-0,63
set/96	jan/97	5	1,11	0,51	nov/09	dez/10	14	-2,06	-1,18
mar/97	jun/97	4	1,26	0,71	out/11	nov/11	2	-0,69	-0,49
dez/99	abr/00	5	1,15	0,61	mar/12	jun/12	4	-3,27	-1,64
jun/00	dez/00	7	2,41	1,59	set/12	jul/13	11	-2,45	-1,34
dez/01	mar/02	4	1,03	0,56	abr/14	ago/14	5	-1,44	-1,12
jul/02	ago/02	2	0,27	0,2	jan/15	jun/15	6	-1,58	-0,89
fev/03	mai/03	4	1,1	0,62	out/15	nov/15	2	-1,53	-1,4
jan/04	abr/04	4	3,08	2,22	jul/16	nov/16	5	-3,07	-2,01
jun/04	ago/04	3	1,12	0,73	mar/17	abr/17	2	-0,85	-0,67
jun/05	ago/05	3	1,23	1,03	dez/17	jan/18	2	-0,83	-0,6
jun/07	ago/07	3	0,91	0,55	jun/18	jan/19	8	-2,64	-1,69
out/07	jan/08	4	0,53	0,33	mai/19	jun/19	2	-0,62	-0,59
mar/08	jun/08	4	0,8	0,35					
ago/08	out/08	3	1,03	0,9					
fev/09	out/09	9	1,2	0,84					
jan/11	set/11	9	1,97	1,05					
dez/11	fev/12	3	0,74	0,53					
jul/12	ago/12	2	0,24	0,23					
ago/13	mar/14	8	0,9	0,66					
set/14	dez/14	4	1,64	0,84					
jul/15	set/15	3	0,42	0,31					
dez/15	jun/16	7	1,38	0,59					
dez/16	fev/17	3	0,76	0,38					
mai/17	jul/17	3	0,53	0,26					
fev/18	mai/18	4	0,89	0,65					
fev/19	abr/19	3	0,54	0,44					
jul/19	out/19	4	0,53	0,28					

Anexo 6

RH-6 (Litoral)									
Sequência Chuvosa do SPI-3					Sequência Seca do SPI-3				
Ínicio	Fim	Duração (meses)	Pico Máximo	Média	Ínicio	Fim	Duração (meses)	Pico Máximo	Média
fev/63	mai/63	4	1,41	0,89	mar/62	set/62	7	-1,41	-1
dez/63	nov/64	12	2,47	1,88	mar/63	nov/63	6	-0,96	-0,5
mai/65	ago/65	4	1,4	0,65	dez/64	abr/65	5	-1,57	-0,99
jan/66	mar/66	3	0,71	0,35	set/65	dez/65	4	-1,36	-0,6
jul/66	nov/66	5	1,46	0,85	abr/66	jun/66	3	-1,24	-0,88
mar/67	jun/67	4	0,86	0,47	dez/66	fev/67	3	-1,47	-0,96
abr/70	mai/70	2	0,4	0,25	jul/67	fev/68	8	-0,81	-0,57
ago/70	out/70	3	1,31	1,01	abr/68	jun/69	15	-2,47	-1,28
mai/71	jul/71	3	0,47	0,3	ago/69	mar/70	8	-2,48	-0,85
set/71	jan/72	5	1,96	1,09	jun/70	jul/70	2	-0,56	-0,47
abr/73	ago/73	5	0,45	0,19	nov/70	abr/71	6	-1,16	-0,65
out/73	nov/73	2	0,63	0,49	fev/72	mar/73	14	-3,13	-1,3
jan/74	mai/74	5	1,37	0,97	fev/75	mai/75	4	-1,27	-0,6
set/74	jan/75	5	0,69	0,45	set/75	jan/76	5	-1,19	-0,74
jun/75	ago/75	3	0,41	0,18	mai/76	out/76	6	-1,13	-0,72
fev/76	abr/76	3	0,64	0,48	out/77	nov/77	2	-0,67	-0,35
nov/76	fev/77	4	2,1	1,18	jan/78	fev/78	2	-0,92	-0,61
jun/77	set/77	4	0,95	0,64	mar/79	set/79	7	-0,85	-0,62
mar/78	mai/78	3	0,82	0,5	jul/80	set/80	3	-0,6	-0,41
ago/78	fev/79	7	1,77	0,91	jun/81	nov/81	6	-1,47	-0,97
out/79	jun/80	9	1,68	0,8	mar/82	jun/82	4	-0,67	-0,41
out/80	mai/81	8	1,41	0,72	dez/82	jan/83	2	-1	-0,78
dez/81	fev/82	3	0,65	0,55	abr/83	mar/84	12	-1,65	-0,74
jul/82	nov/82	5	0,76	0,39	out/87	fev/88	5	-1,48	-0,9
fev/83	mar/83	2	0,44	0,44	fev/89	mar/89	2	-0,83	-0,74
abr/84	dez/84	9	1,55	0,79	mai/92	jul/92	3	-0,63	-0,5
fev/85	set/85	8	1,74	1,39	dez/92	out/93	11	-2,21	-1,21
jan/86	jan/87	13	2,64	1,35	out/94	mai/95	8	-0,86	-0,47
mar/87	set/87	7	1,25	0,91	set/95	dez/95	4	-2,63	-0,98
mar/88	out/88	8	1,34	0,87	jun/97	dez/97	7	-2,78	-1,14
dez/88	jan/89	2	0,2	0,15	fev/98	ago/98	7	-2,48	-1,23
abr/89	fev/90	11	2,85	1,45	nov/98	nov/99	13	-1,91	-1,27
abr/90	dez/90	9	2,4	1,27	fev/01	dez/01	11	-1,64	-0,9
abr/91	jul/91	4	0,67	0,44	set/02	jan/03	5	-0,69	-0,55
out/91	abr/92	7	1,39	0,89	set/03	nov/03	3	-0,93	-0,45
ago/92	nov/92	4	0,26	0,16	out/04	abr/05	7	-2,07	-1,47
nov/93	jan/94	3	0,54	0,35	nov/05	jan/07	15	-2,24	-0,95
mar/94	set/94	7	2,29	1,27	fev/08	mar/08	2	-1,03	-0,56
jun/95	ago/95	3	0,73	0,41	fev/10	set/10	8	-1,91	-0,89
mar/96	jun/96	4	1,13	0,81	nov/10	dez/10	2	-0,6	-0,5
set/96	dez/96	4	1,07	0,72	abr/12	jun/12	3	-2,28	-1,45
fev/97	mai/97	4	0,93	0,59	fev/14	set/14	8	-0,85	-0,48
set/98	out/98	2	0,35	0,3	abr/15	jul/15	4	-1,25	-0,64
dez/99	fev/00	3	0,74	0,6	set/15	dez/15	3	-1,62	-1,06
mai/00	jan/01	9	1,67	1,17	jul/16	nov/16	5	-2,62	-1,69
jan/02	mar/02	3	0,98	0,87	mar/17	abr/17	2	-0,66	-0,49
jul/02	ago/02	2	0,34	0,24	jun/18	dez/18	7	-1,71	-1,24
fev/03	abr/03	3	1,28	0,99	out/19	dez/19	3	-0,99	-0,74
dez/03	abr/04	5	2,28	1,27					
jun/04	set/04	4	0,96	0,64					
mai/05	ago/05	4	1,04	0,7					
fev/07	abr/07	3	0,14	0,13					
jun/07	ago/07	3	0,66	0,46					
out/07	nov/07	2	0,8	0,5					
abr/08	out/08	7	1,2	0,57					
fev/09	set/09	8	1,19	0,94					
jan/11	out/11	10	1,38	0,87					
jan/12	mar/12	3	1,06	0,77					
jul/12	ago/12	2	0,33	0,28					
jun/13	jan/14	8	1,85	0,97					
out/14	dez/14	3	1,53	0,85					
dez/15	fev/16	3	0,95	0,86					
abr/16	jun/16	3	0,59	0,32					
dez/16	fev/17	3	0,56	0,36					
mai/17	set/17	5	0,96	0,61					
fev/18	mai/18	4	0,55	0,34					
jan/19	abr/19	4	0,75	0,41					
jun/19	set/19	4	0,91	0,59					

CAPÍTULO 3

RELAÇÕES ENTRE A VARIABILIDADE DE ÍNDICES CLIMÁTICOS E A PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA NO ESTADO DA PARAÍBA

RESUMO

Este estudo aborda a relação entre o clima e prática agrícola no Estado da Paraíba no período de 2000 a 2023. Para isso utilizou-se a metodologia do Índice de Precipitação Padronizado - SPI e Índice de Severidade de Seca – DSI, obtidas da plataforma GEE para período estudado. A partir de então determinou-se a relação funcional entre os Índice Climáticos e produtividade agrícola no Estado, no sentido de investigar como as flutuações no padrão climáticos poderiam vir afetar a produção agrícola local, destacando em particular culturas subsistências específicas do Estado. Neste contexto, o objetivo principal do estudo foi fornecer informações relevantes, de como as mudanças climáticas poderiam influenciar direta ou indiretamente no rendimento das culturas, permitindo assim, que os agricultores se adaptem as variações locais, mitigando perdas e aproveitando ao máximo oportunidades proporcionadas pelas condições climáticas favoráveis. Ficou evidenciado no estudo uma relação direta entre eventos climáticos severos e a queda de produtividade no Estado.

Palavras chaves: Google Earth Engine (GEE), DSI (Índice de Severidade de Seca), Produtividade agrícola.

RELATIONSHIPS BETWEEN THE VARIABILITY OF CLIMATIC INDICES AND AGRICULTURAL PRODUCTIVITY IN THE STATE OF PARAÍBA

ABSTRACT

This study addressed and discussed topics involving climate and agricultural practices in the State of Paraíba in recent decades (period). For this purpose, the Standardized Precipitation Index (SPI) and Drought Severity Index (DSI) methodology were used, obtained from the GEE platform for the period studied. From then on, the functional relationship between the Climate Indexes and agricultural productivity in the State was determined, in order to investigate how fluctuations in the climate pattern could affect local agricultural production, highlighting in particular specific subsistence crops in the State. In this context, the main objective of the study was to provide relevant information on how climate change could directly or indirectly influence crop yields, thus allowing farmers to adapt to local variations, mitigating losses and taking full advantage of opportunities provided by favorable climate conditions. The study

demonstrated a direct relationship between severe climate events and the drop in productivity in the State.

Keywords: Google Earth Engine (GEE), DSI (Drought Severity Index), Agricultural productivity.

1. INTRODUÇÃO

A seca é um dos fenômenos climáticos mais desafiadores para a agricultura, especialmente em regiões semiáridas, como o estado da Paraíba. A irregularidade das chuvas e os longos períodos de estiagem afetam diretamente a produção agrícola, comprometendo a segurança alimentar e a sustentabilidade econômica das áreas rurais. Nesse contexto, o monitoramento da seca e a avaliação de seus impactos na produção agrícola tornam-se essenciais para a gestão eficiente dos recursos naturais e a implementação de políticas públicas eficazes.

Os índices de seca são ferramentas fundamentais para quantificar e monitorar a severidade da seca em tempo real. Ferramentas como o Índice de Precipitação Padronizada – SPI (Standardized Precipitation Index) (McKee et al., 1993) e o Índice de Severidade de Seca de Palmer – PDSI (Palmer Drought Severity Index) (Palmer, 1965), têm sido amplamente utilizadas para caracterizar as condições climáticas e estimar os impactos da falta de água sobre a vegetação, o solo e as culturas agrícolas. Recentemente, o Índice de Severidade de Seca - DSI (Drought Severity Index) proposto por (Mu et al., 2013) veio se somar e ser mais uma ferramenta bastante útil para o monitoramento de secas. Esses índices ajudam a prever eventos de seca, fornecendo informações cruciais para a tomada de decisões pelos produtores e autoridades locais.

A produção agrícola no estado da Paraíba, dependente das chuvas regulares para o cultivo de alimentos e culturas de comercialização, sofre consideráveis perdas em períodos de seca prolongada (Embrapa, 2019). A falta de água afeta não apenas a quantidade, mas também a qualidade das colheitas, com impactos diretos nas principais atividades econômicas rurais, como o cultivo de feijão, milho, algodão e a produção de frutas. Portanto, o entendimento e a utilização dos índices de seca são essenciais para a adaptação das agriculturas às mudanças climáticas e a mitigação dos efeitos adversos da seca, garantindo uma produção agrícola mais resiliente.

Dessa forma, o uso estratégico de índices climáticos, aliado ao desenvolvimento de tecnologias adaptativas e à promoção de práticas agrícolas resilientes, torna-se imprescindível

para a mitigação dos impactos adversos das secas. Além disso, a implementação de políticas públicas que integrem informações climáticas aos planos de gestão agrícola pode promover maior sustentabilidade e segurança alimentar no semiárido paraibano, mesmo diante das mudanças climáticas globais (Brasil, 2021).

Este estudo teve como objetivo determinar e avaliar o Índice de Severidade de Seca (DSI) em relação às condições climáticas da Paraíba, além de comparar o desempenho do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) observado com o DSI estimado. Também buscou-se verificar a associação entre esses índices e a produtividade agrícola no Estado, analisando o impacto das variações climáticas sobre a produção local.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

Localizado na região Nordeste do Brasil - NEB, o Estado da Paraíba é composto por 223 municípios, os quais apresentam características geográficas peculiares com distintos regimes pluviométricos. Possui área territorial de 56.467,242 km², com população de aproximadamente 3.974.687 habitantes (IBGE, 2022). Está localizado na região tropical entre os paralelos 6°02'12" e 8°19'18" S, e entre os meridianos 34°45'54" e 38°45'45" W. Essa localização é crucial para compreender os padrões climáticos que afetam o estado. Essa heterogeneidade influencia não apenas os aspectos naturais, mas também os sociais, culturais e econômicos, criando desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável da região.

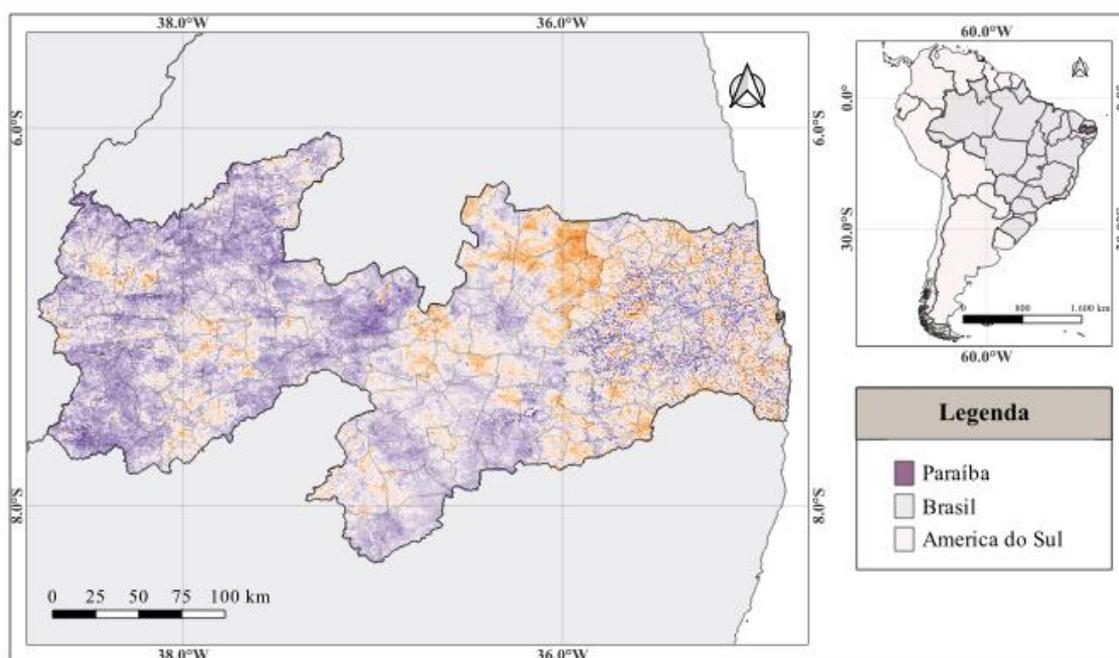


Figura 1: Localização do Estado da Paraíba (Distribuição do DSI para o ano de 2023) (Fonte: Autora, 2025).

2.2. Obtenção dos dados para o estudo

2.2.1 Processamento de Imagens de Satélite

As imagens para análise estão descritas na Tabela 1, com as características principais de cada uma, e a descrição mais detalhada se encontram nos subitens 2.2.1.1 e 2.2.1.2. Todas essas imagens estão presentes na plataforma do Google Earth Engine (GEE) e foram importadas a partir do script construído para as análises deste estudo.

Tabela 1. Dados utilizados de precipitação, evapotranspiração e índice de vegetação mensal obtidos sensores CHIRPS e MOD16A2 e MOD13Q1.

N ^o	Nome	Versão	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Unidade	Período Temporal	Ref.
1	CHIRPS: Monthly Precipitation Estimates		0,05°	1 mês	mm/h	2000-01-01 a 2023-12-01	(Funk, et al 2015)
2	MOD16A2.006: Terra Net Evapotranspiration	6	500m	8 dias	Kg/m ² /8 dias	2001-01-01 a 2023-12-02	(Running et al, 2017)
3	MOD13Q1.006 Terra Vegetation Indices	6	250m	16 dias	-	2000-02-18 a 2023-12-18	(Didan, 2015)

Fonte: Elaborada pela autora.

A rotina do processamento das imagens foi feita a partir da plataforma GEE de acordo com o fluxograma (Figura 2). Cada coleção de imagens possui 247 imagens para o período de 24 anos, que foram processadas e analisadas anualmente. Diante do grande volume de dados, a opção pela plataforma GEE foi necessária, por realizar análises em big data geográfica, e permitir uma rapidez no processamento em várias aplicações ambientais com sua capacidade computacional única, disponibilizada gratuitamente de imagens de satélite e ferramentas de script. A capacidade dos pesquisadores de realizar análises geoespaciais em diversas áreas aumentou com o surgimento dessa plataforma (Tamiminia et al., 2020).

O script para o desenvolvimento desse estudo foi construído ao longo do avanço da pesquisa na linguagem de JavaScript seguindo a rotina no GEE (Figura 2). Para criar cada coleção de imagem foi recortado no Estado, na série temporal de 24 anos e a conversão da unidade das imagens CHIRPS com a precipitação acumulada e do produto do MODIS MOD16A2 com dados de evapotranspiração potencial (ETP) no GEE. Após a conversão das unidades, foi realizada a média da coleção (247 imagens) para uma imagem de cada ano, junto com desvio padrão. Em seguida, os valores brutos foram organizados em uma tabela com dados de precipitação e evapotranspiração anual para o estado.

As funções dos indicadores de seca escolhidos para analisar a vulnerabilidade à seca, Standardized Precipitation Index (SPI) e Índice de severidade a Seca (DSI), foram construídas e calculadas no GEE, o que gerou uma imagem para cada ano. Em seguida, foram baixadas as imagens dos anos mais secos e mais úmidos em formato geotiff e resolução de m/pixel de 250 m. Essas imagens foram processadas por meio de realces de contrastes para destacar o déficit hídrico e demanda hídrica dentro do Estado, no software Qgis 3.34.

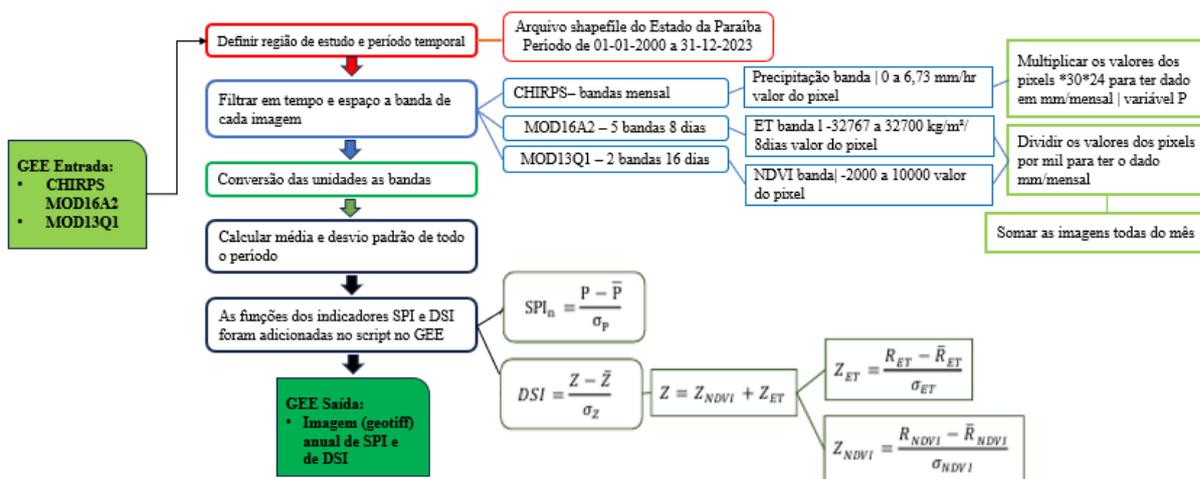


Figura 2: Fluxograma da rotina no GEE. (Fonte: Autora, 2025).

2.2.L1.1 CHIRPS

Os dados pluviométricos foram obtidos pelas imagens CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) é um conjunto de dados de precipitação quase global de mais de 35 anos. Abrangendo 50°S-50°N (e todas as longitudes) e variando de 1981 até quase o presente, o CHIRPS incorpora nossa climatologia interna, CHPclim, imagens de satélite de resolução de 0,05° e dados de estação in situ para criar séries temporais de precipitação em grade para análise de tendências e monitoramento de seca sazonal.

2.2.1.2 MODIS – MOD16A2 e MOD13Q1

Um dos motivos principais do uso do sensor MODIS foi a praticidade da disponibilidade dos dados em forma de produtos. Em cada produto é aplicado algoritmos específicos para estudos de balanço de radiação, de vegetação e cobertura da terra em diferentes níveis de processamento, os dados finais são em forma de coleções, sendo que todas as imagens das coleções anteriores são reprocessadas em função da atualização contínua nos algoritmos.

O sensor MODIS possui elevada resolução radiométrica (12 bits), medida por meio de 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14,4 µm do espectro eletromagnético. As

duas primeiras bandas (620 - 679 nm e 841 - 876 nm) possuem resolução espacial de 250 m no nadir. As 5 bandas seguintes (459 - 479 nm; 545 - 565 nm; 1230 - 1250 nm; 1628 - 1652 nm; e 2105 - 2155 nm) diferem das bandas anteriores pelo tamanho do pixel de 500 m. E as demais 29 bandas possuem 1 km de resolução espacial.

Foi utilizado o produto com dados de evapotranspiração obtidos pelo satélite MODIS do sensor Terra. O MOD16A2 Versão 6 de Evapotranspiração e de fluxo de calor latente é uma composição de imagens com 8 dias em uma resolução de 500 metros. As cenas utilizadas serão 38 de datas próximas umas das outras, geradas preferencialmente entre início de janeiro e dezembro, para cada ano avaliado de 2000 a 2023.

O algoritmo usado para a coleção do produto de dados do MOD16 é baseado na lógica da equação Penman-Monteith, que inclui entrada de dados para análises meteorológicas diárias com o sensor MODIS, remotamente entram produtos de dados sensíveis, tais como propriedades dinâmicas de vegetação, albedo e cobertura do solo (Running et al., 2019).

Outro produto MODIS do Terra usado foi MOD13Q1, a versão 6, a mais atual e as imagens são geradas a cada 16 dias com resolução espacial de 250 metros. O produto MOD13Q1 fornece duas camadas de vegetação primária, por meio de dois índices de vegetação. A primeira camada é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), derivado da série de satélites National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) acoplado ao sistema sensor orbital Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). A segunda camada é com o Índice de Vegetação Melhorada (EVI), que aprimora a sensibilidade em regiões de alta biomassa, pela redução nas influências atmosféricas, o que facilita o monitoramento da vegetação (Didan, 2015).

Assim, o produto MOD13Q1 é composto com os melhores valores de pixel no local observado no período de 16 dias. A seleção depende dos critérios: cobertura de nuvem e ângulo de visão mínima, e o valor dos índices de vegetação mais altos. É um produto que contém muitas camadas, além as de observação comum de reflectância, vem uma de qualidade e confiabilidade dos pixels (Didan, 2015; Sarvia et al., 2021).

2.2.1.3 Dados observados de precipitação e produção agrícola

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram utilizados dados de precipitação mensal de provenientes de séries temporais de 223 postos pluviométricos distribuídos em todo Estado da Paraíba no período de 2000 a 2023. Esses dados foram obtidos da Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs). Foram utilizados também, dados de produtividade agrícola (área colhida e rendimento médio) anual do algodão herbáceo, cana de açúcar, feijão e milho para todo o

Estado entre os anos de 2000 e 2023 oriundos do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA).

2.3. Análise dos dados

Parte da análise dos dados foi realizada na plataforma do GEE ao gerar um raster com a média anual e mensal, juntamente com o valor de desvio padrão, de precipitação, evapotranspiração e NDVI, pois cada coleção das imagens CHIRPS e MODIS possui 247 imagens cada. Ao fazer à média, possibilitou a redução na quantidade de imagens, uma para cada mês, ou seja, 12 imagens para cada ano destes foram criadas funções dos índices de severidade de seca e precipitação padronizada, que serão descritos nos subitens: 2.3.1 e 2.3.2 respectivamente. E assim, analisar a demanda hídrica e a sua pressão quanto ao uso na produção agrícola por meio das equações que calculam a duração e a severidade da seca. Para análise dos indicadores e da severidade da seca, foram utilizados os softwares: Excel 365, Qgis 3.34.0 e DrinC 1.7.

2.3.1 Índice de Severidade de Seca (Drought Severity Index - DSI)

Os satélites Terra e Aqua do MODIS incluem os produtos MOD16 ET/PET (Mu et al. 2007, 2009, 2011b) e fornecem um meio para quantificar os fluxos de água entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera. Os dados MOD16 ET e PET são usados como entrada primária para calcular o DSI em uma base global para todos os ecossistemas terrestres em intervalos de tempo contínuos de 8 dias, mensais e anuais e resolução espacial de 1 km.

O desenvolvimento dos índices de vegetação, uma das premissas do sensoriamento remoto, foi para monitorar e quantificar as condições e distribuições espaciais das vegetações, usando os dados digitais de reflectâncias espectrais da radiação eletromagnéticas. O objetivo é utilizar esses índices para condensar as informações espectrais e discriminar o que é vegetação e não vegetação (LIU, 2015). Assim, o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) permite construir perfis sazonais e temporais da vegetação, e o Índice de Vegetação Melhorada (Enhanced Vegetation Index – EVI) aperfeiçoa o sinal da vegetação para detecção com maiores densidades de biomassa e reduz a influência do solo e da atmosfera sobre a resposta do dossel das árvores (Ponzoni et al., 2012).

Com os dados ET/ETP e NDVI faz o cálculo do DSI, pois são variáveis nesse indicador, como está descrito no Quadro 1.

Quadro 1. Equações e variáveis do DSI.

DSI		
Padronizar os dados de NDVI, ET/PET $Z_{NDVI} = \frac{R_{NDVI} - \bar{R}_{NDVI}}{\sigma_{NDVI}}$ $Z_{ET/PET} = \frac{R_{ET/PET} - \bar{R}_{ET/PET}}{\sigma_{ET/PET}}$	R	Representa o valor de NDVI e ET/PET em certo período
	\bar{R}	Representa a média dos valores ao longo da série temporal
	\bar{Z}	
	σ	Desvio Padrão
Junção $Z = Z_{NDVI} + Z_{ET/PET}$	$DSI = \frac{Z - \bar{Z}}{\sigma_Z}$	

Fonte: Mu, 2023.

2.3.2 Índice de Precipitação Padronizado (Standardized Precipitation Index - SPI)

Um dos índices mais comumente usados que podem ser derivados de dados de sensoriamento remoto é o Standardized Precipitation Index (SPI). Desenvolvido por McKee et al. (1993), recomendado como o principal indicador de seca pelo World Meteorological Organization (WMO) (WMO, 2006). Juntos, WMO e a Universidade de Nebraska em Lincoln (EUA) construíram uma Declaração de Lincoln sobre os índices de seca com recomendação de um índice universal de seca meteorológica (Hayes et al., 2011). Esta declaração foi um estudo de revisão dos indicadores de seca usados mundialmente para os diferentes tipos de seca – meteorológica, agricultura e hidrológica, observando as limitações, pontos fortes e anomalias de cada um, para criar um consenso e ter um indicador padrão.

A principal vantagem do SPI é que mede anomalias normalizadas na precipitação, ou seja, os valores têm a mesma probabilidade de ocorrência, independentemente do período de tempo, local ou escala, e representam igualmente eventos de inundação, chuva e seca, seca ao longo de uma série temporal longa. Além de seu resultado depender de apenas um dado, a precipitação, que pode ser uma vantagem pela praticidade, porém uma desvantagem para uma análise mais aprofundada (West et al., 2019).

Para efetuar o cálculo do SPI utilizou-se o software livre Drought Indices Calculator – (DrinC 1.7) desenvolvido pelo Centre for the Assessment of Natural Hazards and Proactive Planning and the Laboratory of Reclamation Works and Water Resources Management of the National Technical University of Athens (Tigkas et al., 2015), foi liberado para público em 17 de abril de 2019. O dado carregado nele foi a série temporal de precipitação obtida a partir dos

dados fornecidos pela AESA para o período de 24 anos, estes foram ajustados na distribuição de probabilidade Gama. Em seguida, a probabilidade acumulada de ocorrência de cada total mensal é estimada (Tabela 2). O resultado é uma planilha em arquivo xls, formato proprietário do MSEXcel com SPI -3, SPI -6 e SPI -12, respectivamente de 3, 6 e 12 meses.

Quadro 2. Equação e variáveis do SPI

SPI		
$SPI_n = \frac{P - \bar{P}}{\sigma_P}$	n	É a escala mensal acumulado 3/6/12 meses
	P	É o somatório da precipitação dos meses (mm)
	\bar{P}	Representa a média da precipitação período total analisado
	σ	Desvio Padrão do período total analisado
$g(x) = \frac{1}{B^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-x/b}$	g(x)	Distribuição da probabilidade Gama
	a	Parâmetro de forma estimado
	b	Parâmetro de escala estimado
	x	Quantidade de chuva precipitada
$\Gamma_{(a)} = \int_0^\infty y^{a-1} e^{-y} dy$	$\Gamma_{(a)}$	Função Gama

Fonte: MCKEE et al, 1993.

O que cada resultado do SPI representa na demanda de água em uma determinada região, o SPI até 3 meses representa as condições de água no solo em curto e médio prazos; identifica secas de curto prazo; e a estimativa da precipitação sazonal, por ser suscetível às grandes variações da magnitude da precipitação referente a medida para aquele período. O SPI-6 meses verifica a transição entre os impactos de curto e longo prazo causados pela seca; demonstra se pode ter anomalias nas reservas de água e vazões dos rios. E o SPI-12 meses pode retratar se há uma escassez de água e os níveis dos lençóis freáticos (Guedes et al., 2012; Sousa et al., 2016).

As classes de severidade da seca dos índices DSI e SPI estão na tabela 2, variando de extremamente úmido a extremamente seco. Os valores negativos representam o nível de secura e os valores positivos nível de umidade.

Tabela 2. Classificação da severidade da seca dos índices DSI e SPI

Faixa de valor dos índices	Severidade de seca
-----------------------------------	---------------------------

Maior que 2	Extremamente úmido
1,50 a 1,99	Severamente úmido
1,00 a 1,49	Moderadamente úmido
0,00 a 0,99	Meio úmido
-0,99 a 0,00	Seca Leve
-1,00 a -1,49	Seca moderada
-1,50 a -1,99	Seca severa
Abaixo de -2	Seca extrema

Fonte: adaptado pela autora

2.3.3. Análise Estatística

Para fazer a análise comparativa entre o SPI e DSI foram utilizados os indicadores estatísticos do Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), dados pelas expressões abaixo (WILKS, 2006):

$$\mathbf{REQM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x-y)^2}{n}} \quad (1)$$

$$\mathbf{EMA} = \sum_{i=1}^n \frac{|x-y|}{n} \quad (2)$$

$$\mathbf{EPAM} = \frac{\sum_{i=1}^n |EP|}{n} \quad (3)$$

x: variáveis observadas

y: variáveis simuladas a partir da metodologia proposta

n: número de observações

Calculou-se ainda o coeficiente de Correlação Linear de Person (r) e seu Coeficiente de Determinação (R²) (WILKS, 2006).

$$\mathbf{r} = \frac{\sum_{i=1}^n (x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x-\bar{x})^2][\sum_{i=1}^n (y-\bar{y})^2]}}$$

Para a validação dos dados foram aplicados testes estatísticos para analisar a significância e o comportamento da variância dos resultados com critério de 95% de confiança. Tanto para os dados brutos – as variáveis de precipitação e produção agrícola, e quanto para os índices foram analisados com estatística descritiva, com uso de gráfico, teste de normalidade e aplicação de teste de correlação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na figura 3 são apresentados e descritos os resultados obtidos da metodologia proposto do SPI (Mckee et al, 1993) e DSI (Mu et al.2013) aplicada aos totais médios mensais da precipitação do período de 24 anos (2000 a 2023) para cada uma das regiões homogêneas do Estado.

Observa-se na fig.3 o comportamento dos totais médios mensais da precipitação nas diferentes regiões homogêneas no período de estudo, apresentam variações significativas, as quais podem ter sido influenciadas por fatores climáticos regionais e globais. As regiões do litoral e do brejo apresentam os maiores índices pluviométricos devido à proximidade com o oceano Atlântico e sistemas de leste que atuam na região tais como, brisas e ondas leste as chuvas mais regulares, especialmente no outono e inverno.

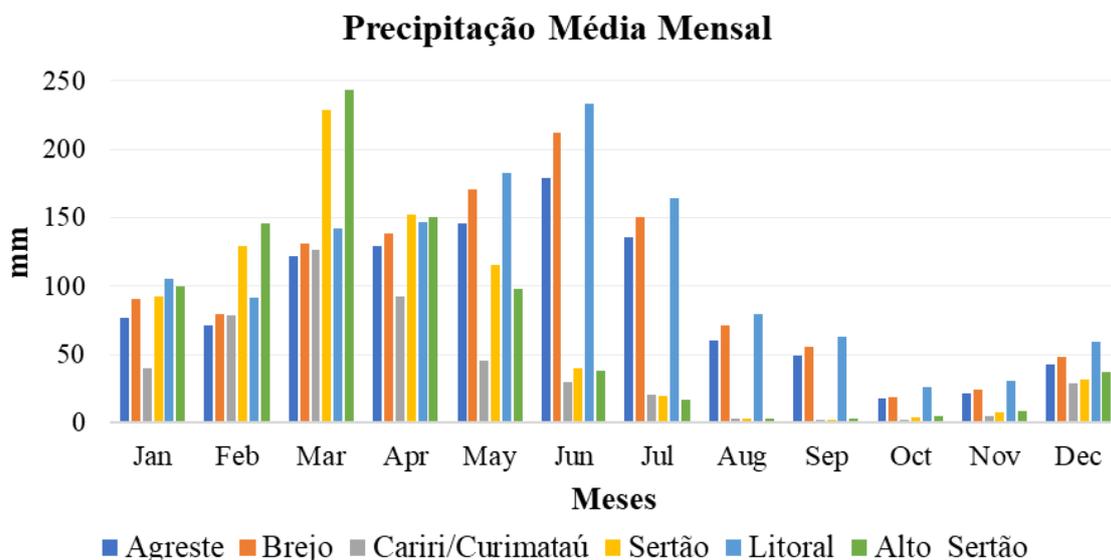


Figura 3: Totais médios mensais da Precipitação (mm) para as Regiões Homogêneas de precipitação do Estado da Paraíba para no período de 2000 a 2023.

Já o agreste expressa uma precipitação intermediária, com chuvas mais distribuídas durante o ano, mas ainda marcadas por períodos de estiagem, principalmente na região central Cariri e Curimataú onde se registram os menores índice pluviométricos o estado. No setor oeste (alto-sertão e sertão paraibano) as chuvas índices pluviométricos elevados, concentradas entre fevereiro e abril, figura 3. As chuvas no estado são influenciadas por diferentes sistemas meteorológicos atuando na região em diferentes épocas do ano (Gan e Kousky, 1986; Uvo, 1989; Ferreira e Mello, 2005; Nobre e Shukla, 1996; Brito e Braga, 2005).

Considerando-se as tendências nos últimos anos as irregularidades no regime de chuvas na região semiárida do Nordeste (Paraíba), os eventos climáticos extremos, como secas severas

ou chuvas intensas, têm se tornado mais comuns, a influência dos fenômenos El Niño (que reduz as chuvas) e La Niña (que pode aumentá-las em algumas áreas do semiárido) (Brito e Braga 2005; Braga et al.2014).

Segundo a Embrapa, (2021), a diminuição do volume total de chuvas em muitos municípios do semiárido, agravam a crise hídrica e o impacto na agricultura de sequeiro. Alguns anos registraram chuvas acima da média, gerando enchentes e danos materiais, enquanto outros enfrentaram estiagens prolongadas.

3.1. DSI e SPI

A seguir são analisados os resultados obtidos dos índices de seca obtidos a partir do DSI-12 e SPI-12 para cada região RH no período de 24 anos. Na figura 4 ilustra a variabilidade anual para os índices DSI-12 (drought severity index) e SPI-12 (Standardized Precipitation Index) nas diferentes Regiões Homogêneas (RH) do Estado da Paraíba, no período de 2000 a 2023. Cada figura corresponde uma região (RH-1 a RH-6), perfazendo o total das 6 regiões, conforme localização no mapa da Paraíba. Os índices estão identificados com cores diferentes para facilitar a compreensão o DSI (azul) e SPI (vermelho) mostram situação de seca e umidade no decorrer dos anos.

A RH-1 (Sertão), localização região oeste da Paraíba, apresenta períodos de seca intensa destacam-se os anos 2012, 2015 e 2016, com índices negativos intensos. Quanto aos períodos úmidos, observam-se picos positivos entre 2009, 2011, 2020, 2022 e 2023 com recuperação significativa, nos anos de 2009 e 2011 para ambos, porém de magnitude diferente dos demais anos analisados evidenciado que o DSI se mostrou mais intenso quando comparado com o SPI.

Para a RH-2 (Alto Sertão) localizada na região nordeste do Sertão paraibano pode-se verificar uma alternância entre anos úmidos e secos até 2010. Secas mais severas observadas entre 2012-2016 (figura 4). Os períodos secos de maior intensidade ocorreram nos anos 2012 e 2015, evidenciados com valores negativos em ambos os índices (DSI e SPI). Já os períodos úmidos o destaque é para os anos 2009, 2020 e 2022, onde os índices SPI e DSI apresentaram picos positivos com intensidades diferentes.

Na região central RH-3 (Cariri/Curimataú), apontando Seca severa nos anos de 2012, 2015 e 2016, com valores negativos acentuados (figura 4). Os anos úmidos 2008, 2009 e 2022 aparecem como anos de recuperação, com picos positivos dos índices DSI e SPI.

A RH-4 (Agreste) situada na região centro-leste da Paraíba. Pode-se observar na figura 4 seca severa com períodos críticos negativos índices SPI e DSI nos anos 2012, 2015 e 2021.

A região em estudo apresenta uma recuperação úmida nos anos de 2004, 2008 e 2022, com picos positivos moderados.

A RH-5 (Brejo), caracterizada por um clima mais úmido, portanto menor predominância de secas severas em comparação às outras regiões. Oscilações mais equilibradas entre SPI e DSI. Há uma menor intensidade de secas, embora secas tenham ocorrido em 2010, 2012 e 2021, as variações foram menos extremas que nas outras regiões. Os períodos úmidos como nos anos de 2004, 2009 e 2022 apresentam picos positivos significativos nos índices (figura 4).

Localizada na região leste da Paraíba, caracterizada por apresentar maiores índices de precipitação propiciada pela sua proximidade com o Oceano Atlântico a RH-6 (Litoral), apresenta maior estabilidade, embora os anos de 2001, 2006, 2010, 2012 e 2023 mostrem índices negativos, a intensidade da seca (figura 4). Anos úmidos com picos positivos dos índices SPI e DSI verificou-se 2009, 2011 e 2022.

De maneira geral identificaram-se os anos de seca severa foram 2012, 2015 e 2016 ~~anos~~ críticos em quase todas as regiões homogêneas, apresentando índices negativos acentuados. Isso sugere um padrão climático regional associado a eventos de El Niño ou outras anomalias atmosféricas. Em relação aos anos de recuperação úmida destacam-se 2009 e 2022 como períodos chuvosos em quase todas as regiões e os índices positivos indicam uma melhora nas condições hídricas e no regime de precipitação.

Considerando-se a variação espacial as regiões como RH-1 (Sertão), RH-2 (Alto Sertão) e RH-3 (Cariri/Curimataú) mostraram maiores extremos secos em comparação as RH-5 (Brejo) e RH-6 (Litoral), que apresentam maior estabilidade climática e menor impacto das secas severas. E há sinais de recuperação em 2022 e 2023, especialmente nas regiões Sertão, Agreste e Brejo.

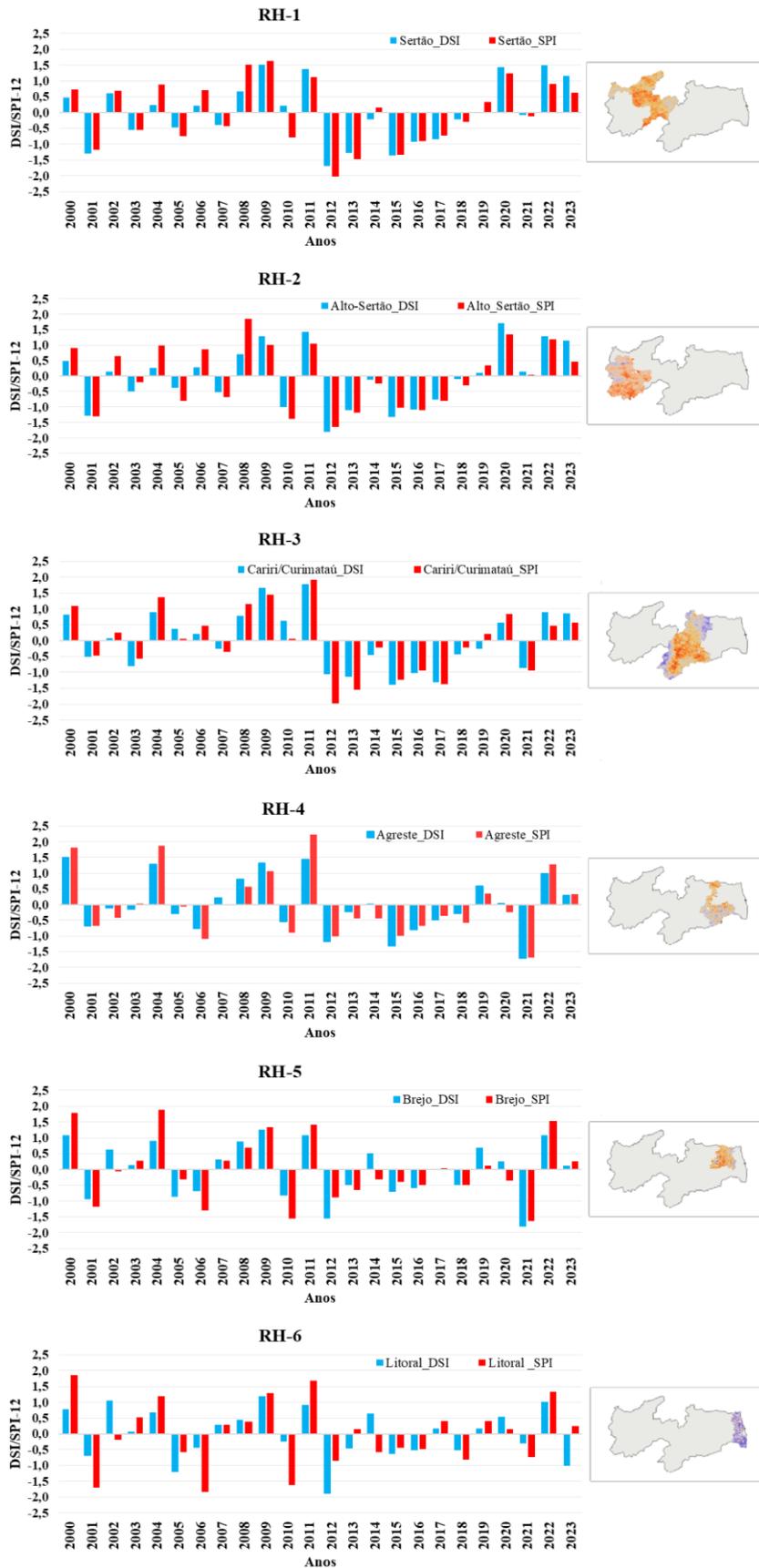


Figura 4: Variabilidade anual dos índices DSI-12 em azul e SPI-12 em vermelho para cada região homogênea

Em seguida fez-se a comparação dos índices de secos e chuvosos anual análise estatística dos métodos do mínimos quadrados (Wilks,2006). A figura 5 ilustra o digrama de dispersão e curva de regressão entre índices SPI (observado) e DSI (estimado) para cada uma das seis regiões homogêneas (RH-1 a RH-6) do Estado da Paraíba. A partir da análise estatística dos índices extremos é possível encontrar o grau de confiabilidade dos mesmos e avaliar se os métodos utilizados na estimativa dos índices são capazes de representar cada uma das regiões.

O Coeficiente de determinação (R^2) indica a porcentagem variância explicada em relação a variância total dos dados. Quanto maior o valor de R^2 , mais forte é a relação linear entre os dois índices. Já o coeficiente de correlação linear mede o grau de excelência do ajustamento aos dados da equação considerada. Sendo assim para a RH-1 (Sertão), existe uma forte correlação positiva entre SPI e DSI e valores positivos de SPI (períodos úmidos) resultam em valores negativos ou baixos de DSI, indicando redução nos períodos secos e considerando $R^2 = 0,8446$ indica que aproximadamente 84,5% da variação no DSI pode ser explicada pela variação no SPI, ou seja, para $R=0,92$ para um nível de significância de 0.05.

A RH-2 (Alto Sertão), também apresenta forte correlação positiva entre SPI e DSI. Quando o SPI aumenta (condições úmidas), o DSI diminui, indicando menos dias secos consecutivos e $R^2 = 0,8315$ sugere uma relação robusta entre os dois índices climáticos. A RH-3 (Cariri/Curimataú) tem correlação muito forte entre SPI e DSI, com $R^2 = 0,883$. E a inclinação mais alta da reta sugere que mudanças no SPI influenciam de forma significativa o DSI e valores negativos de SPI (períodos secos) se traduzem em aumentos expressivos de DSI (dias secos consecutivos).

Para a RH-4 (Agreste) a correlação é extremamente forte entre SPI e DSI. O valor de $R^2 = 0,906$ indica que 90,6% da variação no DSI pode ser explicada pela variação total no SPI. A inclinação maior indica uma resposta muito sensível do DSI às mudanças no SPI.

A RH-5 (Brejo) apresentou uma correlação positiva expressiva entre SPI e DSI, com $R^2 = 0,766$ ou seja, explicando 76,6 % da variância total para $R=0,87$ e nível de significância $\alpha = 0,05$. O DSI também na região é explicado relativamente pelo SPI em menor proporção que as regiões mais semiáridas. Já a RH-6 (Litoral) tem correlação menos expressiva entre SPI e DSI, com $R^2 = 0,423$ e $R=0,65$. O valor de R^2 indica que apenas 42,3% da variação no DSI é explicada pelo SPI. E a inclinação da reta é menor, sugerindo que outras variáveis climáticas podem ter um papel importante na variação dos dias secos consecutivos nesta região. Outro fator que pode ter influenciado (mascarado) na relação dos índices é o fato do DSI ter sido influenciado pela presença de nuvens na hora da passagem do satélite, já que a estimativa do

mesmo, depende das variáveis obtidas remotamente, e a alta nebulosidade presente na região RH-6 pode ter influenciado na determinação do DSI.

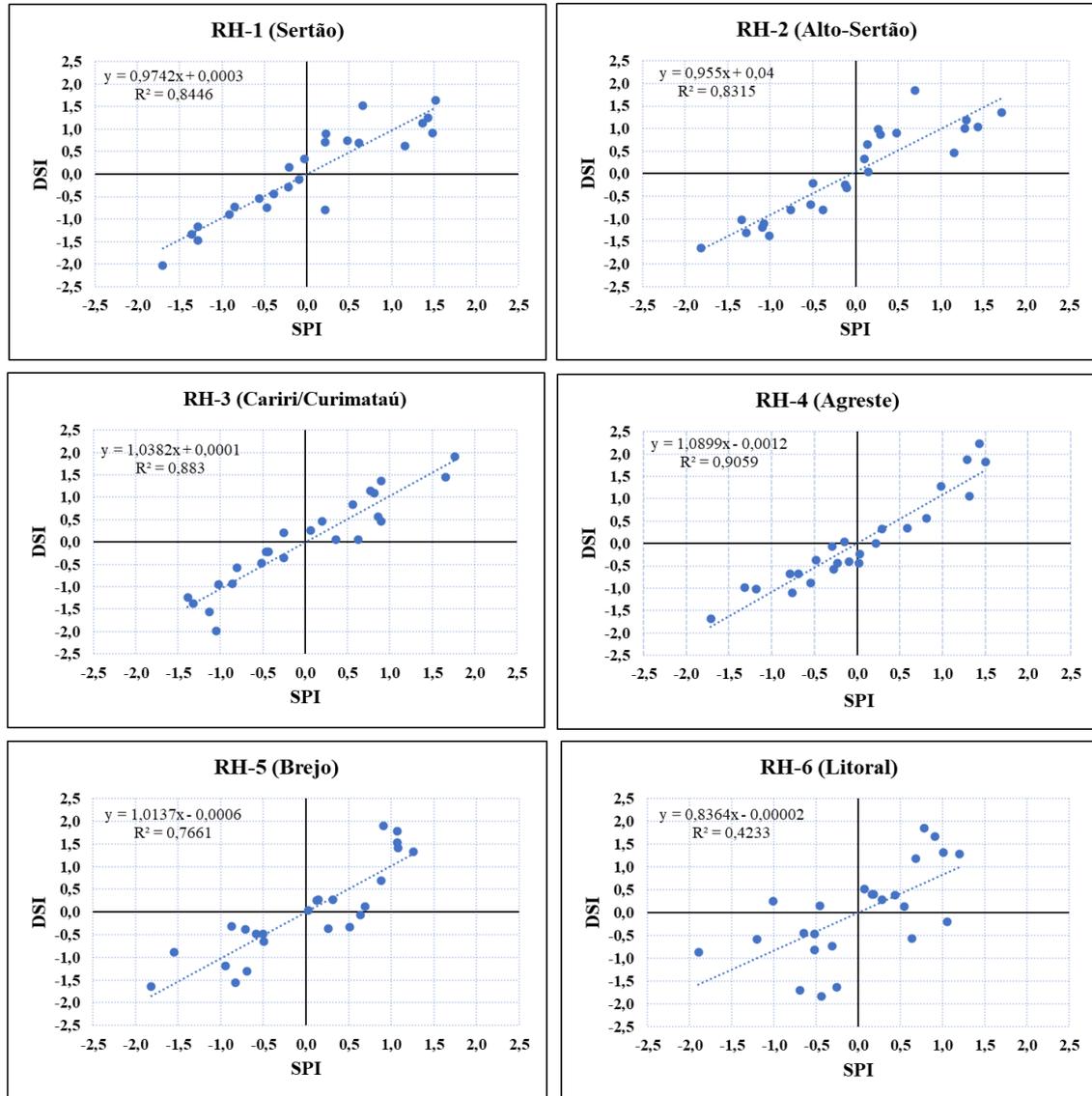


Figura 5: Digrama de dispersão e curva de regressão linear entre SPI e DSI para as seis Regiões Homogêneas (RH1-RH6).

Em síntese a figura 5 apresenta que de coeficiente determinação e correlação linear entre o SPI e o DSI é bastante expressivo para nível de significância de $\alpha=0,05$ nas regiões semiáridas do Estado da Paraíba (RH-1 a RH-4). Nessas áreas, o déficit de precipitação influencia fortemente a frequência de dias secos consecutivos. Já nas regiões mais úmidas (RH-5 e RH-6), essa relação é menos expressiva, sugerindo que outros fatores climáticos têm um papel mais importante. Pois na região leste do estado, e uma região com bastante nebulosidade que podendo interferir nos resultados.

3.2. Espacialização dos índices DSI e SPI

A seguir são apresentadas e analisadas a espacialização anual dos índices extremos em cada uma das Regiões Homogêneas do Estado. Cada mapa representa a intensidade de condições secas ou úmidas com base na legenda de cores, destacando os extremos climáticos.

A figura 6 ilustra a variabilidade espacial detalhada dos índices DSI e SPI para a Região Homogênea RH-1 (Sertão) da Paraíba no período estudado. O DSI no ano de 2015 tem predominância de tons vermelhos e alaranjados que indicam condições severamente secas sendo as áreas centrais e sul do Sertão as mais afetadas, com secas severas ou extrema. O índice DSI para 2015 mostra um ano de forte estiagem, refletindo as condições extremas de seca no Sertão. Este período coincidiu com um dos anos mais críticos da crise hídrica na região, com impactos severos na agricultura, recursos hídricos e na população local.

Com relação ao DSI do ano de 2022 a predominância de tons azuis e roxos que representam condições úmidas. As áreas centrais e setentrionais mostram valores mais altos, chegando a extremo úmido (acima de 2,0). O índice DSI de 2022 indica uma recuperação significativa das condições hídricas, com chuvas mais abundantes na RH-1. Este padrão úmido quebra a sequência de anos secos, trazendo alívio para a agricultura e os sistemas hídricos.

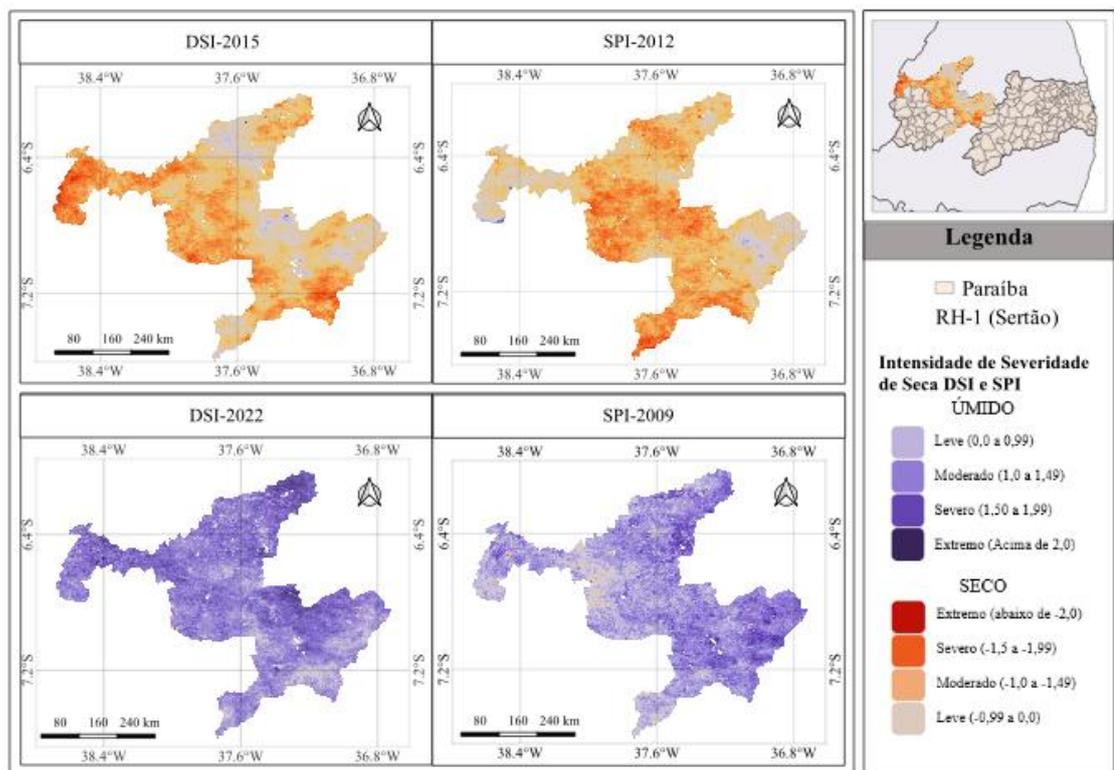


Figura 6: Variabilidade espacial do DSI e SPI nos anos mais seco 2015 e 2012 e mais úmido de 2022 e 2009 para a RH-1 (Sertão).

A análise do SPI para o ano de 2012, apontam para seca moderada a extrema. A distribuição espacial mostra seca mais severa na porção leste e central do Sertão. O SPI de 2012 confirma um período de baixa precipitação generalizada. O SPI (que mede desvios em relação à média de precipitação) aponta para anos consecutivos de déficit de chuva, afetando o ciclo hidrológico local e reforçando a vulnerabilidade da região semiárida.

No que se refere ao SPI do ano de 2009 (Figura 6) indica umidade moderada a extrema em quase toda a região. As áreas no sul e leste apresentam as maiores intensidades úmidas. O SPI de 2009 destaca um ano chuvoso, com valores de precipitação superiores à média histórica. Este cenário contrasta com os anos críticos de seca (como 2012 e 2015) e reforça a variabilidade climática da região semiárida.

A figura.6 ilustra os mapas referentes aos anos de 2012 (SPI) e 2015 (DSI) destacando se os anos mais críticos de seca. Por outro lado, os mapas de 2009 (SPI) e 2022 (DSI) evidenciam os anos chuvosos, mostrando a alternância entre extremos secos e úmidos no Sertão. A variabilidade espacial dos índices demonstra que as condições climáticas podem variar em intensidade e distribuição, afetando diferentes partes da região com intensidades distintas.

A figura 7 apresenta a análise comparativa dos índices DSI e SPI da severidade das condições de seca e umidade para região RH-2 (Alto Sertão) da Paraíba. A intensidade e variabilidade da seca no ano de 2012 (DSI) foi marcado por seca extrema e generalizada, com predominância de tonalidades vermelhas e laranjas, definido um período crítico para a região. Em 2001 (SPI), no entanto houve uma distribuição heterogênea de seca e umidade, com áreas alternando entre condições secas (leste) e úmidas (oeste).

Os períodos de recuperação hídrica destacados na figura 7 para os anos de 2020 (DSI) e 2009 (SPI) apresentaram uma predominância de condições úmidas (tonalidades de azul e roxo), revelando anos de recuperação com maior incidência de chuvas na região. Áreas com umidade severa a extrema são visíveis principalmente no setor central e sul da região.

O padrão espacial da seca, tende a afetar, com maior intensidade, o setor sul e leste da região em períodos críticos, como observado em 2012 e 2001. Já a umidade predominante nos anos úmidos (2020 e 2009) se distribui de forma mais homogênea cobrindo grandes áreas.

A comparação dos anos revela uma variabilidade climática significativa entre períodos de seca extrema (2012) e umidade generalizada (2009 e 2020). Os índices DSI e SPI são complementares e oferecem uma visão específica das condições de seca e umidade na região.

A distribuição espacial da seca e da umidade varia conforme o ano, com áreas críticas sendo mais visíveis no sul e leste em períodos secos.

A região RH-2 (Alto Sertão) enfrenta períodos recorrentes de seca severa, como evidenciado em 2012, mas também experimenta fases de recuperação hídrica, como em 2020 e 2009. O uso de índices como DSI e SPI permite identificar padrões de seca e umidade com precisão, oferecendo subsídios importantes para gestão hídrica, planejamento agrícola e políticas públicas externas para a mitigação dos impactos da seca na região. A análise espacial mostra que as secas mais severas tendem a se concentrar em áreas específicas, o que reforça a necessidade de monitoramento climático contínuo e estratégias de adaptação localizadas.

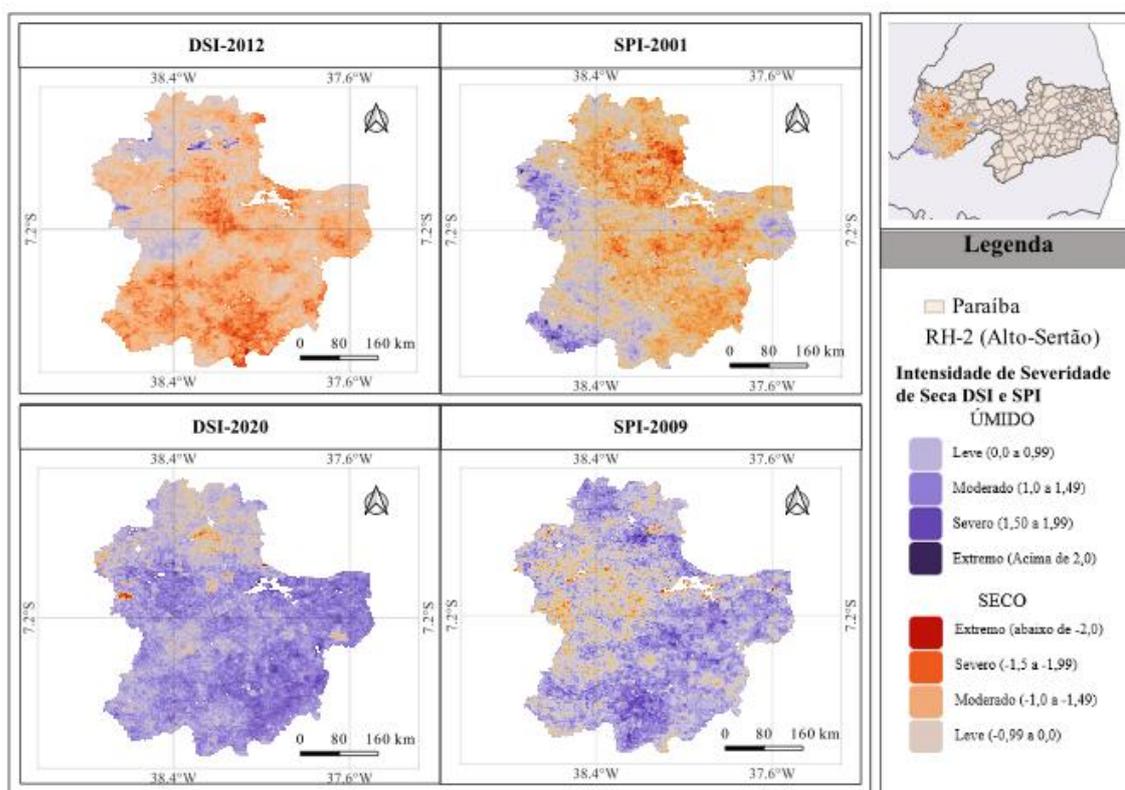


Figura 7: Variabilidade espacial do DSI e SPI nos anos mais seco 2012 e 2001 e mais úmido 2020 e 2009 para a RH-2 (Alto Sertão).

A figura 8 apresenta quatro mapas que analisam a severidade das condições hídricas na RH-3 (Cariri/Curimataú), localizada no estado da Paraíba, utilizando dois índices principais: DSI, índice que avalia a intensidade da seca e o SPI índice que mede o déficit ou excesso de ocorrência em diferentes escalas temporais.

Nos mapas DSI (2017) e SPI (2015), há predominância de tons vermelhos e alaranjados aumentando condições de seca severa a extremos na maior parte da região. A seca de 2017 foi particularmente severa e mais abrangente, afetando significativamente o setor central e leste da região.

Nos mapas DSI (2011) e SPI (2009), predominam tons azuis e roxos, que indicam condições úmidas. O ano de 2009 apresenta umidade extrema em praticamente toda a região, refletindo um período de alta ocorrência e disponibilidade hídrica. Em 2011, a umidade foi generalizada, com destaque para o norte e oeste. Esses anos evidenciaram períodos de alta precipitação e recuperação hídrica.

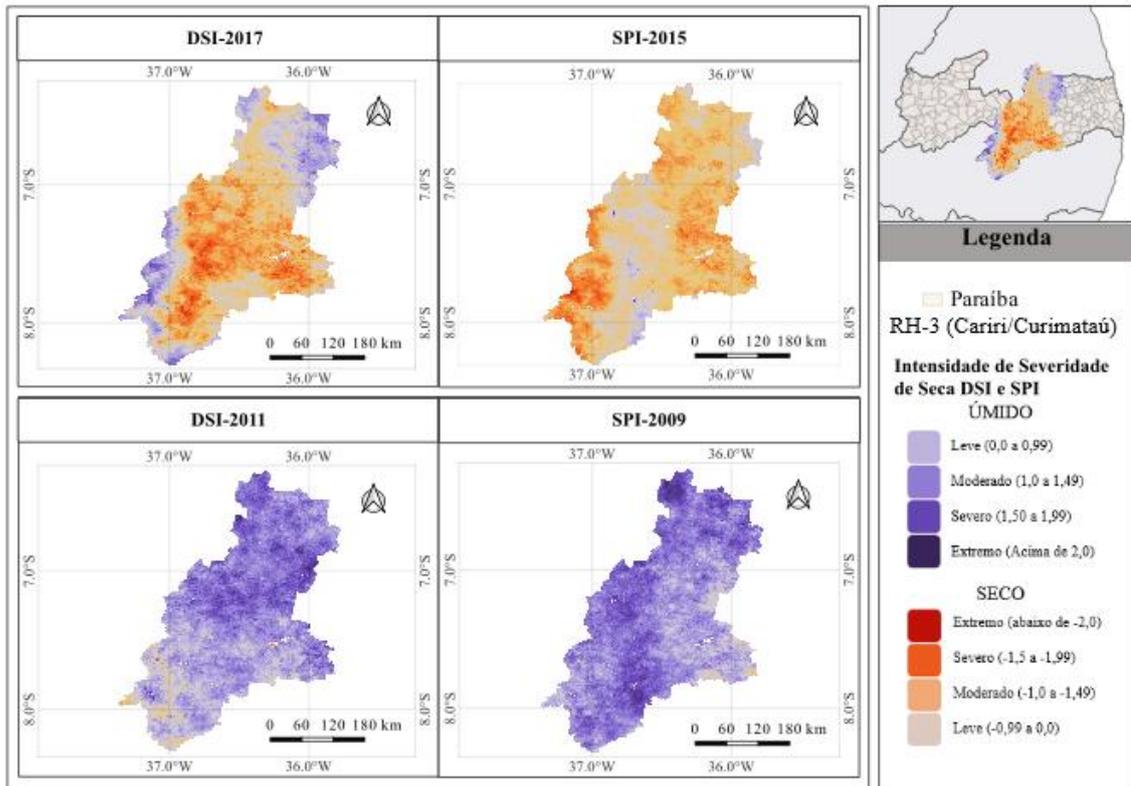


Figura 8: Variabilidade espacial do DSI e SPI nos anos mais seco 2017 e 2015 e mais úmido 2011 e 2009 para a RH-3 (Cariri/Curimataú).

Na figura 9 encontra-se uma análise comparativa dos índices DSI e SPI para os anos 2000, 2011, 2012 e 2021, evidenciando padrões temporais e espaciais de seca e umidade na região RH-5 (Agreste) do estado da Paraíba.

Anos de seca Intensa como para o DSI em 2021 apresenta a condição mais crítica, com predominância de secas severas e extremas (tons laranja e vermelho) em grande parte do território, especialmente no Norte e centro-leste da região. Pra SPI de 2012 também mostra seca significativa, embora menos intensa, com áreas pontuais de recuperação úmida.

As condições úmidas encontradas no DSI de 2000 e SPI de 2011 destacam-se como anos detalhados, com predomínio de áreas úmidas (tons de azul), indicando boas condições de ocorrência em praticamente toda a região. As sessões foram isoladas e de intensidade moderada nesses anos. Os padrões temporais observam uma tendência de agravamento das secas nos anos mais recentes (2021 e 2012), o que pode estar relacionado a mudanças climáticas, variabilidade

interanual ou impactos locais, como o uso do solo e a diminuição de recursos hídricos. Anos anteriores, como 2000 e 2011, apresentaram melhores condições hídricas.

De modo geral a seca mais intensa foi identificada para 2021 (DSI) sendo o ano mais crítico, com grande predominância de seca extrema e severa, enquanto em 2012 (SPI) foi classificado como seca moderada mostrando uma situação de chuva, com secas mais localizadas e áreas de recuperação. Os anos úmidos foram 2011 (SPI) que foi semelhante ao ano 2000 (DSI), com predominância de áreas úmidas em praticamente toda a região (tons de azul). As áreas com seca leve ou moderadamente isoladas (toneladas alaranjadas). Isso mostra que 2011 foi um ano com boas condições hídricas e menos impacto de seca na região.

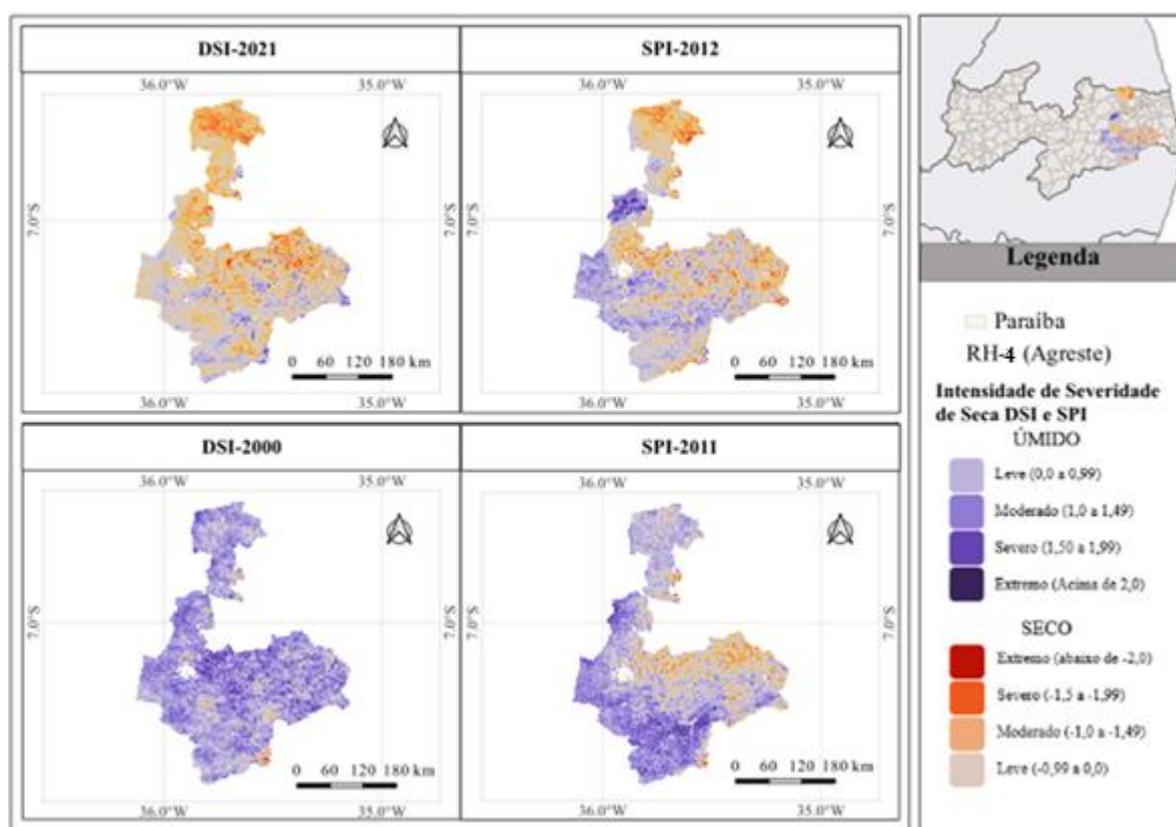


Figura 9: Variabilidade espacial do DSI e SPI nos anos mais seco 2021 e 2012 e mais úmido 2000 e 2011 para a RH-4 (Agreste).

A figura 10 apresenta a intensidade e severidade de secas e umidade para a região RH-5 (Brejo) do estado da Paraíba nos anos 2009, 2010, 2021 e 2022. Os resultados são apresentados em dois índices diferentes. Em 2010 (SPI) apresenta condições de seca menos severas que 2021, mas ainda assim preocupantes grandes áreas em laranja claro e moderado indicam nível seco a moderado. Algumas áreas apresentam umidade (tons de azul) no sudoeste e norte. Isso sugere que o ano de 2010 teve uma seca distribuída espacialmente, mas menos intensa em relação aos anos críticos.

Em 2009 (DSI) predominância de áreas úmidas (tons de azul), especialmente em quase todo o mapa, indicando boas condições hídricas. Pequenas áreas com seca leve a moderada aparência de forma isolada (tons de laranja claro). Esse resultado sugere que 2009 foi um ano extremamente favorável, 2022 tem situação de umidade ainda predominante, mas menos intensa do que 2009: As grandes áreas apresentam tons de azul claro (úmido leve), com alguns pontos de azul moderado (úmido moderado). Surgem pequenas áreas de nível seco (laranja clara) e moderada (laranja), especialmente no norte e sudoeste. Isso mostra que, em 2022, as condições foram mais equilibradas, com menor ocorrência de seca grave.

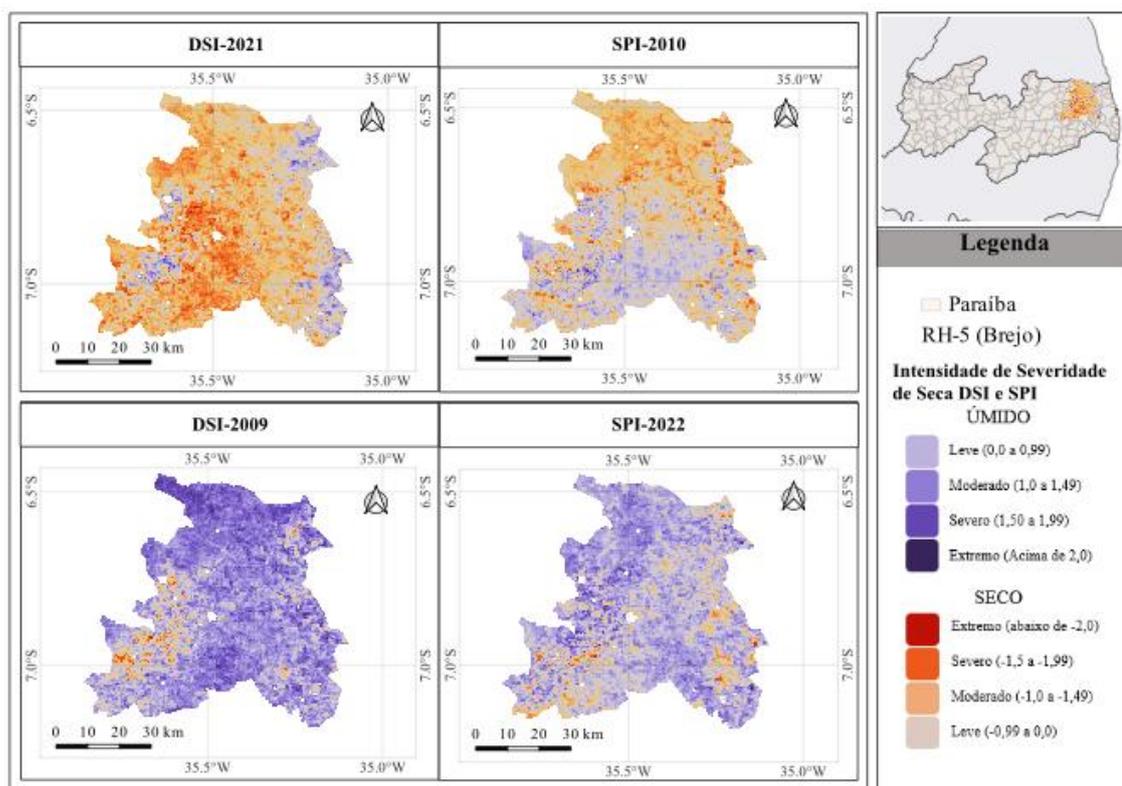


Figura 10: Variabilidade espacial do DSI e SPI nos anos mais seco 2021 e 2010 e mais úmido 2009 e 2022 para a RH-5 (Brejo).

Em síntese a figura 10 exhibe que em 2021 (DSI) apresenta a seca mais severa e generalizada, com predominância de tons laranja e vermelho, trazendo impactos significativos na região, em 2010 (SPI) mostra nível seco moderado, com algumas áreas em recuperação hídrica (tons de azul). Os anos de e 2022 (SPI) se mostraram interessantes sendo 2009 (DSI) o ano com melhor condição hídrica, com predominância de tons de azul, caracterizando umidade severa e extrema em quase toda a região, 2022 (SPI) também apresenta boa umidade, porém com menor intensidade em comparação a 2009.

No que diz respeito aos padrões espaciais e temporais há uma tendência de agravamento das secas nos anos mais recentes, como em 2021 e anos anteriores, como 2009 e 2022,

apresentaram maiores níveis de umidade, evidenciando uma variabilidade climática significativa.

A figura 11 apresenta mapas que analisam a intensidade e severidade de secas e umidade na RH-6 (Litoral) da Paraíba. Em 2012 (DSI) a seca predomina em grande parte da região apresenta tons de laranja e vermelho, indicando seca moderada a extrema. O norte da região mostra as áreas mais críticas, com seca severa predominando em pontos isolados. Áreas úmidas são mínimas, sugerindo um ano de forte déficit hídrico. Para o ano de 2006 (SPI) encontra-se seca moderada a severa e amplas áreas em tons de laranja e vermelho claro, indicando seca leve a severa, as áreas mais críticas localizam-se no centro e sul da região. Também observamos áreas úmidas aparecem em pequenos fragmentos (tons azul-claros), sugerindo menor recuperação hídrica.

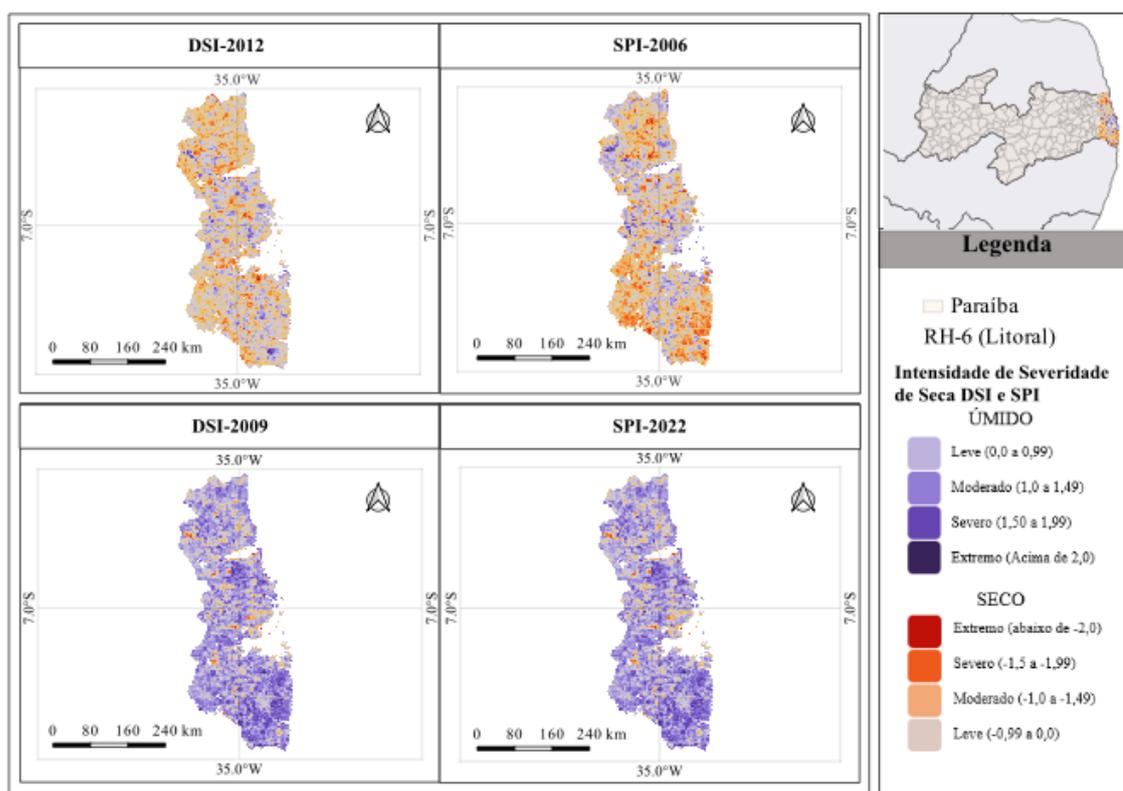


Figura 11: Variabilidade espacial do DSI e SPI nos anos mais seco 2012 e 2006 e mais úmido 2009 e 2022 para a RH-6 (Litoral).

Em 2009 (DSI) condições predominantemente úmidas na maior parte do território apresenta tons de azul, com destaque para umidade moderada a extrema. Pequenas áreas de seca leve a moderada aparece no Norte e centro-sul da região indicando que o ano 2009 foi claramente favorável, com boa oferta hídrica. Assim como 2009 em (2022 SPI) também apresenta condições úmidas predominantes na maior parte da região apresenta tons de azul claro e azul moderado (umidade leve a moderada), surgem pequenas áreas de seca leve (tons laranja

claro), especialmente no norte e litoral sul, indicando que 2022 foi um ano com boas condições hídricas, embora com secas localizadas.

De modo geral o ano mais seco foi 2012 (DSI) com seca mais severa, com predominância de tons laranja e vermelho em praticamente toda a região, em 2006 (SPI) mostrou seca leve a severa distribuída espacialmente, com menos áreas úmidas. Os anos úmidos de 2009 (DSI) e 2022 (SPI) foram os anos mais favoráveis, apresentando predominância de áreas úmidas (tons de azul) e condições climáticas equilibradas.

O padrão temporal e espacial da figura 11 mostrou que a seca foi mais intensa e ampla em 2012 e 2006, com impactos em grande parte da região. Em contraste, 2009 e 2022 apresentaram boas condições hídricas, com predominância de áreas úmidas. As secas tendem a se concentrar no Norte e centro-sul, enquanto as áreas úmidas se espalham mais amplamente nos anos favoráveis. Essa análise evidencia a variabilidade climática da região RH-6 (Litoral), com períodos de seca intensa alternando com anos de boas condições hídricas.

3.3. Produtividade agrícola associada a índices climáticos

3.3.1. Culturas de ciclos longos (Algodão e Cana de Açúcar)

O cultivo do algodão requer condições específicas de clima e solo para alcançar alta produtividade e qualidade. O algodão prospera em climas quentes, com temperaturas ideais entre 20°C e 26°C. Temperaturas abaixo de 15°C podem prejudicar o crescimento, e a planta é sensível aos enfezamentos. A alta incidência de luz solar é essencial para o desenvolvimento do algodoeiro. Áreas com nebulosidade superior a 50% não são recomendadas; o ideal é uma nebulosidade entre 10% e 30% (Freire, 2022). A cultura do algodão é mais produtiva em regiões que recebem entre 850 e 1.100mm de chuva por ano, com pelo menos 500mm distribuídos uniformemente durante o ciclo da planta (Silva; Oliveira, 2021).

Quanto as condições de solo o algodão prefere solos profundos, bem drenados, com boa disponibilidade de nutrientes. Solos arenosos ricos em argila e matéria orgânica, contendo quantidades moderadas de nitrogênio e fósforo, são ideais. A faixa de pH ideal situa-se entre 5,5 e 7,0. Somente fora dessa faixa podem necessitar de melhorias para melhorar o desenvolvimento da planta. É fundamental que o solo seja bem drenado, pois o algodão é sensível ao excesso de umidade. Evite áreas sujeitas a encharcamento ou compactação (Embrapa, 2023).

A figura 12 mostra a variabilidade dos índices climáticos DSI e SPI e a produção de algodão nas diferentes regiões homogêneas (RH-1a RH-6) do estado da Paraíba ao longo dos anos de 2000–2023, correlacionando a produção com os índices DSI e SPI.

A RH-1 (Algodão) a tendência da produção de algodão (barras verdes) apresenta um declínio significativo ao longo dos anos, com picos em 2003 e queda acentuada após 2006. Quando a correlação climática períodos com valores negativos de DSI e SPI (indicando seca) coincidem com valores baixos de produção. A RH-2 (Algodão) a produção é relativamente alta no início dos anos 2000, seguida por quedas drásticas entre 2005 e 2016. A produção apresenta leve recuperação em 2022, e mostra seca severa entre 2012 e 2016 (DSI e SPI negativa) coincide com valores quase nulos de produção.

Para a RH-3 (Algodão) a produção variada, com destaque para os primeiros anos (2000–2005) e pequena recuperação após 2019, os índices climáticos apontam secas moderadas a severas (DSI e SPI) impactaram os níveis de produção entre 2007 e 2016. A RH-4 (Algodão) tem tendência de produção significativamente alta em 2000–2002 com queda brusca após 2003, praticamente cessando entre 2007 e 2020. Observa-se que os períodos secos (DSI e SPI) coincidem com a drástica redução da produção, ou seja, eles estão diretamente associados.

Analisando a RH-5 (Algodão) sua tendência de produção oscilante, com um pico em 2003 e 2022. A produção foi baixa ou inexistente entre 2007 e 2019. A recuperação em 2022 coincide com valores positivos de DSI e SPI, coincidindo com uma maior disponibilidade de chuvas. E por fim a RH-6 (Algodão) apresenta uma produção extremamente baixa, com valores significativos apenas no início dos anos 2000. Após 2006, a produção quase desaparece, isso ocorre pelo fato da cultura do algodão não se adaptar as condições climáticas dessa região em específico.

De forma geral os impactos climáticos na produção de algodão nas regiões homogêneas estão diretamente relacionados com os índices climáticos. Períodos de seca severa (DSI e SPI negativos) coincidem com quedas drásticas na produção ou até ausência de cultivo. As regiões mais afetadas são RH-4 (Agreste) e RH-6 (Litoral) apresentam os maiores impactos, com produção interrompida após 2006 devido a condições climáticas adversas. Algumas regiões, como RH-2 (Alto Sertão) e RH-5 (Brejo), mostram uma pequena recuperação após 2020, indicando a possível influência de anos mais úmidos (DSI e SPI positivo). A produção de algodão vem enfrentando um declínio contínuo ao longo das décadas, com a seca sendo um fator determinante. Esse cenário reforça a vulnerabilidade da cultura do algodão em regiões suscetíveis à variabilidade climática.



Figura 12: Produção de Algodão em diferentes regiões homogêneas do Estado da Paraíba no período de 2000–2023, correlacionando com os índices de climáticos (DSI e SPI).

O cultivo da cana-de-açúcar exige condições específicas de clima e solo para alcançar alta produtividade. A cana-de-açúcar se desenvolve melhor em temperaturas entre 21°C e 34°C. Temperaturas abaixo de 20°C podem retardar o crescimento, enquanto temperaturas acima de 35 °C podem causar estresse térmico. A cultura requer uma precipitação anual entre 1.200mm e 1.500mm, bem distribuída ao longo do ano. Os déficits hídricos podem ser reduzidos com supervisão adequada (Embrapa, 2023). A cana-de-açúcar necessita de alta intensidade luminosa para uma fotossíntese eficiente, preferencialmente em regiões com incidência solar elevada. E os solos ideais para o cultivo são os de textura média, como os franco-arenosos e franco-argilosos, são ideais, pois proporcionam boa drenagem e aeração.

Na figura 13 apresenta à produção de cana-de-açúcar em diferentes regiões homogêneas (RHs), indicando índices climáticos ou hídricos como DSI (Índice de Severidade de Seca) e SPI (Índice de Precipitação Padronizado), além de indicadores de produtividade (AC e QP).

A produção de cana de açúcar na RH-1 (Sertão) exibe uma tendência de recuperação gradual nos últimos anos. O DSI demonstra momentos de seca severa (valores negativos elevados) coincidem com quedas expressivas na produção, como em 2012-2013. O SPI de valores negativos (déficit de chuva) acompanha os períodos de baixa produtividade. Na RH-2 (Alto Sertão) apresenta maior amplitude na produção ao longo dos anos, indicando alta sensibilidade às condições climáticas. Em anos com SPI positivo (mais chuvas), como 2009, há picos de produção e para o DSI segue o padrão oposto, seca severa (DSI elevado) reduz a produtividade. RH-1 e RH-2: Evidenciam oscilações significativas tanto na produtividade quanto nos índices climáticos. Períodos de baixa produção parecem coincidir com DSI elevado ou SPI negativo.

A RH-3 (Cariri/Curimataú) a produção expressa menor amplitude de variação, mas ainda apresenta quedas marcantes em anos de SPI negativo, quanto ao comportamento climático (DSI e SPI) parece ter uma associação direta com a estabilidade produtiva, sugerindo que essa região tem menor resiliência às secas. A produção de cana de açúcar na RH-4 (Agreste) indicam oscilações acentuadas com picos de produção em anos favoráveis, como 2009 e 2018. O DSI mais moderado em comparação a outras regiões, mas as quedas de SPI ainda causam impactos significativos na produção. A região aparenta ser levemente mais resiliente devido a variações climáticas menos severas. Em resumo a RH-3 e RH-4 apresentam padrões similares de flutuação, onde há uma relação visível entre os índices de seca e a produtividade.

A RH-5 (Brejo) a produção se mostra altamente volátil, com períodos de forte recuperação (como após 2016). Momentos de SPI positivo coincidem com os aumentos de produtividade a variação no DSI reflete claramente o impacto das secas nas quedas produtivas. A produção na RH-6 (Litoral) apresenta os maiores valores de rendimento, mas com flutuações marcantes, especialmente em anos de seca extrema. Apesar de ser uma região mais úmida, SPI negativo ainda exerce forte influência na produtividade e o DSI elevado, como em 2012, coincide com quedas abruptas. RH-5 e RH-6 demonstram maior variação de produtividade ao longo dos anos, possivelmente devido a condições climáticas extremas, no entanto na RH-6 a produtividade da Cana de Açúcar não sofreu muita alteração.



Figura 13: Produção de Cana-de-açúcar em diferentes regiões homogêneas do Estado da Paraíba no período de 2000–2023, correlacionando com os índices de climáticos (DSI e SPI).

Existe uma clara relação entre os índices climáticos (SPI e DSI) e a produtividade da cana-de-açúcar (figura13) em todas as regiões. Secas severas ou déficits hídricos levam a quedas expressivas na produção e estratégias como irrigação eficiente, cultivares resistentes à seca e manejo sustentável podem reduzir o impacto dos índices climáticos adversos nas regiões mais sensíveis.

A cana-de-açúcar tem grande relevância para a economia agrícola da Paraíba, especialmente para a produção de açúcar e etanol. As condições climáticas, embora desafiadoras, não impedem que o estado se destaque na produção dessa cultura, com a instalação de usinas e sistemas de irrigação que aumentam a produtividade.

3.3.2. Culturas de ciclos curtos (Feijão e Milho)

O feijão é uma das principais culturas cultivadas na Paraíba, com destaque para a produção no Sertão e no Agreste. A produção de feijão, especialmente o feijão-caupi (feijão-de-corda), é bastante sensível à variabilidade climática, com rendimentos frequentemente impactados pela irregularidade das chuvas. Contudo, com o uso de tecnologias e variedades adaptadas à seca, a produtividade tem melhorado nos últimos anos.

A figura 14 apresenta refere a variabilidade dos índices e produtividade da cultura do feijão nas diferentes RHs. Os rendimentos do feijão na RH-1 (Sertão) apresentam oscilações consideráveis. Nos anos iniciais (2000-2006), há maior estabilidade, enquanto períodos de seca (2012-2013) mostram quedas acentuadas. O SPI negativo (déficit hídrico) em anos como 2012-2013 coincide com reduções de produtividade e o DSI indicando seca severa, reforça os impactos climáticos. Anos favoráveis, como 2004 e 2009, mostram um aumento significativo na produção devido ao SPI positivo. Já anos secos, como 2012-2013 (secas severas) estão associados a grandes perdas produtivas.

A Produção de feijão na RH-3 (Cariri/Curimataú) apresenta comportamento errático, com quedas marcantes em anos de clima desfavorável, como 2012 e 2015. O SPI negativo em anos críticos está alinhado com declínios na produtividade e a recuperação após eventos de seca é visível, mas irregular. A RH-4 (Agreste) mostra variações significativas ao longo do tempo. Anos como 2004 e 2009 destacam-se por picos de produtividade. Ao analisar a relação entre índices climáticos e produção é evidente que com DSI mais moderado, em comparação com as outras regiões, sugere maior resiliência.

A RH-5 (Brejo) tem maior estabilidade em relação a outras regiões, mas ainda sujeita a oscilações em anos secos (2012-2013). O SPI positivo em alguns anos favorece picos de produtividade e a produção se mantém mais resiliente mesmo com DSI elevado, indicando possível suporte hídrico ou práticas agrícolas adaptadas. A RH-6 (Litoral) é a região com menores valores de produtividade geral, mas oscilações mais contidas. A influência do SPI e DSI são visíveis, mas menos intensa que em outras regiões, possivelmente devido à maior disponibilidade hídrica.

Em todas as regiões figura 14, a produção de feijão é altamente influenciada por SPI e DSI. Momentos de seca severa, como 2012-2013, resultam em quedas drásticas de produtividade. Regiões como o Brejo (RH-5) e o Litoral (RH-6) mostram maior resiliência, possivelmente devido à localização geográfica e maior disponibilidade hídrica.



Figura 14: Produção de Feijão nas diferentes regiões homogêneas do Estado da Paraíba no período de 2000–2023, correlacionando com os índices de climáticos (DSI e SPI).

O milho é outra cultura de grande importância para a agricultura do estado, tanto para consumo humano quanto animal. No entanto, assim como o feijão, a produtividade do milho na Paraíba é dependente da disponibilidade de água, e os períodos de seca severa podem causar perdas significativas nas safras. O milho safrinha, cultivado após a colheita da soja, tem ganhado destaque, mas sua produção também está sujeita à variação das chuvas.

A figura 15, refere-se à cultura do milho nas diferentes regiões da Paraíba, a RH-1 (Sertão) apresenta grandes oscilações ao longo dos anos, com quedas severas durante períodos de seca, como 2012-2013. A produtividade mostra uma tendência de leve recuperação nos anos mais recentes. O SPI negativo (déficit hídrico) nos anos críticos coincide com reduções acentuadas na produção e períodos de DSI elevado (seca severa) têm impacto direto, evidenciado baixa produtividade. Na RH-2 (Alto Sertão) a produção apresenta uma das maiores amplitudes de variação, com quedas expressivas durante anos secos e recuperação em anos

favoráveis, como 2004 e 2009. A seca severa de 2012-2013, com os índices DSI e SPI elevados provocou declínios drásticos.

A RH-3 (Cariri/Curimataú) apresenta produção com comportamento é errático, com quedas acentuadas em períodos de SPI negativo, como em 2012. A recuperação após eventos de seca é visível, mas inconsistente. É evidente que os índices SPI e DSI estão claramente associados com a produtividade e a vulnerabilidade da produção a eventos climáticos adversos. Na RH-4 (Agreste) a produção mostra variações significativas ao longo do tempo, com picos de produtividade em anos mais favoráveis, como 2009 e 2011. Tanto SPI como DSI são mais moderados em comparação com outras regiões, sugerindo que o Agreste possui maior resiliência às secas e em anos com SPI positivo, a produtividade melhora consideravelmente.



Figura 15: Produção de Milho em diferentes regiões homogêneas do Estado da Paraíba no período de 2000–2023, correlacionando com os índices de climáticos (DSI e SPI).

A produção de milho nas RH-5 (Brejo) e RH-6 (Litoral) apesar de apresentar os menores valores de produtividade em geral, as variações são menos drásticas, a influência do SPI e do DSI são menos pronunciadas do que em outras regiões, possivelmente devido a maior

disponibilidade hídrica natural. Em anos críticos, como 2012, observa-se queda, mas não tão acentuada quanto nas regiões mais áridas.

A produtividade do milho é altamente sensível aos índices climáticos (figura 15). A seca severa (DSI negativo) e déficit hídrico (SPI negativo) resultam em quedas marcantes na produção, especialmente em regiões áridas como o Sertão e Alto Sertão (RH-1 e RH-2). Períodos de SPI positivo, que indicam maior precipitação, favorecem a recuperação da produtividade. A recuperação da produtividade após eventos de seca é visível em algumas regiões, mas nem sempre consistente. Sendo de fundamental importância estratégias de mitigação, como irrigação e manejo adaptado, são essenciais para regiões mais sensíveis, como o Sertão.

4. CONCLUSÃO

A partir da análise efetuada dos índices DSI e SPI de eventos extremos de secas e chuva foi possível associar as variações climáticas temporais e espaciais da produção das culturas nas diferentes regiões da Paraíba. Observou-se uma alternância entre anos secos e úmidos, com destaque para os eventos extremos de seca entre 2012 e 2016 e os períodos de recuperação em 2009 e 2022. Essa análise reforça a heterogeneidade climática da Paraíba e a necessidade de planejamento hídrico e de políticas de mitigação das secas, especialmente nas regiões semiáridas

As RH-1, RH-2, RH-3 e RH-4: Apresentam altos valores expressivos da correlação linear R (variando de 0,91 a 0,95), indicando uma relação muito forte entre SPI e DSI. A resposta do DSI ao SPI é mais sensível, evidenciada pelas inclinações próximas ou superiores a 1,0. Enquanto as RH-5 e RH-6 Apresentam menores valores de R (0,87 e 0,65), sugerindo uma relação menos expressiva na região RH-6. É importante ressaltar que os valores do DSI na região RH-6 podem ter sido mascarados pela influência da nebulosidade, umidade relativa, proximidade do oceano, propiciando sua redução.

A comparação entre os mapas evidencia uma alta variabilidade climática ao longo dos anos, com alternância entre períodos secos extremos e úmidos significativos. Isso reflete a vulnerabilidade da região à seca e a dependência de padrões irregulares de ocorrência.

As condições climáticas e a produção de algodão, evidenciaram que os períodos de seca severa (DSI e SPI negativos) têm impacto direto na redução da produção. A necessidade de estratégias de adaptação à seca e de uso sustentável dos recursos hídricos é crucial para a retomada dessa atividade agrícola na Paraíba.

Ficou evidenciado uma relação direta entre eventos climáticos severos e a queda de produtividade de cana-de-açúcar. Regiões como RH-5 (Brejo) e RH-6 (Litoral) apresentam maior capacidade de recuperação após períodos de seca, enquanto o RH-1 (Sertão) é mais vulnerável.

5. REFERÊNCIAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas (2024). Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/>

Brasil. Ministerio da agricultura, pecuaria e abastecimento. (2021). Sotta, E. D.; Sampaio. F.G.; Marzall. K.; Silva. W.G. Brasilia: Mapa/Senar.

Censo Agropecuário: quantidade produzida por produtos das lavouras permanentes, série histórica (2000-2023). In: IBGE. *Sidra: sistema IBGE de recuperação automática*. (2024). Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1730>.

Censo Agropecuário: quantidade produzida por produtos das lavouras temporárias, série histórica (2000-2023). In: IBGE. *Sidra: sistema IBGE de recuperação automática*. (2024). Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1731>.

Didan, K. (2015). MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006. [S. l.]. Disponível <https://doi.org/https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>.

Embrapa Algodão. (2023). **Sistemas de produção de algodão: orientações técnicas para o agricultor**. Disponível em: Embrapa Algodão

Embrapa Cana-de-Açúcar. (2023). *Boletim técnico: Manejo hídrico para cana*. Embrapa.

Freire, C. E (2022). **Atualizações no cultivo de algodão: práticas modernas e sustentabilidade**. Uberlândia: Gráfica Editora UFU.

Garson, G. David. (2009), Statnotes: Topics in Multivariate Analysis. Disponível em: <http://faculty.chass.ncsu.edu/garson/PA765/statnote.htm>

Guedes, R. V. de S.; Macedo, M. J. H.; Souza, F. de A. S. (2012). Análise espacial de eventos de secas com base no índice padronizado de precipitação e análise de agrupamento. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, [s. l.], p. 55–65.

Hayes, Michael et al. (2011). The Lincoln Declaration on drought indices: Universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, [s. l.], v. 92, n. 4, p. 485–488,. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>

Liu, Peng. (2015). A survey of remote-sensing big data. *Frontiers in Environmental Science*, [s. l.], v. 3, n. JUN, p. 45. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00045>.

Mckee, T. B; Doesken, N. J; Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology*. American Metereological Society, [s. l.], n. Boston, p. 179–184.

Moore, David S. (2007), *The Basic Practice of Statistics*. New York, Freeman.

- Moreira, A. et al. (2017). Dados Meteorológicos estimados em condições de clima subtropical e a relação com índices de vegetação. *Revista Brasileira de Cartografia*, [s. l.], v. 69, n. 6, p. 1075–1091.
- Mu, Qiaozhen et al. (2013) A remotely sensed global terrestrial drought severity index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, [s. l.], v. 94, n. 1, p. 83–98. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00213.1>
- Mu, Q., FA Heinsch, M. Zhao e SW Running ,2007:Desenvolvimento de um algoritmo de evapotranspiração global baseado em MODIS e dados de meteorologia global. *Remote Sensing Environ.*, **111**,519–536.
- Mu, Q., LA Jones, JS Kimball, KC McDonald e SW Running, (2009):Avaliação por satélite da evapotranspiração da superfície terrestre para o domínio pan-ártico. *Water Resour. Res.*, **45**, W09420, doi:10.1029/2008WR007189.
- Mu, Q., M. Zhao e SW Running, (2011b). Algoritmo de evapotranspiração terrestre global MODIS. *Remote Sensing Environ.*, **115**,1781–1800.
- Ponzoni, F.J.; Shimabukuro, Y.E.; Kuplich, T.M. (2012) Sensoriamento Remoto da Vegetação. 1. ed. São Paulo: Oficina de Texto.
- Running, S., Mu, Q., Zhao, M. (2017). MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. [S. l.]. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>.
- Running, Steven W et al. (2019). MOD16A3GF MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled Yearly L4 Global 500 m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, [s. l.], p. 1–37. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A3GF.006>
- Sarvia, Filippo; De Petris, Samuele; Borgogno-Mondino, Enrico. (2021). Exploring Climate Change Effects on Vegetation Phenology by MOD13Q1 Data: The Piemonte Region Case Study in the Period 2001–2019. *Agronomy*, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 555. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11030555>
- Silva, M. A.; Oliveira, R. T (2021). **Produção integrada de algodão: estratégias para alta produtividade**. Londrina: IAPAR.
- Sousa, F. A. S. et al. (2016). O Índice de Precipitação Padronizada (IPP) na identificação de extremos de chuvas e secas na bacia do rio Paraguaçu (BA) The Standardized Precipitation Index (SPI) in identifying extreme rainfall and droughts in the Paraguaçu River Basin (BA). *Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 13. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/ambiencia.2016.02.14>
- Stagge, James H. et al. (2015). Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, [s. l.], v. 35, n. 13, p. 4027–4040. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.4267>
- Stanton, Jeffrey M. (2001), “Galton, Pearson, and the peas: A brief history of linear regression for statistics instructors”. *Journal of Statistical Education*, 9,3. Disponível em: <http://www.amstat.org/publications/JSE/v9n3/stanton.html>
- Tamiminia, Haifa et al. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, [s. v. 164, n. 01, p. 152–170. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>.

Tigkas, Dimitris; Vangelis, Harris; Tsakiris, George. (2015). DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 697–709. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>.

West, Harry; Quinn, Nevil; Horswell, Michael. (2019). Remote sensing for drought monitoring & impact assessment : Progress , past challenges and future opportunities. *Remote Sensing of Environment*, [s. l.], v. 232, n. November 2018, p. 111291. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111291>

WMO, World Meteorological Organization. (2006). Drought monitoring and early warning : concepts , progress and future challenges. World Meteorological Organization, [s. l.], n. 1006, p. 24. Disponível em: <http://www.wamis.org/agm/pubs/brochures/WMO1006e.pdf>

CAPÍTULO 4

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo explorar três dimensões interligadas: o desempenho dos índices climáticos no monitoramento das chuvas, os padrões climáticos de extremos de precipitação e a relação entre a variabilidade de índices climáticos e a produtividade agrícola no estado da Paraíba.

A análise do desempenho dos índices climáticos evidenciou que ferramentas como o Índice de Precipitação Padronizada (SPI) e o Índice de Severidade de Seca (DSI) são fundamentais para a compreensão da dinâmica pluviométrica em uma região semiárida. Contudo, o estudo também destacou a necessidade de aprimorar os métodos de monitoramento para considerar variabilidades locais, especialmente em áreas com menor densidade de estações meteorológicas.

No que se refere aos padrões climáticos de extremos de precipitação, observou-se que eventos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas, têm apresentado uma frequência crescente, em consonância com as tendências globais de mudanças climáticas. Esses extremos impactam significativamente a disponibilidade hídrica e os sistemas de produção agrícola, enfatizando a importância de estratégias de adaptação e resiliência para mitigar seus efeitos adversos.

A análise da relação entre a variabilidade de índices climáticos e a produtividade agrícola revelou que os índices climáticos têm influência direta no desempenho das culturas agrícolas no estado da Paraíba. Períodos de seca severa estão associados a perdas significativas na produção, enquanto padrões de precipitação adequados promovem melhores resultados agrícolas. Isso reforça a necessidade de integrar o monitoramento climático ao planejamento agrícola, possibilitando ações proativas para minimizar os impactos negativos e maximizar o uso eficiente dos recursos naturais.

Este estudo destaca a importância do monitoramento climático contínuo e integrado ao desenvolvimento de políticas públicas voltadas para a convivência com o semiárido. Também sugere que pesquisas futuras explorem o impacto de outros fatores, como o uso do solo e as práticas agrícolas, na relação entre o clima e a produtividade agrícola, além de avaliar o impacto das mudanças climáticas em horizontes temporais mais longos.

Espera-se que este trabalho contribua para a formulação de estratégias de manejo sustentável dos recursos hídricos e agrícolas no estado da Paraíba, promovendo a resiliência das comunidades diante das condições climáticas adversas.