

**Ivanildo Batista da Silva Júnior**

**Variabilidade espaço-temporal de características de seca  
em Pernambuco**

Recife

Fevereiro de 2023



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA**

**Variabilidade espaço-temporal de características de seca em Pernambuco**

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 28/02/2023 pela comissão examinadora

**Área de concentração: Biometria e Estatística Aplicada**

**Orientador: Dr. Antonio Samuel Alves da Silva**  
**Coorientador: Dra. Tatijana Stosic**

**Recife**

**Fevereiro de 2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S586v Silva Júnior, Ivanildo Batista da  
Variabilidade espaço-temporal de características de seca em Pernambuco / Ivanildo Batista da Silva Júnior. - 2023.  
101 f. : il.
- Orientador: Antonio Samuel Alves da Silva.  
Coorientador: Tatijana Stosic.  
Inclui referências.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Recife, 2023.
1. Standardized Precipitation Index. 2. Características de seca. 3. Teste de tendência. I. Silva, Antonio Samuel Alves da, orient. II. Stosic, Tatijana, coorient. III. Título

CDD 519.5

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA**

**Variabilidade espaço-temporal de características de seca em Pernambuco**

Ivanildo Batista da Silva Júnior

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 28/02/2023 pela comissão examinadora

Orientador:

---

**Dr. Antonio Samuel Alves da Silva**  
Orientador

Banca examinadora:

---

**Dra. Tatijana Stosic – UFRPE**  
**Universidade Federal Rural de**  
**Pernambuco**

---

**Dr. José Rodrigo Santos Silva – UFS**  
**Universidade Federal de Sergipe**

---

---

*Este trabalho é dedicado a Deus, Jesus,  
minha família e amigos,  
por sempre estarem ao meu lado.*

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Deus, pois sem Ele não conseguiria chegar a lugar algum (Evangelho de João, Capítulo 15, verso 5), a sua graça e misericórdia permitiram que eu chegasse até aqui (Primeiro livro de Samuel, Capítulo 7, verso 12).

Agradeço à minha família (minha mãe Eliane e aos meus irmãos Alyne e Emanuel), por sempre estarem ao meu lado durante essa minha trajetória na vida acadêmica. À minha namorada Gabriela Barbosa pelo seu apoio e carinho.

Aos meus amigos Denner Samuel, Kharen Hellen e Me. Francisco Henrique por sempre me motivarem.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada.

Ao professor Dr. Antonio Samuel e à professora Dra. Tatijana Stosic, pela oportunidade de me orientarem nesse trabalho. À Dra. Lidiane Araújo, pela sua contribuição e auxílio.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo auxílio financeiro durante o mestrado.

Agradeço a Deus pela vida de todos, obrigado!

*“Direi isto suspirando,  
Em algum lugar, daqui a muito tempo:  
Dois caminhos se separavam em um bosque amarelo, e eu..  
Eu escolhi o menos percorrido.  
E isso fez toda a diferença.  
(O Caminho Não Escolhido, Robert Frost)*

# Resumo

Este trabalho dedica-se a investigar as características de seca no estado de Pernambuco com base nos dados de precipitação do período de 1962 a 2012. O fenômeno da seca é um dos riscos naturais mais perigosos, podendo afetar as mais variadas regiões do mundo e gerar danos econômicos e sociais. É notável o aumento da busca pelo entendimento da dinâmica das secas e o número de métodos de análise criados com o objetivo de identificá-las, monitorá-las e quantificá-las. O indicador de seca recomendado pela World Meteorological Organization (WMO) é o Standardized Precipitation Index (SPI). O SPI é um índice capaz não só de identificar se houve seca, mas também de classificar sua categoria (leve, moderada, severa e extrema). Com base nos dados de 133 estações pluviométricas de Pernambuco, calculou-se aqui o SPI em escala anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3). A partir das séries temporais obtidas, foram então investigadas as características de seca: frequência, área afetada e intensidade. Em conjunto com os resultados obtidos para as características de seca, fez-se uso do método de interpolação espacial Inverse Distance Weighting (IDW). Além disso, com base nos resultados das distribuições espaciais obtidos, aplicou-se o teste Wilcoxon-Mann-Whitney a fim de identificar diferenças estatísticas entre as regiões Sertão, Agreste e Zona da Mata de Pernambuco quanto as características de seca (frequência, intensidade e área afetada). Para a análise temporal, foram utilizados os testes não-paramétricos Mann-Kendall, para identificação de tendência, e o teste Sen's slope, para magnitude da tendência. Resultados obtidos para a distribuição espacial da frequência de seca em escala anual indicaram que a seca e do tipo leve foi a que ocorreu com maior frequência principalmente na região Sertão, onde também houve maior proporção de estações com tendência positiva significativa. Em escala sazonal, as estações inverno e primavera apresentaram concentrações mais acentuadas entre os tipos de seca e maiores diferenças estatísticas entre as regiões. No que se refere aos resultados da área afetada pela seca, observou-se que, tanto na escala anual quanto para a escala sazonal, o teste de Mann-Kendall aponta para a presença de tendência positiva significativa. Quanto à intensidade de seca anual, as distribuições espaciais apresentaram maiores concentrações ao sul da Zona da Mata para seca em geral (total) e do tipo moderada, e ao leste do Sertão e sudoeste do Agreste para as secas severa e extrema; já na escala sazonal, houve menor intensidade de seca do tipo severa e extrema no Sertão durante o inverno e a primavera. A intensidade média de seca em ambas as escalas apresentou tendência positiva significativa. Por fim, obteve-se a relação entre a intensidade média e a área afetada pela seca, o que se mostrou positiva para todos os tipos de seca e nas duas escalas consideradas.

**Palavras-chaves:** *Standardized Precipitation Index*. Características de seca. Teste de tendência.

# Abstract

This work is dedicated to investigating the characteristics of drought in the state of Pernambuco based on precipitation data from the period 1962 to 2012. The phenomenon of drought is one of the most dangerous natural hazards, which can affect various regions of the world and cause economic and social damage. The increase in the search for understanding the dynamics of droughts and the number of analysis methods created with the objective of identifying, monitoring and quantifying them is remarkable. The drought indicator recommended by the World Meteorological Organization (WMO), however, is the Standardized Precipitation Index (SPI), the method adopted here. SPI is an index capable not only of identifying whether there has been a drought, but also of classifying its category (mild, moderate, severe and extreme). Based on data from 133 rainfall stations spread across the entire territorial extension of the state, the SPI was calculated here on an annual (SPI-12) and seasonal (SPI-3) scale. From the series obtained, the drought characteristics were investigated: frequency, affected area and intensity. Together with the results obtained for drought characteristics, the spatial interpolation method Inverse Distance Weighting (IDW) was used. In addition, based on the results of the spatial distributions obtained, the Wilcoxon-Mann-Whitney test was applied in order to identify statistical differences between the Sertão, Agreste and Zona da Mata regions of Pernambuco regarding drought characteristics (frequency, intensity and affected area). For the temporal analysis, the non-parametric Mann-Kendall tests were used to identify the trend, and the Sen's slope test for the magnitude of the trend. Results obtained for the spatial distribution of the frequency of drought on an annual scale indicated that the drought and the mild type was the one that occurred with greater frequency, mainly in the Sertão region, where it was also verified that there was a greater proportion of stations with a significant trend. On a seasonal scale, the winter and spring seasons showed more pronounced concentrations between types of drought and greater statistical differences between regions. With regard to the results of the area affected by drought, it was observed that, both in the annual scale and for the seasonal scale, the Mann-Kendall test points to the presence of a significant positive trend. As for the intensity of annual drought, the spatial distributions showed higher concentrations in the south of the Zona da Mata for general (total) and moderate droughts, and in the east of the Sertão and southwest of the Agreste for severe and extreme droughts; on the seasonal scale, there was a lower intensity of severe and extreme drought in the Sertão during winter and spring. The average intensity of drought in both scales showed a significant positive trend. Finally, the relationship between the average intensity and the area affected by the drought was obtained, which was positive for all types of drought and in the two scales considered.

**Key-words:** *Standardized Precipitation Index*. Drought characteristics. Trend test.

# Lista de Figuras

Figura 1 – Características de seca da <i>run theory</i> . . . . .	14
Figura 2 – Pernambuco, suas regiões (Sertão, Agreste e Zona da Mata), estações pluviométricas do LAMEP/ITEP e sua localização entre os estados do Nordeste . . . . .	21
Figura 3 – Séries temporais dos valores de SPI nas escalas sazonal (SPI-3) e anual (SPI-12) para estações meteorológicas representativas das regiões Sertão (Petrolina), Agreste (Garanhuns) e Zona da Mata (Recife). . . . .	31
Figura 4 – Tendência e significância estatística das séries de SPI das estações pluviométricas distribuídas no território pernambucano nas escalas sazonal (SPI-3) e anual (SPI-12). . . . .	33
Figura 5 – Magnitude das tendências das séries de SPI nas escalas sazonal (SPI-3) e anual (SPI-12). . . . .	33
Figura 6 – Distribuição espacial da frequência de seca total anual no estado de Pernambuco entre 1962 e 2012. . . . .	35
Figura 7 – Distribuição espacial da frequência das categorias de seca em Pernambuco	35
Figura 8 – Resultados do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney para a detecção de diferenças estatísticas entre as sub-regiões de Pernambuco quanto às frequências de seca anual (em %). Os símbolos "*", "**", "***" e "****" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa. . . . .	38
Figura 9 – Tendência e significância estatística da frequência de seca total anual. . . . .	39
Figura 10 – Tendência e significância estatística da frequência anual de seca por categoria (leve, moderada, severa e extrema). . . . .	39
Figura 11 – Proporções das estações pluviométricas com tendência significativa para as frequências anuais de seca total e por categoria. A cor azul indica tendência negativa, a vermelha, positiva . . . . .	40
Figura 12 – Distribuição espacial da magnitude das tendências de frequência anual de seca total. . . . .	41
Figura 13 – Série de percentual de estações com frequência máxima para seca total. . . . .	42
Figura 14 – Distribuição espacial da frequência sazonal de seca total para cada estação do ano referente ao período de 1962 a 2012. . . . .	43

Figura 15 – Distribuição espacial da frequência sazonal de seca leve para cada estação do ano referente ao período de 1962 a 2012. . . . .	44
Figura 16 – Distribuição espacial da frequência sazonal de seca moderada para cada estação do ano referente ao período de 1962 a 2012. . . . .	45
Figura 17 – Distribuição espacial da frequência sazonal de seca severa para cada estação do ano referente ao período de 1962 a 2012. . . . .	46
Figura 18 – Distribuição espacial da frequência sazonal de seca extrema para cada estação do ano referente ao período de 1962 a 2012. . . . .	47
Figura 19 – Resultados do teste Wilcoxon-Mann-Whitney para frequência sazonal (em %). Os símbolos "*", "**", "***" e "****" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa. . . . .	49
Figura 20 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para as frequência sazonais de seca (total e por categoria) para cada estação pluviométrica. . . . .	51
Figura 21 – Proporção de estações pluviométricas com tendência significativa para as frequências sazonais de seca (total e por categoria). A cor vermelha (azul) indica tendência de aumento (diminuição) da frequência sazonal de seca. . . . .	52
Figura 22 – Magnitude das tendências da frequência sazonal de seca total para cada estação do ano. . . . .	53
Figura 23 – Série de percentual de estações com frequência máxima para seca total por estação do ano. . . . .	54
Figura 24 – Resultado do teste Wilcoxon-Mann-Whitney para área afetada pela seca (em %). Os símbolos "*", "**", "***" e "****" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa. . . . .	56
Figura 25 – Categorias de área afetada pela seca ao longo dos anos . . . . .	60
Figura 26 – Médias das áreas afetadas pela seca e os resultados do teste Wilcoxon-Mann-Whitney. Os símbolos "*", "**", "***" e "****" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa. . . . .	61
Figura 27 – Séries de área afetada pelo tipo de seca nas escalas anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3). Os símbolos "*", "**", "***" e "****" indicam que há tendência significativa entre as regiões ao nível de significância, respectivamente, de 5%, de 1%, de 0,1% e 0,01%. A sigla "ns" significa que o resultado do teste é não significativo. . . . .	63

Figura 28 – Distribuição espacial da intensidade de seca total anual (SPI-12) em Pernambuco e regiões . . . . .	65
Figura 29 – Distribuição espacial da intensidade de seca leve anual (SPI-12) em Pernambuco e regiões . . . . .	65
Figura 30 – Distribuição espacial da intensidade de seca moderada anual (SPI-12) em Pernambuco e regiões . . . . .	66
Figura 31 – Distribuição espacial da intensidade de seca severa anual (SPI-12) em Pernambuco e regiões . . . . .	67
Figura 32 – Distribuição espacial da intensidade de seca extrema anual (SPI-12) em Pernambuco e regiões . . . . .	67
Figura 33 – Resultado do teste Wilcoxon-Mann-Whitney para intensidade de seca anual. Os símbolos "*", "**", "***" e "****" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa. . . . .	68
Figura 34 – Tendência e significância estatística das séries de intensidade anual de seca total para cada estação pluviométrica do estado de Pernambuco. . . . .	69
Figura 35 – Tendência e significância estatística das séries de intensidade anual de seca nas categorias leve, moderada, severa e extrema. . . . .	69
Figura 36 – Proporção de estações pluviométricas que apresentaram tendência significativa para a intensidade anual de seca (total e por categoria) em cada região do estado (Sertão, Agreste e Zona da Mata). . . . .	70
Figura 37 – Distribuição espacial da magnitude das tendências da intensidade anual de seca total. . . . .	71
Figura 38 – Distribuição espacial das tendências da intensidade sazonal de seca total para cada estação do ano. . . . .	72
Figura 39 – Distribuição espacial da intensidade sazonal de seca leve para cada estação do ano. . . . .	73
Figura 40 – Distribuição espacial da intensidade sazonal de seca moderada para cada estação do ano. . . . .	74
Figura 41 – Distribuição espacial da intensidade sazonal de seca severa para cada estação do ano. . . . .	75
Figura 42 – Distribuição espacial da intensidade sazonal de seca extrema para cada estação do ano. . . . .	76

Figura 43 – Resultados do teste Wilcoxon-Mann-Whitney para a intensidade de seca sazonal nas regiões Sertão, Agreste e Zona da Mata. Os símbolos "*", "**", "***" e "****" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa. . . . .	77
Figura 44 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para as intensidades sazonais de seca (total e por categoria) para cada estação pluviométrica.	79
Figura 45 – Proporção de estações pluviométricas com tendência significativa para intensidade sazonal de seca (total e por categoria) para cada estação do ano. . . . .	80
Figura 46 – Intensidade média de seca (total e por categoria) nas escalas anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3). . . . .	81
Figura 47 – Séries de intensidade média de seca nas escalas anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3). Os símbolos "*", "**", "***" e "****" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa. . . . .	82
Figura 48 – Magnitudes das tendências de intensidade de seca total em escala sazonal (SPI-3). . . . .	83
Figura 49 – Gráficos das regressões lineares entre intensidade média de seca e área afetada pela seca na escala anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3) . . . . .	85

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação de seca baseada nos valores de SPI . . . . .	24
Tabela 2 – Classificação de área seca baseada em $Q_j$ . . . . .	25
Tabela 3 – Classificação de intensidade de seca baseada em $S_j$ . . . . .	25
Tabela 4 – Média e desvio padrão (entre parênteses) das frequências de seca anual nas categorias leve, moderada, severa e extrema em Pernambuco e regiões Sertão, Agreste e Zona da Mata entre 1962 e 2012. . . . .	37
Tabela 5 – Categorias de área afetada por tipo de seca na escala anual (SPI-12) . . . . .	55
Tabela 6 – Categorias de área afetada pela seca por tipo de seca e estação do ano (SPI-3) . . . . .	57
Tabela 7 – Média e desvio padrão (entre parênteses) da área afetada por seca nas escalas anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3). . . . .	59
Tabela 8 – Correlação entre intensidade média de seca e área afetada pela seca por tipo de seca e por escala. . . . .	84

# Lista de abreviaturas e siglas

CMI	Crop Moisture Index
CZI	China Z Index
DAI	Drought Area Index
EDI	Effective Drought Index
fdp	função densidade de probabilidade
HI	Humidity Index
IA	Índice de Aridade
IDW	Inverse Distance Weighted
IPP	Índice de Precipitação Padronizado
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
LAMEP	Laboratório de Meteorologia
NAO	North Atlantic Oscillation
$P_i$	Frequência de seca
PCA	Principal Component Analysis
PCD	Precipitation Concentration Degree
PCI	Precipitation Concentration Index
PCP	Precipitation Concentration Period
PDSI	Palmer Drought Severity Index
PHDI	Palmer Hydrologic Drought Index
PIB	Produto Interno Bruto
$Q_j$	Área afetada pela seca

RAI	Rainfall Anomaly Index
RFB	Radial Basis Function
$S_j$	Intensidade de seca
SAI	Standardized Anomaly Index
SAF	Severity Area Frequency
SC-PDSI	Self-Calibrated Palmer Drought Severity Index
SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SPI	Standardized Precipitation Index
SPI-3	SPI escala sazonal
SPI-12	SPI escala anual
SSI	Standardized Streamflow Index
TPSS	Thin-Plate Smoothing Spline
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
WMO	World Meteorological Organization
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## Lista de símbolos

$\Gamma$	Letra grega Gama
$\in$	Pertence
$Km^2$	Quilômetro quadrado
$Km$	Quilômetro
$mm$	Milímetro
$\beta$	Letra grega minúscula beta
$\alpha$	Letra grega minúscula alfa
$\mu$	Letra grega minúscula mi
$\Delta$	Letra grega Delta
$\infty$	Infinito
$\Sigma$	Somatório
$^{\circ}$	Grau
'	Minuto
"	Segundo
%	Porcentagem
$\equiv$	Equivalente
$\int$	Integral
$\phi$	Letra grega minúscula fi
$\varphi$	Letra grega minúscula fi
$\sigma$	Letra grega minúscula sigma
$<$	Menor

= Igualdade

→ Seta apontando para a direita

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>4</b>
2.1	Geral	4
2.2	Específicos	4
<b>3</b>	<b>Revisão de Literatura</b>	<b>5</b>
3.1	Secas	5
3.2	Análise da seca	8
3.3	Secas no Nordeste brasileiro	9
3.4	Identificação de secas meteorológicas	11
3.4.1	Evidências internacionais	12
3.4.2	Evidências nacionais	13
3.5	Caracterização de secas	14
3.6	Análise estatística da seca	16
3.6.1	Análise de tendência	16
3.6.2	Análise espacial	18
3.6.3	Testes de comparação estatística	18
<b>4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>21</b>
4.1	Área de estudo e dados	21
4.2	Standardized Precipitation Index - SPI	23
4.3	Indicadores de avaliação de seca	24
4.3.1	Frequência de seca	24
4.3.2	Área afetada pela seca	24
4.3.3	Intensidade de seca	25
4.4	Teste de tendência de Mann-Kendall	26
4.5	Teste de Sen's slope	27
4.6	Teste Wilcoxon–Mann–Whitney	27
4.7	Inverse Distance Weighting - IDW	28
4.8	Métodos computacionais utilizados	29
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>30</b>
5.1	Séries temporais dos valores de SPI	30
5.2	Análise das características de seca em Pernambuco	34
5.2.1	Frequência de seca	34

<b>5.2.1.1 Escala anual – Indicador SPI-12</b> . . . . .	34
5.2.1.1.1 Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney . . . . .	37
5.2.1.1.2 Teste de tendência de Mann-Kendall e Sen's <i>slope</i> . . . . .	38
<b>5.2.1.2 Escala sazonal – Indicador SPI-3</b> . . . . .	42
5.2.1.2.1 Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney . . . . .	47
5.2.1.2.2 Teste de tendência de Mann-Kendall e Sen's <i>slope</i> . . . . .	50
<b>5.2.2 Área afetada pela seca</b> . . . . .	54
<b>5.2.2.1 Escala anual – Indicador SPI-12</b> . . . . .	54
5.2.2.1.1 Teste Wilcoxon-Mann-Whitney . . . . .	55
<b>5.2.2.2 Escala sazonal – Indicador SPI-3</b> . . . . .	56
5.2.2.2.1 Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney . . . . .	60
<b>5.2.2.3 Análise de tendência</b> . . . . .	62
<b>5.2.3 Intensidade de seca</b> . . . . .	64
<b>5.2.3.1 Escala anual – Indicador SPI-12</b> . . . . .	64
<b>5.2.3.2 Escala sazonal – Indicador SPI-3</b> . . . . .	71
<b>5.2.3.3 Intensidade média de seca</b> . . . . .	81
<b>5.3 Análise de regressão entre as características de seca</b> . . . . .	83
<b>6 Conclusão</b> . . . . .	<b>86</b>
<b>Referências Bibliográficas</b> . . . . .	<b>88</b>

# 1 Introdução

A seca é um fenômeno natural que ocorre nas mais diversas regiões do mundo, podendo gerar danos consideráveis pela sua capacidade de afetar diversos setores econômicos e afetar o bem-estar da sociedade. A seca é considerada um dos riscos naturais que geram mais custos econômicos globais, bem maiores do que qualquer outros desastres naturais (ZHANG et al., 2019). Com o avanço do fenômeno do aquecimento global e mudanças climáticas nos últimos anos, a frequência, intensidade e duração de secas tornaram-se ainda mais evidentes ao redor do mundo. Kilimani et al. (2018) afirma que as mudanças climáticas aumentarão a intensidade e a frequência das secas por conta da mudança nos padrões de precipitação e por conta do aumento da temperatura. Dey et al. (2011) afirma que as secas estão tornando-se mais frequentes, mais intensas, de maior duração e mais espacialmente extensas.

Wilhite, Sivakumar e Pulwarty (2014) citam três motivos pelos quais secas são considerados perigos naturais: tem início lento e os seus efeitos acumulam-se ao longo do tempo; não há uma definição precisa e universal sobre esse fenômeno e os impactos da seca são não-estruturais e se espalham por um área geográfica maior do que os danos que resultam de outros riscos naturais. Ding, Hayes e Widhalm (2011) argumenta que as secas causam deficiências hídricas que afetam produção, as vendas e as operações comerciais em diversos setores. Os impactos causados pela seca, além do econômico (direto e indireto/secundário), também pode ser social e ambiental, e causar perdas fora dos mercados. Mishra e Singh (2010) classifica os tipos de secas como meteorológicas, hidrológicas, agrícolas e sócioeconômicas.

O fenômeno de seca afeta principalmente o setor agrícola, entretanto outros setores são impactados, como a produção de energia, o turismo e o de transportes gerando perdas consideráveis, conforme Wilhite, Sivakumar e Pulwarty (2014). Além disso, secas podem causar danos sociais, como por exemplo, na saúde mental dos habitantes (EDWARDS; GRAY; HUNTER, 2015); na educação, conforme Alston e Kent (2006), Joshi (2019) e Nordstrom e Cotton (2020); criminalidade (GOIN; RUDOLPH; AHERN, 2017); e transmissão de doenças (BROWN LISA E MEDLOCK; VIRGÍNIA, 2014). Marengo, Torres e Alves (2017) destacam que esse tipo de fenômeno afeta, principalmente, residentes de regiões semiáridas e cria deficiência e riscos para água, energia e segurança alimentar.

Dentre as regiões mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas e o fenômeno

de seca encontra-se o Nordeste do Brasil que é, também, umas das regiões secas mais densamente povoadas do mundo. A região Nordeste corresponde a cerca de 18.3% da área total do território do Brasil, cerca de 1.558.000  $Km^2$ , e é composto por nove Estados, sendo eles: Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe. Esses estados, exceto o Maranhão, e parte do Estado de Minas Gerais constituem a região chamada de polígono das secas, que é caracterizado pelo baixo regime pluviométrico. Essa região abrange cerca de 1.342 municípios e uma população de mais de 53 milhões de habitantes, que é severamente afetada por consequências sócioeconômicas e ambientais das habituais secas (SILVA et al., 2021). Conforme Lima e Magalhães (2019), a região do Nordeste do Brasil possui registros de secas que remontam desde o início da ocupação portuguesa no país. Muitas dessas secas foram tão severas que provocaram mortes e êxodos de populações rurais para centros urbanos ou para outros estados. No século XXI, a seca mais recente, se estendeu do ano de 2010 até o início do ano de 2017, afetando a economia de quase 1.800 municípios e gerando perdas de milhões de cabeças de gados (LIMA; MAGALHÃES, 2019). Projeções de modelos climáticos apresentaram aumentos de seca, na região Nordeste, onde há redução da precipitação e aumento na evaporação levando a mais seca e crescimento de áreas em condições áridas que podem se prolongar até a segunda metade do século (MARENGO; BERNASCONI, 2015).

No Nordeste, o estado de Pernambuco possui 89% do seu território em clima semiárido e caracterizado pelos baixos índices pluviométricos (ASFORA; LIMA; LACERDA, 2017), o que o torna um estado suscetível a secas e sofrendo impactos em sua economia. Asfora, Lima e Lacerda (2017) mostram como a seca de 2011-2016 afetou o setor agropecuário pernambucano com a queda do valor adicionado do setor que não retornou ao período de antes da seca.

A variação da precipitação pluviométrica é uma importante variável para se realizar análises de fenômenos climáticos, pois anomalias nessa variável pode levar a excesso de água ou a déficits (SILVA et al., 2020); e esse déficit ou falta de chuvas, por consequência, leva a secas (LOON; LANEN, 2012). Para analisar as características de condições severas de umidade e/ou de seca, uma variedade de índices e indicadores foram desenvolvidos ao longo dos anos.

Svoboda et al. (2012) listam uma série de índices e indicadores (simples, múltiplos e híbridos) de diversas classificações (meteorologia, umidade do solo, hidrologia, sensoria-mento remoto e compostos/modelados) que podem ser utilizados para avaliação de seca, entre estes, os mais usados são o Standardized Precipitation Index - SPI (MCKEE et al., 1993), Palmer Drought Severity Index - PDSI (PALMER, 1968), Standardized Evapotranspiration Index - SPEI (VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO,

2010), Crop Moisture Index - CMI (PALMER, 1968) e Rainfall deciles - Decis de Chuva (GIBBS; MAHER, 1967). Dentre esses índices o mais comumente usado e recomendado pela World Meteorological Organization (WMO), conforme Svoboda et al. (2012), para o monitoramento de seca, é o SPI e que, mesmo após o passar dos anos e desenvolvimento de outros índices, ainda é citado como o mais recomendado por essa organização por diversos autores em trabalhos mais atuais (ESTÁCIO; SILVA; FILHO, 2021; BARGAOU; JEMAI, 2022; AGHELPOUR; BAHRAMI-PICHAGHCHI; KISI, 2020; YADAV, 2021; MEHR; VAHEDDOOST, 2020). O cálculo do SPI requer apenas os dados de precipitação como variável de entrada, pode ser calculado para diferentes escalas de tempo, fornece aviso prévio de seca, ajuda a avaliar a gravidade da seca e é o mais simples dentre todos os índices citados (SVOBODA et al., 2012).

Esse trabalho focará na avaliação das secas meteorológicas em Pernambuco, com o uso da variável precipitação. Dadas as vantagens apresentadas, o SPI será o índice utilizado. Em seguida, serão aplicadas as análises de tendência e de magnitude da tendência às características de seca, para as escalas de tempo anual e sazonal, com o objetivo de verificar sua dinâmica ao longo do tempo em Pernambuco. Além da análise temporal, também será realizada a análise espacial das características de seca para investigar como as secas comportam-se ao longo do território pernambucano.

## 2 Objetivos

### 2.1 Geral

Analisar as características espaço-temporais de seca nas séries de tempo de precipitação no estado de Pernambuco de 1962 a 2012.

### 2.2 Específicos

- Caracterizar eventos de secas ao longo dos anos e nas estações do ano por meio dos indicadores de avaliação de seca (frequência, área afetada e intensidade de seca).
- Analisar a tendência e magnitude da tendência das séries dos indicadores de seca.
- Analisar a distribuição espacial das características de seca no território de Pernambuco.

## 3 Revisão de Literatura

### 3.1 Secas

Secas são consideradas grandes desastres naturais e que ocorrem em diversas partes do mundo (MAYBANK et al., 1995; VENANCIO et al., 2020), dentre todos os desastres, também é considerado como sendo um dos fenômenos mais complexos e o menos compreendidos, que afeta mais pessoas do que outros riscos naturais (WILHITE, 2000; UWIMBABAZI et al., 2022).

A WMO (2021), ao analisar o período entre 1970 e 2019, identificou que, dentre os dez maiores riscos naturais, as secas foram as que mais causaram perdas humanas ao redor do mundo, juntos com ciclones. Cerca de 34% de todas as perdas humanas que ocorreram dentro desse período de cinquenta anos foram creditadas às secas. No continente africano, as secas foram responsáveis por, aproximadamente, 89% das perdas humanas. Secas severas na Etiópia nos anos de 1973 e 1983, em Moçambique em 1981 e no Sudão, em 1983, na Somália, em 1973 e 2010, e no Chade, em 1980, vitimaram mais de 600 mil pessoas. Estima-se que, dentro do período analisado, o Marrocos tenha tido perdas econômicas na faixa do 1,4 bilhão de dólares. O relatório também aponta que a Etiópia apresentou cerca de 74 desastres naturais que acarretaram em perdas econômicas de 2 bilhões de dólares, mas que uma seca no ano de 2015 foi responsável pela maior parte dessas secas (1,5 bilhão de dólares).

No continente asiático, no ano de 1994, ocorreu uma seca na China que acarretou em perdas de mais de 23 bilhões de dólares. Na América do Sul, as secas estão entre os principais riscos naturais enfrentados na região, seguida das ocorrências de inundações. As secas sulamericanas estão mais atreladas às perdas econômicas como, por exemplo, as secas que ocorreram no Brasil (1978 e 2014) e na Argentina (2018) geraram perdas estimadas em quase 18 bilhões de dólares, sendo a seca de 1978, no Brasil, a mais custosa para a região sulamericana (WMO, 2021). Na América do Norte, a ocorrência de seca no ano de 2012 gerou prejuízos em quase 22 bilhões de dólares. O Canadá, no ano de 1977, sofreu uma seca que até então foi o fenômeno natural mais custoso ao país (12,6 bilhões de dólares). No sudoeste do Pacífico, as secas correspondem a 16% das perdas econômicas relacionadas a desastres naturais (WMO, 2021). Secas que ocorreram na Austrália (1981 e 2002), causaram prejuízos de quase 20 bilhões de dólares. Na Nova Zelândia, de 55

desastres naturais ocorridos entre 1970 e 2019, o mais custoso foi uma seca em 2013 (880 milhões de dólares). Por fim, na Europa, as secas estão entre os cinco desastres naturais mais custosos, correspondendo a 10% de todas as perdas econômicas registradas. Em 1990, a ocorrência de seca na Espanha causou danos econômicos de quase 9 bilhões de dólares. Nos anos de 2010 e 2012, na Rússia, as secas geraram perdas de 2 bilhões de dólares (WMO, 2021). [Horridge, Madden e Wittwer \(2005\)](#) analisou o impacto das secas que ocorreram na Austrália, entre os anos de 2002 e 2003, e por meio de simulações identificou que essa seca foi responsável pela redução de 1.6% do Produto Interno Bruto (PIB) do país e agravamentos na balança comercial. [Kuwayama et al. \(2019\)](#) analisou, por meio de dados em painel, a seca nos Estados Unidos e identificou efeitos negativos e significativos nos rendimentos agrícolas do milho e soja em regiões americanas. [Carroll, Frijters e Shields \(2009\)](#) estimam o custo da seca utilizando dados de precipitação e a satisfação com a vida, durante os anos de 2001 e 2004 na Austrália. Os resultados mostraram que secas causam perdas na renda da população anual de quase 15 mil dólares e, conseqüentemente, o equivalente a redução de 1% do PIB.

Além de impactar negativamente a economia, secas também afetam o lado social gerando perdas irreparáveis. Como explica [Sena et al. \(2014\)](#), do ano 1960 a 2013, ocorreram cerca de 612 eventos de seca que resultaram em mais de dois milhões de mortes e afetaram mais de dois bilhões de pessoas. Desde a década de 1990, ocorreram quase 400 eventos de seca que resultaram em mais de 4000 mortes e mais de um bilhão de pessoas afetadas ([SENA et al., 2014](#)). [Strömberg \(2007\)](#) aponta que, dentre os desastres naturais, a seca é o mais mortal. [Mekuria \(2022\)](#) apontam que entre os anos de 1983 e 1985, milhões de mortes ocorreram por conta da fome gerada por seca, na Etiópia, e que secas mais recentes (2011, 2015 e 2016) deixaram milhões de etíopes sem comida suficiente. Projeções realizadas no Irã por [Mafi-Gholami, Zenner e Jaafari \(2022\)](#) mostram que é esperado um aumento da vulnerabilidade social com um aumento da severidade de seca, no país. O século XX é repleto de eventos devastadores de seca que ocorreram na Europa, Estados Unidos, Rússia e China que causaram mais de 4 milhões de mortes ([NASIR; TOTH, 2022](#)). Exemplos de fortes secas no século XXI também são encontrados, como na Europa, entre 2003 e 2006, que causou cerca de 70 mil mortes ou em 2011, na África, que causaram migrações em massa e mortes ([NASIR; TOTH, 2022](#)). Além da morte por fome, secas também podem estar ligadas a um aumento da taxa de suicídio ([HANIGAN; CHASTON, 2022](#)) e níveis elevados de ansiedade e depressão ([ATWOLI; MUHIA; MERALI, 2022](#)). Diversos trabalhos apontam para o impacto negativo da seca em áreas como mortalidade infantil, de idosos, por doenças, assim como violência doméstica e educação.

[Khan et al. \(2021\)](#) utilizou dados de precipitação (1980-2012) para calcular o índice SPI nas escalas 3, 6, 9 e 12 para dez países da África Austral, além de utilizar o PIB e da

taxa de alfabetização para analisar o impacto das secas na mortalidade infantil, concluindo que a mortalidade infantil aumentou em Angola, Malawi, Moçambique, Namíbia e Zâmbia à medida que a seca piorou nesses países. [Contreras et al. \(2020\)](#) identificou um aumento da taxa de mortalidade infantil em La Guajira, Colômbia, durante as secas entre os anos de 2012 e 2016; a maior parte das crianças faziam parte da comunidade indígena Wayuu, sendo uma das comunidades colombianas mais vulneráveis. [Salvador et al. \(2021\)](#) analisou a mortalidade diária natural, circulatória e respiratória de 1983 a 2016 com o uso dos índices SPI e SPEI, identificando que: i) há associações significativas entre seca e as causas de mortes citadas, ii) que a seca afetou mais a população masculina e que iii) a influência da seca é de curto prazo. [Abadi et al. \(2022\)](#) analisa se há associações entre as secas e mortalidades de todos os tipos entre 1980 a 2014, no estado do Nebraska, Estados Unidos. O estudo utilizou o Índice de Seca de Demanda Evaporativa (EDDI) e encontrou associações significativas entre seca e a população branca de meia-idade (de 25 a 34 anos e 45 a 64 anos) e que secas de longo prazo estão mais associadas com taxas de mortalidade mais altas. [Berman et al. \(2017\)](#) estima o risco de internações relacionadas a doenças do coração e doenças respiratórias em idosos entre os anos de 2000 e 2013, no oeste dos Estados Unidos. Os resultados mostram que durante o período de agravamento da seca ocorre um aumento do risco de doenças cardiovasculares e de mortalidade. [Alam et al. \(2021\)](#) estuda o impacto de características de seca com a mortalidade no norte de Bangladesh. Foram usados dados de precipitação de três estações pluviométricas, para calcular o índice SPI e suas categorias (leves, moderadas, severas e extremas), e dados de mortalidade entre os anos de 2007 e 2017. Os resultados apontam que as categorias de secas severas e extremas afetaram a mortalidade no curto prazo, enquanto que as categorias de seca leve e moderada foram associadas com a mortalidade circulatória e respiratória.

[Epstein et al. \(2020\)](#) ao analisar dados demográficos e de saúde, entre 2011 a 2018, e os percentis de precipitação (onde classifica as secas como severas, leve/moderadas ou nenhuma), identificou que mulheres que vivem em condições de seca severa apresentaram riscos maiores de ter um parceiro controlador, de sofrer violência física e sexual em comparação com mulheres que não viviam na seca; para a seca leve/moderada, as mulheres tiveram mais risco com a violência física e sexual. Além disso, há maior associação entre secas e violência por parceiro íntimo para meninas adolescentes e mulheres desempregadas. [Chigusiwa, Kembo e Kairiza \(2023\)](#) aponta que há uma significância estatística entre a violência sofrida por apanhadoras (meninas e mulheres) de água no Zimbábue e choques de seca e que a gravidade do impacto do choque da seca aumenta a probabilidade de ocorrência dessa violência.

[Nübler et al. \(2021\)](#), ao analisar o choque de precipitação na região de Wajir County, no Quênia, que é uma região propensa a secas. Os resultados afirmam que os

choques pluviométricos de longo prazo têm efeitos negativos no desenvolvimento cognitivo e desempenho na educação das meninas. Já (NORDSTROM; COTTON, 2020) analisou as secas severas de 2015-2016 na África Austral. Essa seca serviu de experimento natural, onde é possível estimar o impacto da mesma na educação das crianças no Zimbábue, que moram em zonas rurais. Os resultados mostraram i) que a seca levou a uma redução significativa no desempenho das crianças, ii) crianças que moram em áreas afetadas pela seca tiveram notas menores do que alunos que moram em áreas não afetadas por secas e iii) meninas de regiões afetadas pela seca tiveram uma diminuição no comportamento de liderança, o que sugere a seca pode levar a desmotivação dessas crianças.

## 3.2 Análise da seca

Analisar a seca não é uma tarefa fácil, principalmente por ser um fenômeno que pode ocorrer em áreas tanto de alta como de baixa precipitação (WILHITE; GLANTZ, 1985) e que pode se desenvolver durante períodos curtos, como semanas ou meses, ou durante longos períodos, como estações, anos ou décadas (WANG et al., 2016). Outra dificuldade, está em saber qual tipo de seca será analisada. Wilhite e Glantz (1985) trazem pelo menos quatro tipos de secas: meteorológicas, agrícolas, hidrológicas e socioeconômicas. As secas meteorológicas podem ser definidas com base no grau de secura e pelo tempo de um período seco; e assim como outros tipos de seca, acontecem em decorrência de uma deficiência de precipitação (WILHITE; GLANTZ, 1985). Então, para a análise de secas meteorológicas, a variável determinante é precipitação (PANU; SHARMA, 2002).

Awchi e Kalyana (2017) explicam que secas meteorológicas prolongadas podem ser a causa de outros tipos de secas, como as secas agrícolas (ocasionada pelo déficit de umidade do solo) que prejudicam a produção agrícola e que, em seguida, pode-se desenvolver secas socioeconômicas, afetando a vida humana. Além disso, secas meteorológicas podem ser seguidas de secas hidrológicas, que segundo Loon (2015), é um tipo de seca relacionada a falta de água em sistemas hidrológicos, gerando vazões baixas e anormais em rios e níveis baixos em reservatórios subterrâneos e lagos, por exemplo. A relação entre secas meteorológicas e secas hidrológicas é abordada em trabalhos como os de Xu et al. (2019), de Guo et al. (2020) e de Li et al. (2020). Manesh et al. (2019) analisa a ligação entre secas meteorológicas e secas agrícolas, analisando o índices de vegetação e índices de variáveis meteorológicas (evapotranspiração, temperatura da superfície terrestre, etc.), onde os resultados mostram que à medida que a temperatura aumentava, era percebido um aumento da inclinação da reta de regressão entre o índice de seca SPEI e o índice de saúde vegetal, implicando que um aumento da temperatura aumentará a necessidade de água pelas plantas e que durante períodos de seca as plantas enfrentarão maior estresse

hídrico.

Além dos tipos de secas mais comuns na literatura, existem outros tipos de secas não muito conhecidos, mas que podem ser citados, como as secas ecológicas, que são episódios de déficits na disponibilidade de água que levando a vulnerabilidade dos ecossistemas e prejudicando os seus serviços (CRAUSBAY et al., 2017); secas vegetais, que trata do impacto da seca na vegetação (RULINDA et al., 2012). Pesquisa como a de Xu et al. (2020) analisou a tendência global de longo prazo de secas vegetais utilizando dados de satélites.

Há pesquisas que também estudam a influência da seca em outras áreas da vida humana como, na saúde, onde Stanke et al. (2013), que faz uma revisão sistemática de artigos que mostram o impacto negativo da seca na nutrição humana, no aumento de doenças relacionadas a redução do abastecimento de água, aumento de doenças transmitidas por vetores (dengue, malária, Chikungunya, doença de chagas, etc.) e piora na saúde mental. Goin, Rudolph e Ahern (2017), por meio de métodos de controle sintético, identificou aumento do de crimes contra a propriedade no Estado da Califórnia, nos Estados Unidos, durante a ocorrência de seca.

Secas ocorrem em diversas partes do mundo, sendo comum a ocorrência em regiões áridas e semiáridas, entretanto, essas mesmas regiões são as mais sensíveis a esse fenômeno (JHA; SRIVASTAVA, 2018). Ntali e Lyimo (2022) afirma que as secas são perigos devastadores, que trazem impactos para os meio de subsistência e ao desenvolvimento sustentável de regiões semiáridas. Roever et al. (2015) também afirma que os modelos de mudanças climáticas apontam que as secas estão tornando-se mais frequentes e severas nas regiões áridas e semiáridas. Nas regiões semiáridas existem comunidades em situação de vulnerabilidade e que são as que mais sofrem com a ocorrência de períodos de seca extrema, pois afeta, principalmente, a segurança alimentar dessas comunidades (ALVALA et al., 2017). Diversos trabalhos analisam o fenômeno da seca em regiões semiáridas ao redor do mundo como Vicente-Serrano (2007), Wable, Jha e Shekhar (2019), Surendran et al. (2019), Medugu, Majid e Johar (2011), Shahabfar e Eitzinger (2013), entre outros.

No Brasil, a parte semiárida da região Nordeste, segundo Marengo et al. (2017), é talvez a região mais vulnerável a secas.

### 3.3 Secas no Nordeste brasileiro

O Nordeste brasileiro apresenta uma extensa região semiárida e possui registros de secas no seu histórico. Marengo et al. (2019) explica que os episódios de seca foram registrados na região Nordeste desde do século XVI e traz uma lista de anos em que ocorreram secas, atualizada até o ano de 2017, sendo que a maioria desses eventos de seca

ocorrem no século XIX e XX.

[SILVA et al. \(2013\)](#) descreve as consequências das secas no Nordeste ao longo dos séculos XVIII, XIX e XX. As secas que ocorrem no século XVIII foram responsáveis por perdas enormes de gados e do aumento da mortalidade na região, deixando muitos flagelados. Dentre as que ocorreram no século XIX, a pior registrada até então, foi a dos anos de 1877 a 1879, pois atingiu toda região Nordeste; a consequência foi uma estimativa de mortes dentre 200.000 a 500.000 pessoas ([MARENGO et al., 2022](#)) e o êxodo de milhares de pessoas da região.

Outra grande seca atingiu toda a população nos anos de 1888 e 1889, deixando regiões abandonadas e destruição em lavouras nos Estados da Paraíba e Pernambuco. [SILVA et al. \(2013\)](#), descreve mais secas ocorrendo no decorrer do século XX, como nos anos de 1903-1904, que causa novamente um êxodo rural na região do Nordeste; em 1914-1915, afetando a região semiárida do Nordeste e causando mais de 278 mil mortes ([MARENGO; TORRES; ALVES, 2017](#)). No ano de 1958, cerca de 10 milhões de pessoas foram afetadas pela seca desse ano. Em 1979-1984, foi o período de seca de maior abrangência deixando milhares de pessoas na fome e na miséria. Os anos de 1982 e 1983 registraram queda de 80% e quase 29 milhões de pessoas afetadas. Em 1986 e 1987, uma seca de baixa intensidade afetou o Nordeste ([MARENGO; TORRES; ALVES, 2017](#)).

A seca que ocorreu no ano de 1988, em decorrência do *El Niño*, atingiu uma população de cinco milhões de pessoas em quase todo Nordeste (exceto Maranhão). Entre 1990 e 1995 ocorreu uma estiagem que gerou impactos comparáveis com a que ocorreu no ano de 1915. No ano de 1993 houve uma seca severa por conta de um evento atípico de *El Niño*. [Marengo et al. \(2022\)](#) cita ainda uma seca entre os anos de 1997 a 1999, sendo uma das piores secas e afetando uma região equivalente a área de Portugal, mais de 1200 municípios afetados e dez milhões de pessoas ficaram sob risco de fome e morte. Uma seca recente ocorreu entre os anos de 2012 e 2018. Essa seca, segundo [Marengo et al. \(2022\)](#), mostrou que a região Nordeste é vulnerável ao fenômeno da seca e, possui para as próximas décadas, um potencial de desertificação. Um exemplo do quanto intensa foi essa seca, foi a abrangência dela, deixando 1717 (98,7%) municípios nordestinos em estado de emergência e reduzindo os níveis do rio São Francisco ao seu mínimo. Por conta desse histórico e do impacto negativo das secas na região nordestina, diversos artigos e trabalhos acadêmicos na literatura analisaram esse fenômeno no Nordeste (CITAR ALGUNS ARTIGOS QUE ANALISAM A SECA NO NORDESTE).

### 3.4 Identificação de secas meteorológicas

O estudo sobre as secas meteorológicas não é um trabalho fácil, entretanto, ao longo do anos, diversos métodos foram desenvolvidos para identificação desse complexo fenômeno, como o uso de índices de seca. [Dikici \(2020\)](#) afirma que os índices mais usados na análise de seca baseiam-se nas variáveis de precipitação e de evaporação. Conforme [Svoboda, Fuchs et al. \(2016\)](#), existem vários índices que são mais comumente usados para analisar secas meteorológicas e todos esses índices utilizam a variável de precipitação para seus cálculo (utilizando apenas a precipitação ou a precipitação com outras variáveis meteorológicas). Alguns índices o como o Rainfall Anomaly Index - RAI ([ROOY, 1965](#)), o Standardized Anomaly Index - SAI, China Z Index - CZI ([WU et al., 2001](#)), ([KATZ; GLANTZ, 1986](#); [KRAUS, 1977](#)), o Percent of Normal Precipitation, o Drought Area Index - DAI ([BHALME; MOOLEY, 1980](#)), o Effective Drought Index - EDI ([BYUN; WILHITE, 1996](#)), o NOAA Drought Index - NDI ([STROMMEN; MOTHA, 2019](#)) utilizam apenas a variável de precipitação em seu cálculo. Entretando muitos desses índices possuem limitações, por exemplo, o EDI, que pode ser usado para monitorar secas meteorológicas e agrícolas, utiliza apenas dados diários de precipitação e seu uso operacional pode ser inviabilizado em caso de falta de atualização desses dados. O DAI, usado para identificar se estações de monções foram adequados ou secos e serve de alerta precoce para desenvolvimento da fome, tem pouca aplicabilidade em regimes climáticos diferentes dos trópicos indianos. O CZI, que seria uma melhoria do SPI, por não requerer ajuste dos dados pelas distribuições Gama e Pearson tipo II, pode ter escalas de tempos mais curtas menos bem representada em comparação ao SPI. Muitos desses índices carecem programas computacionais que estejam disponíveis ao público e/ou possuem limitações para realidade de uma região ([SVOBODA; FUCHS et al., 2016](#)).

Um índices que é comumente encontrado na literatura utiliza, além da precipitação, a temperatura, como é o caso do SPEI ([VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010](#)). O SPEI tem a mesma versatilidade do SPI, sendo possível usar várias escalas de tempo em seu cálculo e aplicá-lo em todos os regimes climáticos. Um dos pontos fortes desse índice é a inclusão da temperatura junto com a precipitação para considerar o seu impacto na situação de seca, além permitir observar o impacto futuro das mudanças climáticas em diferentes cenários. Entretanto, essa vantagem também pode ser uma desvantagem caso o conjunto de dados não disponíveis para ambas as variáveis. Outra limitação é o fato de que secas em rápido desenvolvimento não sejam identificadas rapidamente, por ser um índice mensal ([SVOBODA; FUCHS et al., 2016](#)). [Inocêncio et al. \(2021\)](#) utiliza índices climáticos padronizados para avaliar insegurança hídrica em cinco bacias hidrográficas de Pernambuco (Tracunhaem, Tapacurá, Ipojuca, Una e Pajeú) e

dentre esses índices está o SPEI.

Segundo Wang et al. (2022) e Jain et al. (2015), o Standardized Precipitation Index (MCKEE et al., 1993) - SPI - ou Índice de Precipitação Padronizado (IPP) é um dos indicadores de seca mais usados e de ampla utilização nas áreas de pesquisa de secas meteorológicas, hidrológicas e as relacionada a agricultura, sendo útil para quantificar secas, tanto no Brasil como no mundo. Além disso, o SPI é usado no modo operacional, pois é padronizado tanto em localização como no tempo, e essa padronização permite determinar quão raro é um evento de seca e quando de precipitação é necessário para eliminar a seca (WU et al., 2007).

### 3.4.1 Evidências internacionais

Karavitis et al. (2011) utilizou dados históricos de precipitação de 46 estações pluviométricas, do ano de 1947 a 2004, para calcular o SPI para as escalas de tempo 1, 3, 6, 12 e 24 meses. A utilização desse índice dar-se, segundo o autor, pela simplicidade e capacidade de identificar o início e fim da seca, além de ser mais apropriado para compreender a duração, magnitude e extensão das secas. Os resultados do SPI mostraram a existência de seca severas nos anos de 1989, 1990, 1993 e 2000 nas regiões semiáridas da Grécia. Bahrami, Bazrkar e Zarei (2019) utiliza modelos de médias móveis para realizar a previsão de secas sazonais com base em dados climáticos de 38 estações sinóticas localizadas no Irã. O SPI na escala sazonal foi calculado e depois analisada a sua tendência por meio dos coeficientes de  $\rho$  de Spearman e de Pearson. Com o uso desses testes, foi identificado que mais de 84% das estações sinóticas apresentaram valores de SPI com tendência negativa.

Caloiero e Veltri (2019) avalia a seca na região da Sardenha, Itália, utilizando o SPI nas escalas de tempo 1, 3, 6, 12 e 24 meses. O período de estudo foi de 1922 até 2011 e utilizados os dados de precipitação de 262 estações pluviométricas. Os resultados mostraram que diversos episódios de seca foram observados nas escalas de curto prazo, enquanto que nas de longo prazo, a maioria das secas foram detectadas após 1980. A análise de tendência mostrou resultados negativos durante a estação do inverno.

Uma característica do SPI é a possibilidade de utilizar diferentes distribuições estatísticas no seu cálculo. Guenang e Kamga (2014) analisa a ocorrência de seca em Camarões ao longo de 55 anos utilizando dados de precipitação de 24 estações pluviométricas para o cálculo de SPI nas escalas 1, 3, 6, 12, 18 e 24 meses, mas utilizando quatro distribuições estatísticas para avaliar qual é a mais adequada para cada estação pluviométrica e para cada escala de tempo.

O SPI pode ser trabalhado junto com outros índices, como é aplicado por Mehr e

Vaheddoost (2020) que utiliza-o junto ao *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI) para realizar uma análise comparativa entre as tendências e características de cada uma desses índices em diferentes escalas de tempo, na região de Ankara, Turquia.

### 3.4.2 Evidências nacionais

Diversos trabalhos aplicam SPI para a realidade do Brasil, como por exemplo, Santos et al. (2017) aplica-o para monitorar a variabilidade espaço-temporal das secas na bacia do Alto São Francisco. O SPI foi calculado a partir de dados TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), partindo de janeiro de 1993 até dezembro de 2013. As escalas de tempo para o cálculo foram 1, 3, 6, 9, 12, 24 e 48 e os seus resultados mostraram que para as escalas de tempo de curto prazo (1, 3 e 6), o SPI apresentou valores positivos e negativos balanceados e alternados; já as escalas de longo prazo (24 e 48) mostraram grandes arranjos consecutivos de valores negativos de SPI nos primeiros anos do período estudado. As escalas de médio prazo (9 e 12) apresentaram mais valores positivos de SPI agrupados do que valores negativos.

Macedo et al. (2010) utiliza o SPI, nas escalas de tempo 12 e 24, para analisar a seca no estado do Paraíba. Os dados de precipitação mensal foram obtidos de 49 postos pluviométricos com registros que vão do ano de 1965 a 2000. Os resultados do SPI 12 identificaram a presença de secas severas e maior duração entre os anos de 1990 e 1994 nos municípios de Araruna e Coremas, e de secas extremas no município de Monteiro. O SPI 24 revelou secas severas mais duradouras, entre 1991 e 1995, em Coremas. O autor concluiu que o SPI, para as escalas escolhidas, foi eficaz para monitorar seca na Paraíba.

Cunha et al. (2018) aplica o SPI na 3, 6 e 12 para analisar as características espaciais e temporais de secas severas na região Nordeste do Brasil. Foram utilizados dados mensais obtidos da Agência Nacional de Águas, de 1982 a 2016, de 86 estações pluviométricas. Os resultados do SPI apresentaram tendência negativa e significativa, apontando para mais secas e que estão ligadas ao aquecimento do Oceano Atlântico, resultando em um aumento do risco de seca e da vulnerabilidade social da região Nordeste.

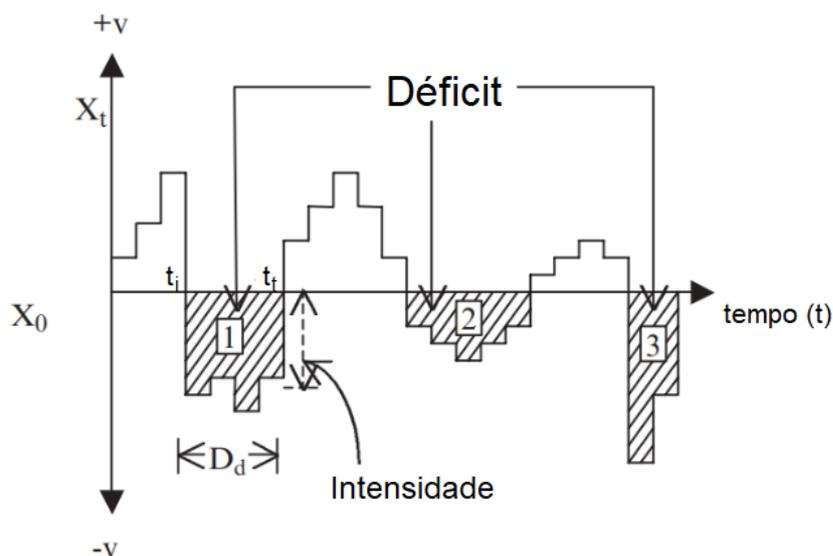
Carmo e Lima (2020) analisaram a dinâmica espaço-temporal da seca da região Nordeste utilizando uma técnica chamada análise de componentes principais (PCA) e índices de seca, com dados que vão de 1980 a 2013. Os resultados desse trabalho permitiram identificar a ocorrência de secas severas e extremas no Nordeste, tanto em anos que já haviam sido registrados na literatura, como identificar anos de ocorrência de seca que a literatura não contemplava. Nesse trabalho, foi identificado que secas extremas, em 1983, afetaram o Estado de Pernambuco.

Brito et al. (2018) analisa as secas no semiárido do Nordeste, de 1981 a 2016, utilizando índices de precipitação e de saúde da vegetação. Os resultados mostraram secas mais prolongadas e severas entre os anos de 2011 e 2016. Esse intervalo de cinco anos, as secas foram mais frequentes, severas e duradouras que nos anos anteriores. O trabalho também identificou quais os estados do Nordeste mais impactados pela seca para cada período de cinco anos. Dentre os estados do Nordeste, o mais afetado pela seca foi Pernambuco dentro do período de 36 anos. Marengo, Cunha e Alves (2016) ao analisar a seca no semiárido, entre os anos de 2012 a 2015, identificou maiores concentrações de déficits hídricos no oeste de Pernambuco.

### 3.5 Caracterização de secas

Muitas vezes a utilização do SPI não é suficiente para extrair informações sobre as secas. A partir da série temporal dos valores de SPI e da sua escala de tempo, é possível obter características dos eventos de seca por meio da *theory of runs*. Essa teoria, que foi proposta por Yevjevich (1967), é comumente empregada para caracterizar eventos de seca. Paulo e Pereira (2006) definem *run* como uma sucessão de observações de mesmo tipo que são precedidas ou sucedidas por uma ou mais observações de tipos diferentes. O uso dessas características é amplo e ocorrem em diversas pesquisas. Na Figura 1 são apresentadas algumas das principais características que podem ser usadas para quantificar as dimensões de uma seca, onde  $X_0$  é um limiar que define onde começa e termina um período seco,  $t_i$  e  $t_t$ , são o tempo de início e término da seca, respectivamente;  $D_d$  é a duração da seca;  $+v$ , os valores positivos do índice e  $-v$ , os valores negativos.

Figura 1 – Características de seca da *run theory*



Fonte: Adaptado de Mishra e Desai (2005)

Mishra e Desai (2005) utiliza as características como severidade e duração de seca para curvas SAF (severity-area-frequency) para a avaliação da seca na bacia do rio Kansabati, na Índia, durante os anos de 1965 a 2001. Boer, Ramdhani et al. (2021) ao analisar a variação espacial e temporal de seca na Java Central (1990-2010) com o SPI, utiliza-se das características de seca de duração, severidade e intensidade de seca. Essas características são interpoladas sobre a área de estudo para identificar em quais regiões elas foram mais ou menos concentradas.

Cavus e Aksoy (2019) além de utilizar as características convencionais (severidade, duração e intensidade) para analisar a seca na bacia do rio Seyhan, no mediterrâneo turco, com SPI, são utilizados outros métodos como, período de retorno, seca severa crítica, seca singular, etc. Os resultados mostraram que a bacia do rio Seyhan evidenciou aumento do período de retorno de seca e de duração de seca (principalmente período de retorno e duração de seca). Guo et al. (2022) utiliza dados de satélite para estimar a precipitação no Noroeste da China e para calcular o SPI, entre 1983 e 2013, para as escalas 1, 3, 6 e 12. Para avaliar a seca foram usados as características de duração, intensidade de seca e severidade. Caloiero, Caroletti e Coscarelli (2021) utilizaram quatro características para analisar a seca na Itália entre os anos de 2000 a 2020, que são: número de eventos de seca, média da duração de seca, média da severidade de seca e média da intensidade de seca. Essas características foram calculadas com base no SPI das escalas 3, 6, 12 e 24. A interpolação espacial revelou altas concentrações dessas características na região norte e central do território italiano. Salimi, Asadi e Darbandi (2021) analisa secas meteorológicas e hidrológicas em três bacias hidrográficas (Lighvan, Navroud e Seqez) no Irã. São utilizados dados de correntezas, precipitação e evaporação entre os anos de 1992 e 2016. São utilizadas as características de intensidade e duração de seca dos índices SPI, SPEI e SSI (Standardized Streamflow Index), onde essas características permitiu quantificar o impacto da mudança climática na seca das regiões. A duração do SPI-9 identificou uma seca significativa que durou 57 meses e, de 34 meses para o SPEI-9 e de 41 meses para o SSI-9.

Nam et al. (2015) analisa a seca na Coreia do Sul com os índices SPI, SPEI e SC-PDSI (Self-Calibrated Palmer Drought Severity Index) usando dados de 54 estações meteorológicas. A avaliação quantitativa da seca foi feita por meio dos indicadores de frequência, duração, severidade e magnitude da seca, sendo identificado aumento significativo dessas características em diferentes escalas de tempo do índices.

Awange, Mpelasoka e Goncalves (2016) utiliza dados de precipitação compreendem o período entre 1901 a 2013, para o Brasil. É calculado o índice SPI para as escalas de tempo 3, 6, 12 e 24; e são geradas as características de frequência, intensidade e duração

de seca. Os resultados não evidenciaram tendência significativa para as três características durante as 11 décadas de estudo e para nenhuma das quatro escalas de tempo escolhidas.

## 3.6 Análise estatística da seca

Os dados de precipitação, SPI e, conseqüentemente, os das suas características são séries temporais, que, segundo [Andrade e Tiriyaki \(2019\)](#), pode ser definido como uma sequência de observações de determinada variável ao longo do tempo. [Kirchgässner, Wolters e Hassler \(2012\)](#) afirma que as séries temporais possuem quatro componentes principais, que são: a tendência (desenvolvimento de longo prazo da séries temporal), o ciclo, a sazonalidade (movimento de altos e baixos dentro de um ano) e o erro (componente que contém os movimentos que não são da tendência, do ciclo e nem da sazonalidade). Esse formato de dados permite a realização de análises estatísticas que é bastante vasto dentro da literatura.

### 3.6.1 Análise de tendência

[Bacanli \(2017\)](#) afirma que a análise de tendência de precipitação e seca auxilia no desenvolvimento e gestão de recursos hídricos. Na análise tendência de seca é investigada se há ou não a presença de tendência positiva ou negativa e a magnitude da tendência. Existem diversos testes para identificar a presença de tendência, porém o mais amplamente utilizado é o teste Mann-Kendall ([MANN, 1945](#); [KENDALL, 1948](#); [TOSUNOGLU; KISI, 2017](#)), enquanto que para estimar a inclinação da tendência (magnitude) aplica-se o teste de Sen ([SEN, 1968](#)).

[Lin et al. \(2020\)](#) afirma que o teste Mann-Kendall é recomendado pela WMO e utiliza-o para identificar presença de tendência nos índices SPI e HI (Humidity Index), nas escalas de tempo 1, 3, 6, 9, 12 e 18. O teste não revelou tendência significativa para esses índices em nenhuma escala de tempo. [Zhang et al. \(2012\)](#) analisa dados diários de precipitação de 53 estações pluviométricas em Xinjiang, China, com uso do índice SPI para analisar o fenômeno de seca na região. O teste Mann-Kendall é utilizado para detectar tendência no SPI e nas características de seca de duração e severidade. Os resultados apontaram tendência de seca em regiões ocidentais de Xinjiang na Primavera, Verão e Outono, e no seu meio leste. Para as características de seca, o norte da região, apresentou redução em sua severidade e duração.

[Sobral et al. \(2019\)](#) analisa a precipitação no Estado do Rio de Janeiro com o SPI e os testes estatísticos Mann-Kendall, de Sen e Pettit (para inflexão abrupta). As séries de precipitação foram extraídas de 99 estações pluviométricas e compreendem os anos de 1979

a 2009. O teste de Mann-Kendall detectou tendência significativa e aumento de precipitação na região norte e montanhosa do Rio de Janeiro. O teste de Pettit detectou uma mudança abrupta nessas duas regiões. Já o teste de Sen relatou que as estação pluviométrica de Dois Rios (no norte) relatou tendência de aumento do SPI, enquanto que a estação de Cordeiro (região montanhosa) houve redução dos valores de SPI. [Santana, Santos e Silva \(2020\)](#) utilizaram os testes de Mann-Kendall e de Sen para detectar tendências de precipitação na Bacia do Rio Paraíba do Sul, entre os anos 2014 e 2016, onde algumas regiões dessa bacia apresentaram tendência positiva e outras regiões tendências negativa para precipitação. O autor aponta para necessidade de realizar o monitoramento hidrológico de rio que é responsável pelo abastecimento de água público de 28 municípios de São Paulo e Rio de Janeiro e onde operam 120 usinas hidrelétricas.

Há outras trabalhos que utilizam os testes Mann-Kendall e de Sen para a realidade do Estado de Pernambuco. [Silva et al. \(2022\)](#), utiliza dados diários de séries históricas de de precipitação de 1990 a 2020. São utilizados os índices PCI (Precipitation Concentration Index), SPI, PCD(Precipitation Concentration Degree), PCP (Precipitation Concentration Period) e o RAI (Rainfall Anomaly Index). A análise seguiu-se com o uso dos testes de Mann-Kendall e de Sen. O SPI detectou a ocorrência das secas mais severas em todas as regiões de Pernambuco durante a década de 1990, exceto no Sertão do São Francisco, onde foram mais predominantes na década de 2010. O SPI na escala anual apresentou tendência em todas as regiões (Sertão, Agreste e Zona da Mata).

[Bezerra et al. \(2021\)](#) estudou a precipitação de 45 estações pluviométricas de 1987 a 2019, tando anual como sazonal. Foi utilizado o RAI e para a análise temporal, o teste de Mann-Kendall. O estado de Pernambuco foi dividido em três zonas: Zona 1 (região semiárida), Zona 2 (região intermediária) e Zona 3 (costa de Pernambuco). A análise de tendência revelou uma redução na precipitação de 48.7mm na Zona 1, 13.2 mm na Zona 2 e de 204.4 mm na Zona 3, porém sem significância estatística. A Zona 1 apresentou tendência negativa na Primavera e a Zona 2 apresentou tendência positiva no Verão, indicando que as chuvas sazonais apresentaram mudanças.

[Soares, Nóbrega e Galvêncio \(2018\)](#) analisou as seca na região da bacia hidrográfica do Pajeú com dados de precipitação de 12 postos pluviométricos, de 1965 a 2014. Foram utilizados o IA (Índice de Aridez), o SPI (ou IPP) e o teste de Mann-Kendall. Dos 12 postos pluviométricos, 3 postos ao sul da bacia do Pajeú, apresentaram tendência negativa e significativa para o SPI na escala anual. Os valores negativos de SPI para seca severa e extrema foram mais frequentes a partir dos anos de 1990.

### 3.6.2 Análise espacial

A análise de seca não limita-se apenas ao tempo, também é possível analisar o espaço que esse fenômeno afeta. Para [Dikshit et al. \(2022\)](#), as secas são os riscos naturais mais espacialmente complexos. Uma das formas de realizar o monitoramento de secas é pelo uso de métodos geostáticos, sendo possível estimar a distribuição espacial da seca ([AKHTARI; MAHDIAN; MORID, 2007](#)).

[Soleimani et al. \(2013\)](#) realiza a análise espacial da seca na bacia hidrográfica de Taleghan, no Irã, interpolando e comparando dados de índices de seca com o método de determinístico Inverse Distance Weighting (IDW) ou Inverso da Distância Ponderada. [Bagheri \(2016\)](#) analisa seca na Província de Fars, no Irã, com interpolação espacial do SPI com o IDW. O método IDW é utilizado em diversas pesquisas onde foi analisada a seca ([PATEL; CHOPRA; DADHWAL, 2007](#); [GIDEY et al., 2018](#); [AL-QINNA et al., 2011](#); [AL-HUSBAN; ZGHOUL et al., 2017](#)), porém não é o único que pode ser aplicado.

Outros artigos usam outras técnicas de interpolação espacial para avaliar seca e realiza uma comparação dessas técnicas para escolher qual a melhor para determinada região. [Keshtkar, Moazami e Afzali \(2021\)](#) utiliza dados de 60 estações pluviométricas de uma bacia hidrográfica do Irã, entre os anos de 1969 e 2009, e calcula o SPI, em seguida compara cinco técnicas de interpolação (IDW, interpolação polinomial global, interpolação polinomial local, Função de base radial -RFB- e Krigagem). Os métodos foram comparados com métricas de avaliação (raiz do erro quadrático médio, erro absoluto médio e erro de viés médio) que revelaram o RFB e o Krigagem como melhores técnicas de interpolação espacial do SPI para a região.

[Noori et al. \(2013\)](#) compara quatro técnicas de interpolação (Krigagem, Cokrigagem, TPSS e IDW) e escolhe a melhor técnica a partir das métricas de avaliação raiz do erro quadrado médio, erro médio absolute e o coeficiente de determinação  $R^2$ . O melhor método foi o Cokrigagem, que depois foi usado para gerar mapas de água subterrânea. Outras técnicas podem ser usadas para gerar mapas e monitorar o comportamento de secas ([AFZALI et al., 2016](#); [ZARGAR; SADIQ; KHAN, 2014](#); [WICHER-DYSARZ; DYSARZ; JASKUŁA, 2022](#); [SUBEDI et al., 2019](#); [YUAN; QUIRING; PATIL, 2016](#))

### 3.6.3 Testes de comparação estatística

[Liao \(2011\)](#) lista um conjunto de métodos que podem ser usados para comparação entre grupos de amostras e entre esses métodos estão testes estatísticos paramétricos e não-paramétricos.

O teste  $t$  pode ser usado para determinar se existe ou não diferença entre índices

de seca ou entre suas características. [Bushra et al. \(2019\)](#) implementa o teste  $t$  para determinar se existe diferenças significativas entre as correlações do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o PDSI e entre o NDVI e o PHDI (Palmer Hydrologic Drought Index) em diferentes ecorregiões no Centro-Sul dos Estados Unidos. O teste  $t$  resultado para diferença estatisticamente significativa entre as correlações do NDVI e do PDSI e entre o NDVI e o PHDI. [Lou et al. \(2017\)](#) utiliza o teste  $t$  para determinar se existe diferença estatística entre a área seca e a intensidade de seca na província de Zhejiang, no sudoeste da China, em quatro períodos diferentes. Também é possível encontrar pesquisas que utilizam o teste  $F$  ([BONACCI et al., 2023](#)) para analisar índices de seca. Esses testes esbarram em uma limitação: a suposição de que as amostras são normalmente distribuídas. Para superar essa limitação podem ser usados testes não-paramétricos. Na análise de índices de seca existem pesquisas que utilizam esses tipos de testes como, por exemplo, a aplicação do teste Wilcoxon-Mann-Whitney.

[Tabrizi et al. \(2010\)](#) utiliza esse teste para analisar a relação entre a intensidade seca de fluxo de rios e o SPI nas escalas 3, 6 e 12. Os resultados mostraram a relação significativa entre valores de SPI de quatro estações pluviométricas com a intensidade de seca de vazão de duas estações hidrométricas. [Costa \(2011\)](#) utiliza o teste Wilcoxon-Mann-Whitney unilateral para comparar a mediana dos valores de SPI dos anos de 1940 a 1969 com a mediana do SPI de 1970 a 1999.

[Vicente-Serrano et al. \(2011\)](#) utiliza o teste Wilcoxon-Mann-Whitney para analisar se as fases positivas e negativas do índice NAO (North Atlantic Oscillation) levam a diferenças estatisticamente significativas para os valores médios do SPEI da região do Mediterrâneo entre os anos de 1901 e 2006. O resultado do teste apontou que, em relação aos anos negativos e normais, existe diferença estatisticamente significativa para a maioria das escalas de tempo utilizadas. [Vicente-Serrano et al. \(2017\)](#) utiliza, novamente, o teste Wilcoxon-Mann-Whitney para avaliar o índice SPEI, em diferentes escalas de tempo, refletiu condições significativas de seca ou de umidade durante eventos de *El Niño* ou de *La Niña*, no Equador, durante os anos de 1965 a 2012.

[Zhang et al. \(2022\)](#) aplica-o para investigar se há diferenças significativas em variáveis ec hidrológicas durante períodos de seca e períodos não secos. O período estudado compreende entre os anos de 1982 até 2015, para todo território terrestre. O teste foi usado, por exemplo, para identificar os eventos de seca que causam mudanças significativas na variável de evapotranspiração. O teste identificou discrepâncias significativas nas variáveis analisadas e mostrar que o impacto da atividade humana causou aumento da severidade de seca em diferentes condições climáticas.

Outras aplicações desse teste podem ser encontradas em [Deng et al. \(2019\)](#), [Iqbal](#)

et al. (2018), Taylor et al. (2013) e Jones e Vliet (2018).

## 4 Metodologia

Os procedimentos e métodos utilizados visam estudar o comportamento das séries temporais de precipitação recorrendo à análises quantitativas, partindo do cálculo do SPI, resumindo indicadores de avaliação de seca para as escalas de tempo 3 (sazonal) e 12 (anual), aplicando teste Mann-Kendall para análise de tendência, teste de inclinação de tendência de Sen e elaboração de mapas com as características de seca por meio do método de interpolação espacial IDW.

### 4.1 Área de estudo e dados

Pernambuco é um estado localizado na porção oriental da região Nordeste do Brasil com uma área de 98.311,66  $Km^2$ . Pernambuco faz divisa ao norte, com os Estados da Paraíba e do Ceará; ao sul, com os Estados de Alagoas e da Bahia; a leste, é banhado pelo Oceano Atlântico; e a oeste, com o Estado do Piauí. Comparado aos demais estados brasileiros é considerado pequeno, e de média extensão, quando comparado com os estados do Nordeste. Na [Figura 2](#) pode-se observar o mapa de Pernambuco com as regiões Sertão, Agreste e Zona da Mata.

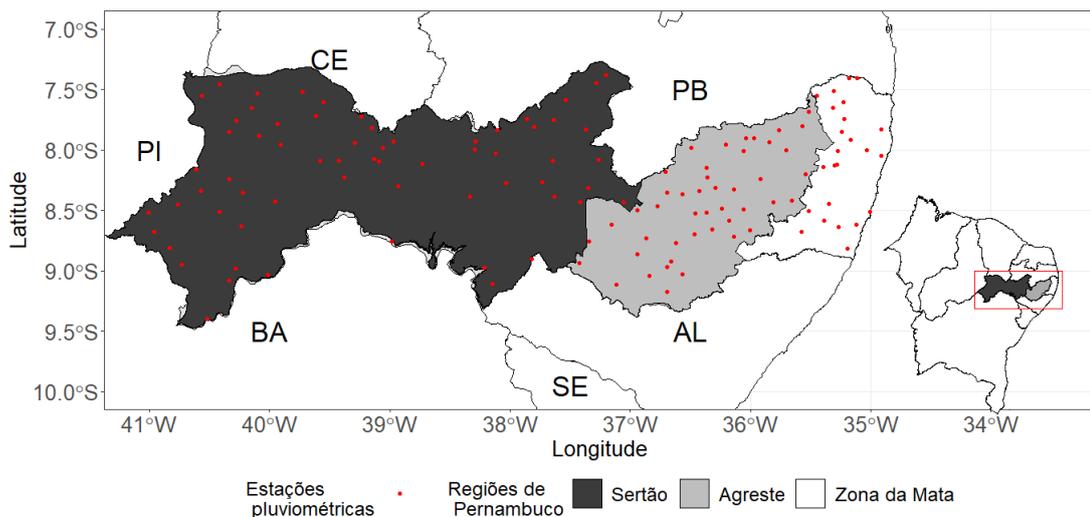


Figura 2 – Pernambuco, suas regiões (Sertão, Agreste e Zona da Mata), estações pluviométricas do LAMEP/ITEP e sua localização entre os estados do Nordeste

Pernambuco é um estado estreito no sentido Norte-Sul ( $7^{\circ}15'45''N$  -  $9^{\circ}28'18''S$ ) e tem uma faixa marítima de 187  $Km$ . No sentido Leste-Oeste ( $88^{\circ}48'33''E$  -  $41^{\circ}19'54''W$ )

a extensão territorial chega a 784 *Km*. Por ser banhado pelo Oceano Atlântico o clima perto do litoral é tropical e úmido, entretanto, a medida que adentra-se no território, o clima começa a ficar seco. Cerca de 80% de seu território fica situado em uma região de clima semiárido, onde as chuvas são poucas e mal distribuídas, ocorrendo, com frequência, o fenômeno das secas (CONDEPE/FIDEM, 2006). O Verão pernambucano compreende os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro; Outono, os meses de Março, Abril e Maio; o Inverno os meses de Junho, Julho e Agosto e a Primavera, os meses de Setembro, Outubro e Novembro (MEDEIROS et al., 2021; MARENGO; TORRES; ALVES, 2017).

O território pernambucano é dividido em outras três regiões: Zona da Mata, Agreste e Sertão. A Zona da Mata corresponde à faixa de terra que vai da costa atlântica até Planalto da Borborema. É a menor dessas três regiões, apresentando uma área de aproximadamente 12 mil *km*<sup>2</sup>. Dentre as três regiões é a mais importante economicamente e demograficamente, pois nela encontra-se a Região Metropolitana de Recife, uma das maiores Regiões Metropolitanas do Brasil composta por 14 municípios. O relevo é composto por uma planície litorânea, quase ao nível do mar que eleva-se gradativamente, chegando a altitudes em torno de 600 metros, nas áreas próximas ao Planalto da Borborema. O clima quente e úmido apresenta temperaturas médias de 24°C e precipitações que variam de 800 a 2000 *mm* anuais (CONDEPE/FIDEM, 2006).

A região do Agreste pernambucano é uma região intermediária entre a Zona da Mata e o Sertão, com economia diversificada pela produção de milho, feijão, mandioca, leite e pecuária de corte (MONTEIRO et al., 2007). Essa região possui uma extensão de aproximadamente 24 mil *Km*<sup>2</sup>, encontra-se em quase em sua totalidade no Planalto da Borborema, com clima que varia de tropical úmido da Zona da Mata ao semiárido do Sertão. (CONDEPE/FIDEM, 2006). Os períodos chuvosos vão de Março a Junho, com excedentes ocorrendo entre os meses de Abril e Junho (APAC, 2012). A precipitação nessa região varia de entre 650 a 1000 *mm* anuais (GALVÍNCIO; MOURA, 2005).

A região do Sertão está localizada no semiárido de Pernambuco com uma área de 63 mil *Km*<sup>2</sup>, temperaturas altas por conta do clima quente e seco, precipitação baixa com má distribuição. O clima da região também afeta a vegetação local, a formação do solo, a hidrografia, produção e mobilidade. Nessa região é localizada a Chapada do Araripe e a vegetação predominante é a caatinga, mas em trechos chuvosos há vegetação do tipo floresta-caatinga (CONDEPE/FIDEM, 2006). A precipitação no Sertão é baixa e em média é de 600 *mm* anuais (GALVÍNCIO; MOURA, 2005).

Os dados utilizados neste trabalho são séries históricas de precipitação mensal para o estado de Pernambuco, Brasil, fornecidas pelo Laboratório de Meteorologia do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (LAMEP/ITEP). As séries mensais de precipitação são

registradas em 133 estações meteorológicas (Figura 2) durante o período de 1962 a 2012. Os dados faltantes foram preenchidos usando o método de interpolação de análise de superfície de tendência (SILVA et al., 2019).

## 4.2 Standardized Precipitation Index - SPI

O Standardized Precipitation Index (SPI) foi desenvolvido por McKee et al. (1993) para quantificar o déficit de precipitação em múltiplas escalas de tempo (1, 3, 6, 9, 12, 24 e 48 meses, por exemplo) e é recomendado pela World Meteorological Organization (WMO) para caracterizar a severidade da seca (HAYES et al., 2011). Para o cálculo do SPI, primeiro é necessário ajustar a função densidade de probabilidade (fdp) para o conjunto de dados de precipitação. Dentre as várias distribuições propostas na literatura (STAGGE et al., 2015; SVENSSON; HANNAFORD; PROSDOCIMI, 2017), neste trabalho, foi adotada a distribuição gama, que é amplamente utilizada para ajustar séries temporais de precipitação (MCKEE et al., 1993). A função de densidade de probabilidade da gama é dada por

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, \quad x > 0 \quad (4.1)$$

onde  $\alpha > 0$  é um parâmetro de forma,  $\beta > 0$  é um parâmetro de escala,  $x$  é a quantidade de precipitação e  $\Gamma(\alpha)$  é a função gama :  $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx$ . Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são estimados usando o método da máxima verossimilhança, que produz estimativas

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad \hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (4.2)$$

onde  $\bar{x}$  é o valor médio da quantidade de precipitação,  $A \equiv \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln x}{n}$  é usado para fornecer uma representação de fórmula mais compacta, e  $n$  é o número de observações. Em seguida,  $f(x)$  é integrada em relação a  $x$ , para obter a probabilidade acumulada

$$F(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx, \quad x > 0 \quad (4.3)$$

Entre os valores de  $x$  podem ocorrer valor(es) zero ( $x = 0$ ) e a função gama é indefinida para esse valor. Por esse motivo é necessário considerar a probabilidade acumulada da seguinte forma

$$H(x) = q + (1 - q)F(x) \quad (4.4)$$

onde  $q$  é a probabilidade de precipitação zero, que é calculada como,  $q = m/n$  onde  $m$  representa o número de zeros em uma série de precipitação e  $n$  é o número de observações. A última etapa é padronizar o valor de  $H(x)$  usando a distribuição normal padrão  $\varphi(\cdot)$ , conforme abaixo

$$SPI = \varphi^{-1}[H(x)] \quad (4.5)$$

McKee et al. (1993) possui sua definição para as categorias do SPI, mas nesse trabalho serão usadas as categorias definidas por Yan et al. (2017), conforme a Tabela 1 abaixo

Tabela 1 – Classificação de seca baseada nos valores de SPI

Valores do SPI	$(-\infty; -0,5]$	$(-\infty; -2]$	$(-2; -1,5]$	$(-1,5; -1]$	$(-1; -0,5]$
Seca	Total	Extrema	Severa	Moderada	Leve

Fonte : Yan et al. (2017)

### 4.3 Indicadores de avaliação de seca

Serão calculados indicadores de avaliação de seca de frequência, área afetada pela seca e intensidade. Esses indicadores serão calculados a partir dos valores do SPI na escala anual e escala sazonal (seção 4.2).

#### 4.3.1 Frequência de seca

A frequência da seca é calculada pela razão entre o número de anos em que ocorreram seca e o número total de anos para uma determinada escala de tempo. A fórmula é definida da seguinte forma

$$P_i = \left( \frac{n}{N} \right) \cdot 100\% \quad (4.6)$$

onde  $n$  é o número de meses que apresentaram uma certa categoria de seca e  $N$  é o número total de observações e  $i$  é uma estação pluviométrica específica.

#### 4.3.2 Área afetada pela seca

A área afetada pela seca ( $Q_j$ ) ou a proporção de estações de frequência de seca é o número de estações em ocorreu algum grau de seca e é utilizada para avaliar o tamanho da área impactada de uma seca. A fórmula desse indicador é dada da seguinte forma:

$$Q_j = \left( \frac{m}{M} \right) \cdot 100\% \quad (4.7)$$

onde  $M$  é o número total de estações de observação na área de estudo;  $m$  é o número de estações onde ocorreu a seca; e o subscrito  $j$  indica o ano.  $Q_j$  indica a extensão da ocorrência de seca em uma determinada área e reflete indiretamente a gravidade da seca na área afetada (YAN et al., 2017). A área afetada pela seca foi classificada de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação de área seca baseada em  $Q_j$

$Q_j$	[0, 10%)	[10%, 25%)	[25%, 33%)	[33%, 50%)	[50%, 100%]
<b>Classe de área seca</b>	Sem seca aparente	Seca local	Seca regional parcial	Seca regional	Seca global

Fonte : Yan et al. (2017)

### 4.3.3 Intensidade de seca

A última característica a ser avaliada é a intensidade de seca. A severidade de um período seca é geralmente definido pelos valores do SPI. Períodos com intensidades severas de seca são definidos por altos valores do SPI das estações onde ocorreram seca. A intensidade de seca de uma estação

$$S_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |SPI_i| \quad (4.8)$$

Além disso, é possível calcular a intensidade média por ano, sendo definida por  $S_j = (1/m) \sum_{i=1}^m S_i$ , onde  $m$  é o número de estações onde ocorreram seca e o subscrito  $j$  indica o ano. A Tabela 3 mostra a classificação da intensidade média de seca.

Tabela 3 – Classificação de intensidade de seca baseada em  $S_j$

$S_j$	(0; 0, 5]	(0, 5; 1]	(1; 1, 5]	(1, 5; 2]	(2; +∞)
<b>Classe de intensidade de seca</b>	–	Leve	Moderada	Severa	Extrema

Fonte : Yan et al. (2017)

## 4.4 Teste de tendência de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall, conforme [Kendall \(1948\)](#) e [Mann \(1945\)](#), é um método estatístico não paramétrico (não requer que os dados sigam nenhuma distribuição específica) usado para determinar se uma série temporal tem uma tendência monotônica de crescimento ou decrescimento. É um procedimento baseado em classificação, especialmente adequado para dados que não seguem distribuição normal, dados contendo outliers e tendências não lineares ([BIRSAN et al., 2014](#)). Este teste é baseado na correlação entre os valores das séries temporais e sua ordem temporal, sendo a hipótese nula de que as observações são independentes e identicamente distribuídas (sem tendência), e a hipótese alternativa de que existe uma tendência monotônica (crescente ou decrescente). Para a série temporal  $x_1, x_2, \dots, x_n$  o teste de Mann-Kendall usa a estatística

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \quad (4.9)$$

em que  $x_i$  e  $x_j$  são os valores de dados sequenciais,  $n$  é o comprimento do conjunto de dados e  $\text{sgn}(\cdot)$  é representado por

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & \text{se } x_j > x_i \\ 0, & \text{se } x_j = x_i \\ -1, & \text{se } x_j < x_i \end{cases}$$

Partindo do pressuposto de que os dados são independentes identicamente distribuídas (hipótese nula), a estatística  $S$  tem média zero,  $E(S) = 0$ , e variância dada por

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right],$$

onde  $q$  é o número de grupos empatados e  $t_p$  é o número de observações no  $p$ -ésimo grupo. A estatística de teste  $Z$ , que tem uma distribuição normal, é calculada com base nos valores  $S$  e  $\text{Var}(S)$ :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases}$$

Os valores positivos de  $Z$  indicam tendências ascendentes, enquanto os valores negativos de  $Z$  mostram tendências descendentes. Finalmente, para fins de teste, o  $p$ -valor ( $pv$ ) é calculado como

$$pv = 2 \min[\phi(Z), 1 - \phi(Z)],$$

onde,  $\min(., .)$  representa o mínimo dos dois argumentos e  $\phi(.)$  é a função de distribuição acumulada da normal padrão. A hipótese nula é rejeitada quando o valor da estatística padronizada de teste  $Z$  é menor que o nível de significância escolhido. Portanto, diz-se que a tendência é decrescente se  $Z$  for negativo e crescente se  $Z$  for positivo, e o  $pv$  for menor que  $\alpha$ . Será usado  $\alpha = 0,05$ . O teste de Mann-Kendall tem sido amplamente usado para quantificar as tendências em séries de tempo hidro-meteorológicas, conforme [Nashwan e Shahid \(2019\)](#).

## 4.5 Teste de Sen's slope

O teste Sen's slope ([SEN, 1968](#)) é usado para estimar a taxa de mudança:

$$\Delta = \text{mediana}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), i < j$$

onde  $x_j$  e  $x_i$  são, respectivamente, os valores dos dados em tempos  $j$  e  $i$ , onde  $i < j$ . O sinal  $\Delta$  representa a direção da mudança e seu valor indica a inclinação de mudança. A inclinação estimada pelo estimador de inclinação de Sen é uma estimativa robusta da magnitude da tendência ([YUE et al., 2002](#)).

## 4.6 Teste Wilcoxon–Mann–Whitney

O teste Wilcoxon–Mann–Whitney ou Mann-Whitney ([MANN; WHITNEY, 1947](#)), é uma modificação do teste de Wilcoxon ([WILCOXON, 1945](#)), sendo um teste de hipótese não paramétrico que verifica se duas amostras independentes contendo elementos  $n_1$  e  $n_2$  correspondem ou não à mesma distribuição. A hipótese de normalidade não é requerida. A estatística  $W$  do teste Wilcoxon–Mann–Whitney é calculada como a seguir: as  $n_1 + n_2$  observações das duas amostras independentes são combinadas em um único conjunto de dados. Os elementos desse conjunto de dados são ordenados do menor ao maior. Se houver empates no conjunto de dados combinado, as classificações para as observações em um empate são consideradas a média das classificações para essas observações. A estatística

$W$  de Wilcoxon é calculada como a soma das classificações da amostra de menor tamanho. Sob a hipótese nula, a esperança e a variância de  $W$  são respectivamente

$$\mu_W = \frac{n_1(n_1 + n_2 + 1)}{2} \quad \text{e} \quad \sigma_W^2 = \frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}. \quad (4.10)$$

Para  $n_1$  e  $n_2$  para maior que 10, a distribuição da estatística  $T = (W - \mu_W)/\sigma_W$  pode ser aproximada para uma distribuição normal com média igual a zero e variância igual a 1. Em caso de empates a variância precisa ser modificada para a aproximação gaussiana. Seja  $n_t$  o número de grupos empatados e  $t_k$  o número de empates no grupo  $k$ , então

$$\sigma_W^2 = \frac{n_1 n_2}{12} \left[ n_1 + n_2 + 1 - \sum_{k=1}^{t_k} (t_k^3 - t_k) / ((n_1 + n_2)(n_1 + n_2 - 1)) \right]. \quad (4.11)$$

Sob essa hipótese o  $p$ -valor é calculado da seguinte forma

$$pv = 2 \left[ 1 - \phi \left( \frac{|w - \mu_W|}{\sigma_W} \right) \right], \quad (4.12)$$

onde  $w$  denota a estatística de soma da classificação na amostra, e  $\phi(\cdot)$  é a função de distribuição acumulada da distribuição normal padrão. Para o nível de significância  $\alpha \in (0, 1)$ , a hipótese nula é rejeitada sempre que  $pv < \alpha$ .

## 4.7 Inverse Distance Weighting - IDW

O Inverse Distance Weighting (IDW) é um método determinístico para interpolação de dados proposto por [Shepard \(1968\)](#), assumindo que quanto mais distante a posição de uma observação da posição da estimativa, menor sua influência no valor interpolado. Denotando por  $r \equiv (x, y)$  a posição de um ponto arbitrário dentro da região a ser interpolada, a fórmula IDW é dada por

$$F(r) = \sum_{k=1}^N W(r_k) f(r_k) \quad (4.13)$$

onde  $F(r)$  é o valor interpolado na posição  $r$ ;  $N$  é o número de observações;  $f(r_k)$  é o valor observado da  $i$ -ésima estação na posição  $r_k \equiv (x_k, y_k)$ ; e  $W(r_k)$  é o peso dessa estação dado por

$$W(r_k) = \frac{d_k(r)^{-p}}{\sum_{k=1}^N d_k(r)^{-p}} \quad (4.14)$$

onde  $d_k(r) \equiv \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}$  é a distância euclidiana entre os pontos  $r$  e  $r_k$ ; e  $p$  é o único parâmetro do modelo que determina a taxa de decaimento da influência das observações com a distância. A escolha do parâmetro de peso  $p$  pode afetar significativamente o resultado de interpolação. O IDW é um método interpolador determinístico (exato), caracterizado por a geração dos chamados bull's eyes decorrentes da divergência de peso na [Equação 4.14](#) quando  $r \rightarrow r_k$  e aparecendo na forma de círculos concêntricos ao redor dos pontos de amostragem ([BAKKALI; AMRANI, 2008](#)). Este efeito indesejável pode ser reduzido pela introdução de um parâmetro de suavização ([TOMCZAK, 1998](#)).

## 4.8 Métodos computacionais utilizados

Todos os cálculos foram realizados na linguagem R ([TEAM, 2019](#)) com a utilização de funções nativas e pacotes. A análise de dados foi realizada por meio de funções nativas do software R e dos pacotes **dplyr** ([WICKHAM et al., 2015](#)), **plyr** ([WICKHAM, 2020](#)) e **tidyverse** ([WICKHAM, 2017](#)). A visualização de dados e produção de mapas gerada com os pacotes **geobr** ([PEREIRA; GONCALVES, 2021](#)), **gridExtra** ([AUGUIE; ANTONOV, 2017](#)), **ggplot2** ([WICKHAM et al., 2016](#)), **ggpubr** ([KASSAMBARA, 2020](#)), **maptools** ([BIVAND et al., 2018](#)) e **sf** ([PEBESMA et al., 2022](#)). O cálculo do SPI foi realizado por meio de uma função desenvolvida no próprio software R. Os teste estatístico de tendência Mann-Kendall e de magnitude da tendência Sen's slope foram obtidos do pacote **trend** ([THORSTEN, 2018](#)), enquanto que a função do teste Wilcoxon-Mann-Whitney faz parte do pacote de funções básicas **stats** ([TEAM et al., 2018](#)). A interpolação espacial com IDW foi gerada com os pacotes **raster** ([HIJMANS; ETTEN, 2016](#)), **rgdal** ([BIVAND et al., 2019](#)), **rgeos** ([BIVAND; RUNDEL; PEBESMA, 2017](#)) e o **gstat** ([PEBESMA; GRAELER, 2011](#)).

## 5 Resultados

Este capítulo traz os resultados da análise das características de seca no estado de Pernambuco com base no índice de precipitação padronizado (SPI), calculado em escala sazonal (SPI-3) e anual (SPI-12), para os dados de precipitação de 133 estações pluviométricas. As características de seca aqui investigadas, foram: frequência, área afetada e intensidade. Para cada série de dados de precipitação em análise, foram então consideradas as escalas temporais de 3 meses (sazonal) e de 12 meses (anual) para o cálculo de SPI-3 e SPI-12, respectivamente.

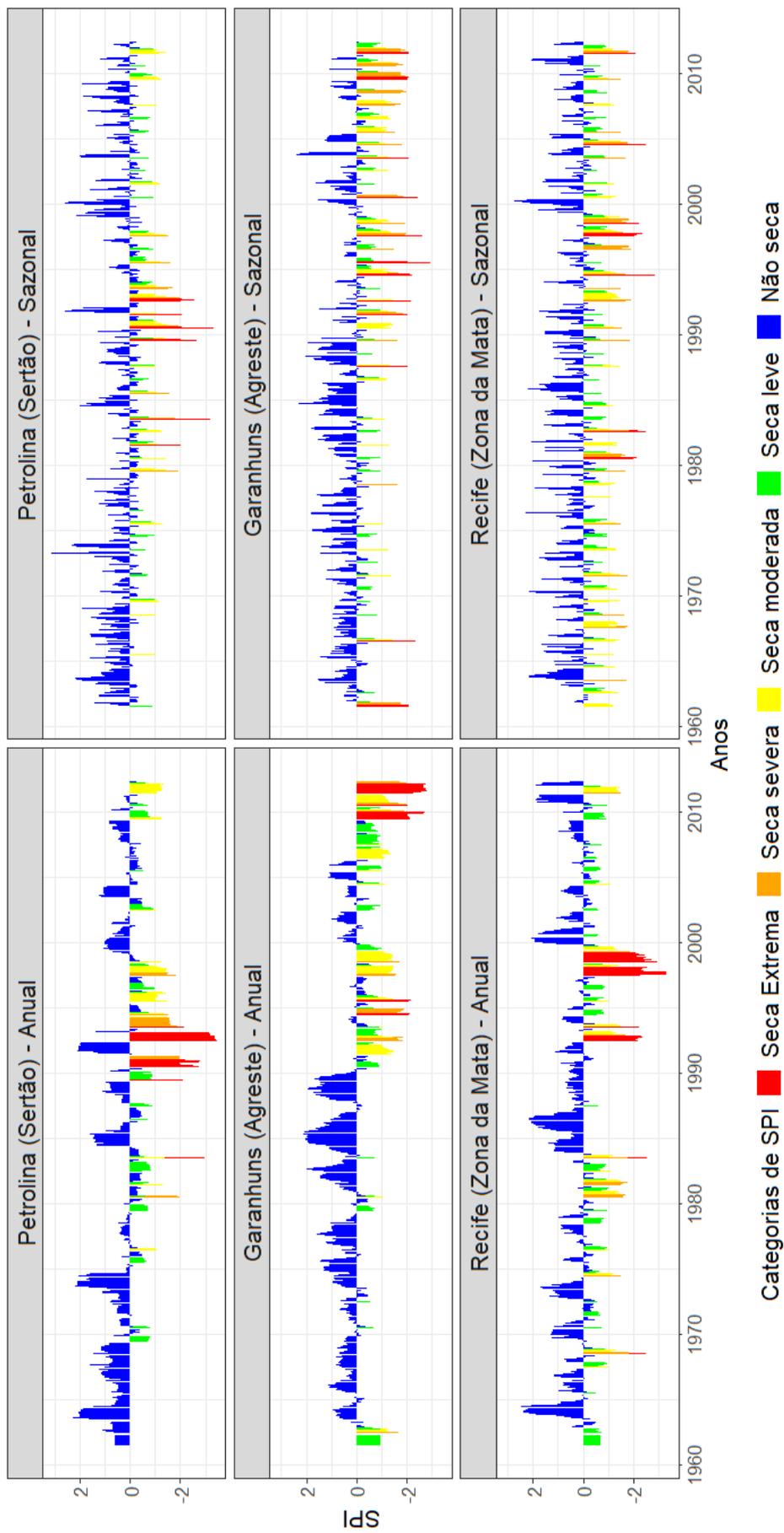
São também apresentados neste capítulo os resultados dos testes estatísticos de Mann-Kendall e Sen, utilizados para verificar a existência de tendência e magnitude nas séries temporais de SPI e das características de seca, bem como o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, para detectar possíveis diferenças estatísticas entre as regiões Sertão, Agreste e Zona da Mata quanto às características de seca (frequência, área afetada e intensidade) para cada categoria (leve, moderada, severa, extrema).

### 5.1 Séries temporais dos valores de SPI

Uma vez obtidas as séries temporais de SPI-3 e SPI-12 para as 133 estações em análise, três foram escolhidas (para descrição dos resultados a título de comparação) como representativas de cada região do estado: i) Petrolina, no Sertão; ii) Garanhuns, no Agreste; e Recife, na Zona da Mata.

As séries temporais obtidas para SPI-3 (escala sazonal) e SPI-12 (escala anual) das estações representativas Petrolina (Sertão), Garanhuns (Agreste) e Recife (Zona da Mata) são apresentadas na [Figura 3](#). Da comparação entre os valores de SPI-3 das estações representativas de cada região se observa, por exemplo, que na estação do município de Petrolina, no Sertão pernambucano, os períodos secos mais severos e contínuos ocorreram durante as décadas de 1980 e 1990, principalmente durante os períodos de 1981-1983, 1990-1991, 1993-1994 e no ano de 1996. A estação representativa de Garanhuns, no Agreste, apresentou três anos secos (1995, 1998 e 2012), enquanto a estação representativa da Zona da Mata, em Recife, apresentou apenas um ano de seca, em 1993.

Figura 3 – Séries temporais dos valores de SPI nas escalas sazonal (SPI-3) e anual (SPI-12) para estações meteorológicas representativas das regiões Sertão (Petrolina), Agreste (Garanhuns) e Zona da Mata (Recife).



Fonte: Elaboração própria

Quanto aos valores de SPI-12, a estação representativa da Zona da Mata, em Recife, foi a que apresentou maior incidência de valores negativos durante período observado. Os períodos mais longos com valores de SPI-12 apresentando alguma categoria de seca foram observados na estação de Petrolina, no Sertão, e Garanhuns, no Agreste.

Observa-se, ainda, que a estação de Garanhuns foi a que exibiu maior escassez de chuva em períodos contínuos – durante as décadas de 1990 (entre 1992 e 1993, em 1996, entre 1998 e 1999) e nos anos 2000 (de 2007 a 2012). A estação de Petrolina, por sua vez, apresentou em escala anual mais anos secos – na década de 1980 (entre 1981 e 1984, e no ano de 1987) e na década de 1990 (em 1991, 1994, e de 1996 a 1999) – que a estação de Garanhuns (em 11 dos anos do período analisado). Já a estação de Recife, na Zona da Mata, mostrou períodos de seca contínua mais severos na metade da década de 1990 e anos secos em 1975, 1982, e de 1998 a 1999.

A [Figura 4](#) apresenta as tendências das séries de SPI-3 e SPI-12, onde triângulos que apontam para cima indicam tendência positiva (cor azul), os que apontam para baixo, tendência negativa (cor vermelha). Triângulos preenchidos referem-se a tendências significativas e os círculos vazados informam que a séries não apresentaram tendência significativa. Já a [Figura 5](#) exibe a magnitude das tendências das séries de SPI nas escalas anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3).

Figura 4 – Tendência e significância estatística das séries de SPI nas escalas pluviométricas distribuídas no território pernambucano nas escalas sazonal (SPI-3) e anual (SPI-12).

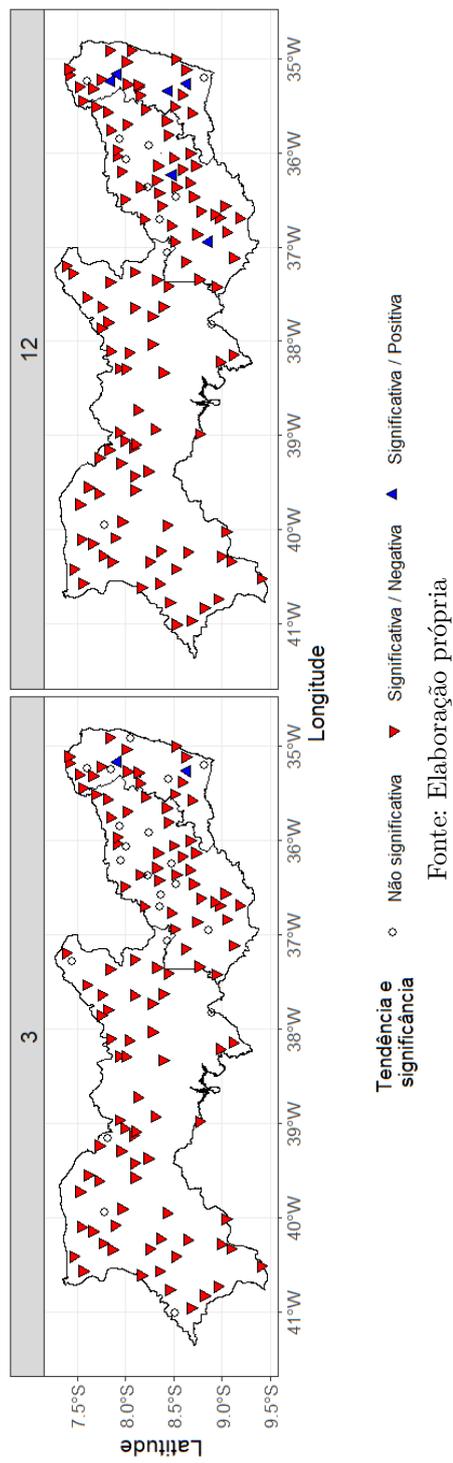
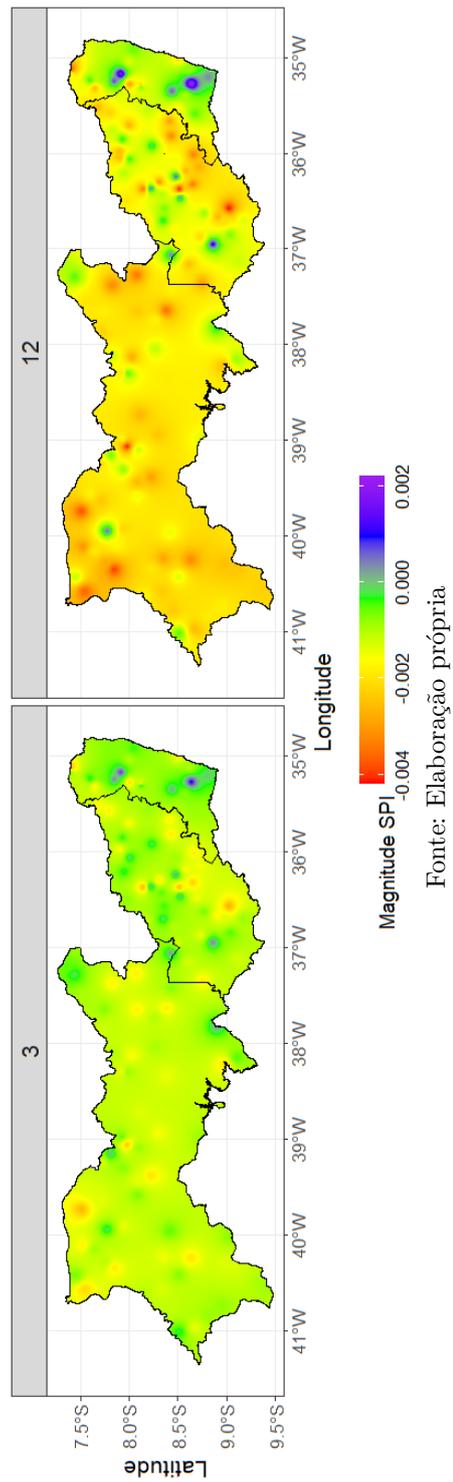


Figura 5 – Magnitude das tendências das séries de SPI nas escalas sazonal (SPI-3) e anual (SPI-12).



A maioria séries de SPI, tanto na escala sazonal como na escala anual, apresentaram, em sua maioria, tendência negativa significativa indicando que escassez de precipitação e períodos mais secos ao longo do período de estudo (Figura 4). As magnitudes das tendências apresentaram na maior parte do território pernambucano valores negativos, porém mais expressivos no Sertão e sudeste do Agreste, enquanto que os valores das magnitudes de tendência na Zona da Mata foram positivos em pontos no sul e no norte. (Figura 5)

Com base nos valores de SPI-3 e SPI-12 obtidos para as 133 estações meteorológicas consideradas, foram então obtidas as características de seca de Pernambuco para o período em análise (entre 1962 e 2012). Tais resultados são apresentados e discutidos na seção a seguir.

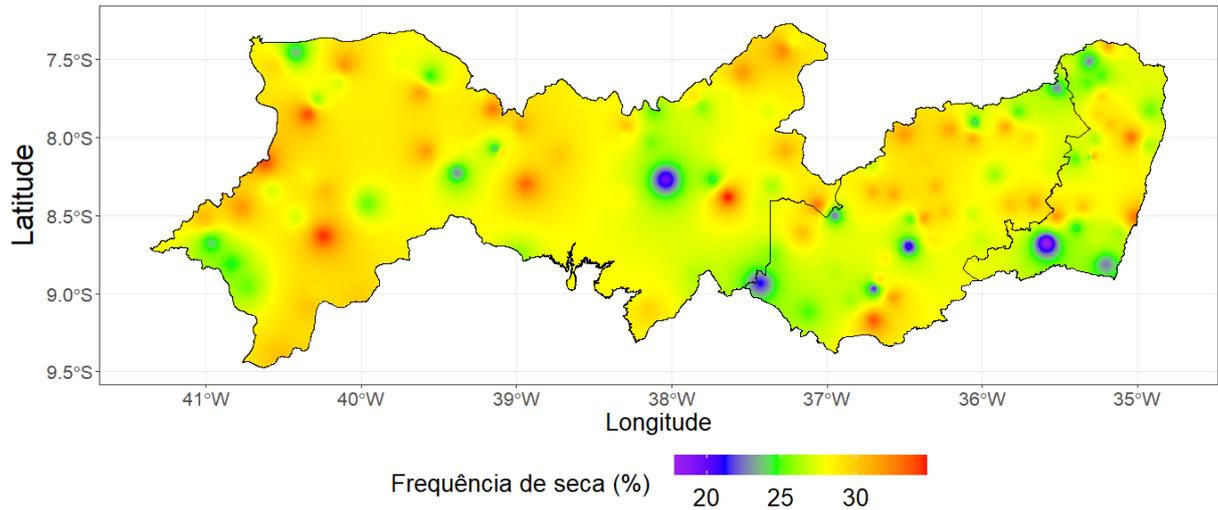
## 5.2 Análise das características de seca em Pernambuco

### 5.2.1 Frequência de seca

#### 5.2.1.1 Escala anual – Indicador SPI-12

A distribuição espacial da frequência anual de seca no estado de Pernambuco durante o período de 1962 a 2012 é apresentada na Figura 6. O resultado mostra uma distribuição uniforme ao longo do território pernambucano, exceto em alguns pontos isolados no leste do Sertão e sul da Zona da Mata. Em média, o estado apresentou alguma categoria de seca (ou seca total) com frequência de 28,00%, e variação de 17,80 a 34,77%. Analisando por região, observa-se que o Sertão exibiu a maior frequência média do estado, com 28,45%, e variação entre 19,46% e 34,77%. No Agreste, a frequência de seca variou entre 20,29% e 33,61%, com média de 27,80%. A Zona da Mata, por sua vez, foi a região que apresentou a menor frequência de seca. Embora seu percentual médio de seca (27,15%) seja bem próximo ao do Agreste, exibiu frequência mínima de 17,80% e máxima de 32,94%.

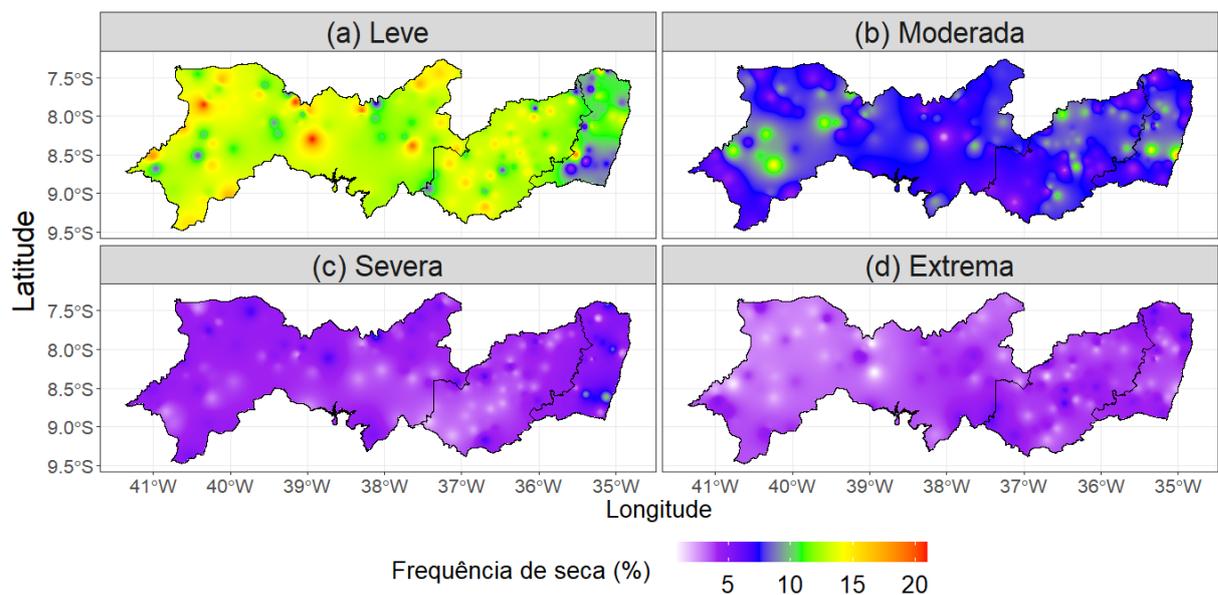
Figura 6 – Distribuição espacial da frequência de seca total anual no estado de Pernambuco entre 1962 e 2012.



Fonte: Elaboração própria

Agrupando os valores obtidos de SPI-12 por categoria de seca, foram então calculadas os percentuais de ocorrência de seca do tipo leve, moderada, severa e extrema. Os resultados são apresentados na [Figura 7](#), que traz a distribuição espacial da frequência de seca em cada uma de suas categorias: (a) leve, (b) moderada, (c) severa e (d) extrema. Dela, observa-se que, à medida que a categoria de seca varia de leve ([Figura 7a](#)) para extrema ([Figura 7d](#)), menores são as frequência de seca em Pernambuco.

Figura 7 – Distribuição espacial da frequência das categorias de seca em Pernambuco



Fonte: Elaboração própria

Analisando a distribuição espacial da frequência de seca anual (Figura 7) em cada categoria (leve, moderada, severa e extrema) ao longo da extensão territorial do estado de Pernambuco, bem como em suas principais regiões (Sertão, Agreste e Zona da Mata), obtiveram-se os seguintes resultados:

**a) Seca leve (Figura 7a):** no estado como um todo, variaram entre 3,49% e 20,96%, com média de 12,54%; no Sertão, variou de 7,15% a 20,96%, com uma média de 13,40%; no Agreste, variou de 6,82% a 16,30%, com média de 12,83%; e na Zona da Mata, apresentou variação entre 3,49% e 18,30%, com média de 9,70%.

**b) Seca moderada (Figura 7b):** no estado, variou entre 2,33% e 16,63%, com média de 7,58%. O Sertão apresentou valor mínimo de 2,32% e máximo de 14,14% (com média de 7,61%), enquanto no Agreste a variação se deu entre 3,32% e 12,14% (com média de 7,33%). A Zona da Mata, por sua vez, variou de 3,49% a 16,63% e resultou num valor médio de 7,91%. Na maior parte do território pernambucano, conforme indica a Figura 7b, a frequência dessa categoria de seca apresentou valores baixos, com exceção do oeste do Sertão, alguns pontos no Agreste e no sul da Zona da Mata.

**c) Seca severa (Figura 7c):** a ocorrência desse tipo de seca no estado de Pernambuco apresentou frequência com variação entre 1,66% e 10,15%, e média de 4,26%. Na região Sertão, variou de 2,33% a 7,97%, com média de 4,24%; no Agreste, a variação se deu entre 1,66% e 6,49%, exibindo média de 3,64%; e na Zona da Mata, entre 1,83% e 10,14%, com valor médio de 5,50%. Na figura Figura 7c é possível visualizar a baixa frequência de seca severa em comparação com as secas leve (Figura 7a) e moderada (Figura 7b). Observa-se, ainda, que houve seca severa com maior frequência no sul da Zona da Mata. Além disso, é possível identificar que esse tipo de seca foi bem menos frequente ao sul do Agreste, próximo à divisa com o Sertão, e até mesmo ausente em vários pontos do Agreste.

**d) Seca extrema (Figura 7d):** a frequência de seca extrema no estado apresentou valores ainda menores que das demais categorias. A variação percentual da ocorrência de seca extrema ficou entre 0,67% e 6,82%, com 3,62% de valor médio. Variou entre 0,67% e 5,5% (média de 3,21%) no Sertão, entre 1,5% e 6,82% (média em torno de 4%) no Agreste, e entre 2% e 6,48% (com média de 4,04%) na Zona da Mata. Assim como a categoria de seca severa, a seca extrema também aconteceu com baixíssima frequência. Embora baixa, sua maior concentração se deu em alguns pontos do norte da Zona da Mata e sul do Agreste, na divisa com o Sertão, conforme sugere a Figura 7d.

Com o objetivo de viabilizar a rápida comparação entre as frequências de seca anual em suas quatro categorias (leve, moderada, severa e extrema) no estado de Pernambuco (em sua totalidade), bem como por divisão de suas regiões (Sertão, Agreste e Zona da Mata), os valores médios das frequências foram sumarizados na Tabela 4.

Tabela 4 – Média e desvio padrão (entre parênteses) das frequências de seca anual nas categorias leve, moderada, severa e extrema em Pernambuco e regiões Sertão, Agreste e Zona da Mata entre 1962 e 2012.

Região	Categoria de seca			
	Leve	Moderada	Severa	Extrema
Pernambuco	12,53% (3,27%)	7,57% (2,43%)	4,26% (1,55%)	3,63% (1,24%)
Sertão	13,39% (3,09%)	7,61% (2,32%)	4,23% (1,19%)	3,21% (1,09%)
Agreste	12,83% (2,36%)	7,33% (2,22%)	3,64% (1,20%)	3,99% (1,21%)
Zona da Mata	9,69% (3,71%)	7,91% (3,09%)	5,49% (2,19%)	4,04% (1,36%)

Fonte: Elaboração própria

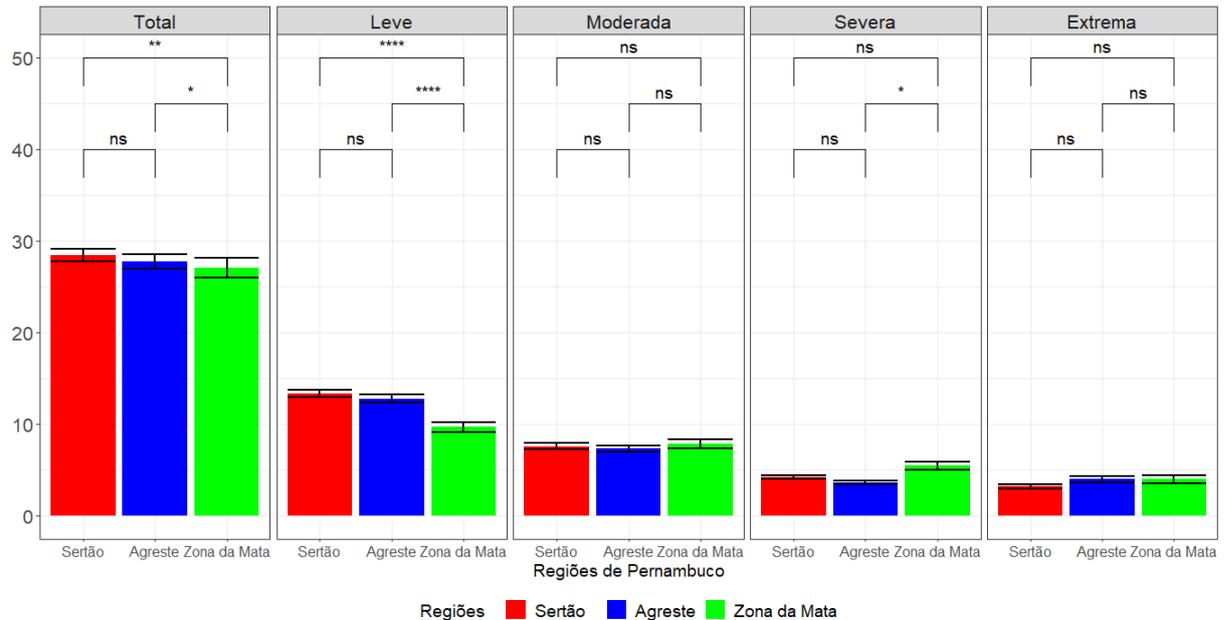
Observa-se que, à medida que as secas tornam-se mais graves menor é a sua frequência e variabilidade. O Sertão apresentou a maior média de frequência de seca, mas a região da Zona da Mata apresentou a maior variabilidade em todas as categorias de seca. Além disso, a Zona da Mata apresentou as maiores frequências para as secas moderada, severa e extrema.

#### 5.2.1.1.1 Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney

Para investigar se há diferença estatística entre as regiões Sertão, Agreste e Zona da Mata do estado de Pernambuco quanto às frequências de seca anual, aplicou-se o teste estatístico de Wilcoxon-Mann-Whitney à distribuição espacial da frequência de seca de forma geral – para uma categoria qualquer (seca total – [Figura 6](#)), e às distribuições espaciais de frequências por classificação do tipo de seca – leve, moderada, severa e extrema ([Figura 7](#)). Os resultados do teste são exibidos na [Figura 8](#).

Os resultados do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney ([Figura 8](#)) quanto à ocorrência de seca anual em uma categoria qualquer (seca total) apontam para uma diferença estatística entre Sertão e Zona da Mata ao nível de significância de 1%, e entre Agreste e Zona da Mata ao nível de 5%. Não se observou, entretanto, diferença significativa entre as regiões Sertão e Agreste. Ainda de acordo com a [Figura 8](#), houve diferença estatística significativa ao nível de 0,01% entre Sertão e Zona da Mata, Agreste e Zona da Mata quanto à frequência de seca leve; e ao nível de 5% entre Agreste e Zona da Mata quanto à ocorrência de seca severa. Por outro lado, as distribuições espaciais das frequências de seca moderada ([Figura 7b](#)) e extrema ([Figura 7d](#)) não apresentaram diferença estatística significativa entre as sub-regiões de Pernambuco. Isso significa que, em termos da ocorrência de seca do tipo moderada ou extrema, as sub-regiões do estado se mostraram estatisticamente indistinguíveis entre 1962 e 2012.

Figura 8 – Resultados do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney para a detecção de diferenças estatísticas entre as sub-regiões de Pernambuco quanto às frequências de seca anual (em %). Os símbolos "\*", "\*\*", "\*\*\*" e "\*\*\*\*" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa.



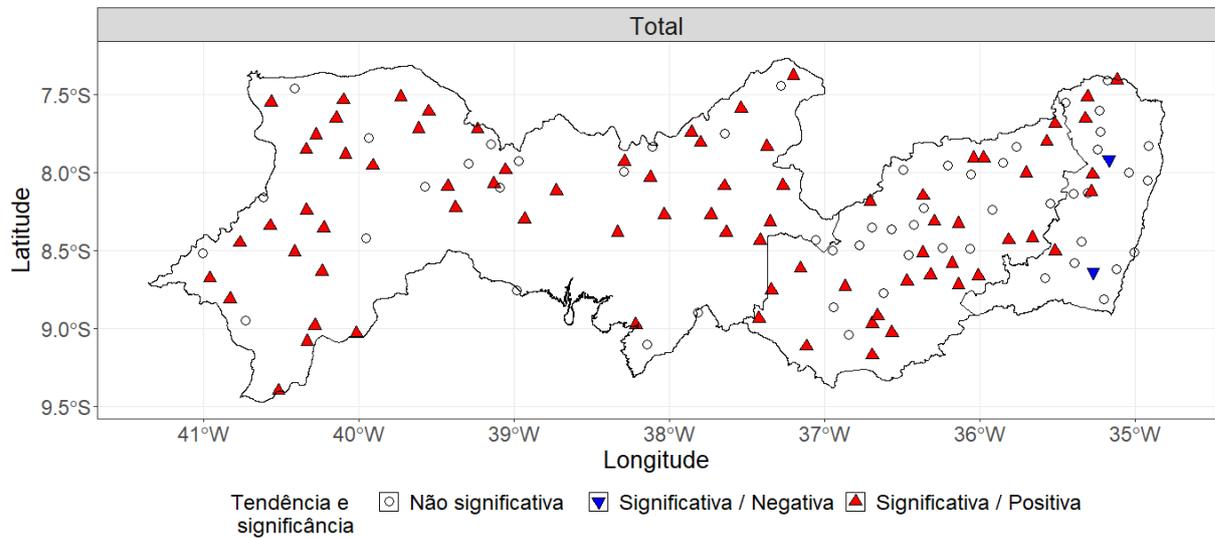
Fonte: Elaboração própria

#### 5.2.1.1.2 Teste de tendência de Mann-Kendall e Sen's *slope*

Uma vez obtidas as frequências anuais de seca para algum tipo de seca (seca total) e considerando a classificação por categoria (leve, moderada, severa e extrema), investigou-se, para cada região do estado (Sertão, Agreste e Zona da Mata), a existência de possíveis tendências de aumento ou diminuição da ocorrência de seca. A partir dos testes, calcularam-se as proporções de estações com tendência significativa e suas magnitudes.

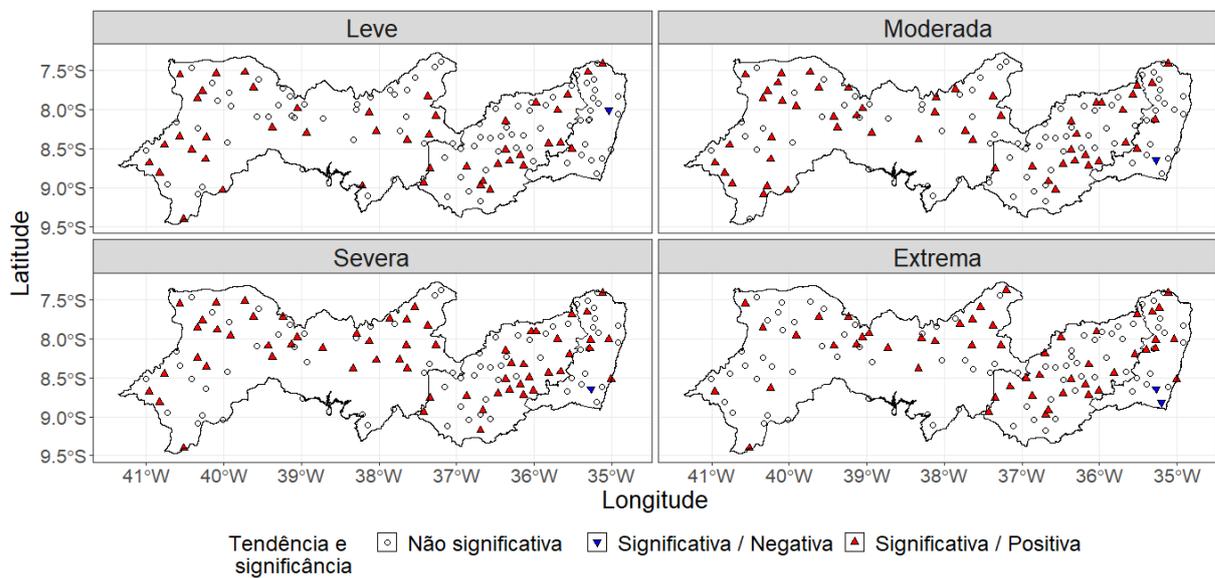
A Figura 9 ilustra os resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para a frequência anual de seca total, enquanto que a Figura 10 apresenta os resultados obtidos por categoria de seca. Os triângulos que apontam para cima indicam tendência positiva (cor vermelha), os que apontam para baixo, tendência negativa (cor azul). Triângulos preenchidos referem-se a tendências significativas, enquanto que círculos vazados informam sobre que não há presença de tendência significativa.

Figura 9 – Tendência e significância estatística da frequência de seca total anual.



Fonte: Elaboração própria

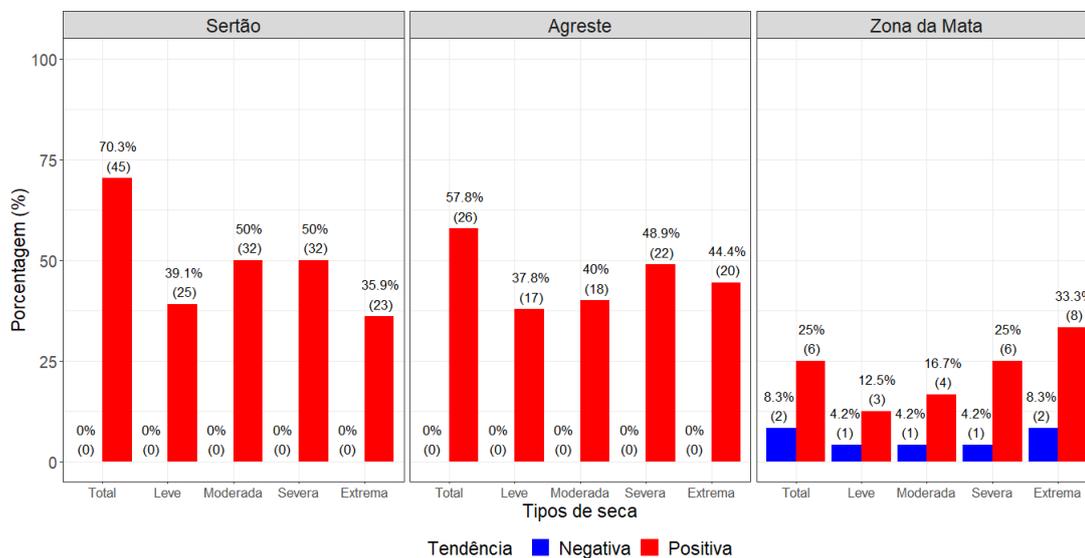
Figura 10 – Tendência e significância estatística da frequência anual de seca por categoria (leve, moderada, severa e extrema).



Fonte: Elaboração própria

A partir dos resultados obtidos para o teste de Mann-Kendall, calculou-se a proporção de estações pluviométricas com tendência significativa da ocorrência anual de seca (total e por categoria). Os resultados são apresentados na [Figura 11](#), em que a cor vermelha indica que houve tendência positiva (aumento da frequência de seca) e a azul, tendência negativa (diminuição da frequência de seca).

Figura 11 – Proporções das estações pluviométricas com tendência significativa para as frequências anuais de seca total e por categoria. A cor azul indica tendência negativa, a vermelha, positiva



Fonte: Elaboração própria.

Em termos de seca total, os resultados apresentados na [Figura 11](#) indicam que 70,31% das 64 estações meteorológicas espalhadas pelo Sertão exibiram tendência significativa de aumento da ocorrência de seca anual. O Agreste apareceu em segundo lugar, com pouco mais de 57,78% de suas 45 estações apresentando tendência positiva para a ocorrência de seca em geral. A Zona da Mata, por sua vez, foi a única região que apresentou frequências de seca com tendência negativa, embora com um baixo percentual (8,33% de suas 24 estações para seca em geral - total). [Brito et al. \(2018\)](#) aponta o oeste de Pernambuco, onde localiza-se o Sertão pernambucano, como uma das regiões que mais foram afetadas por secas no Nordeste.

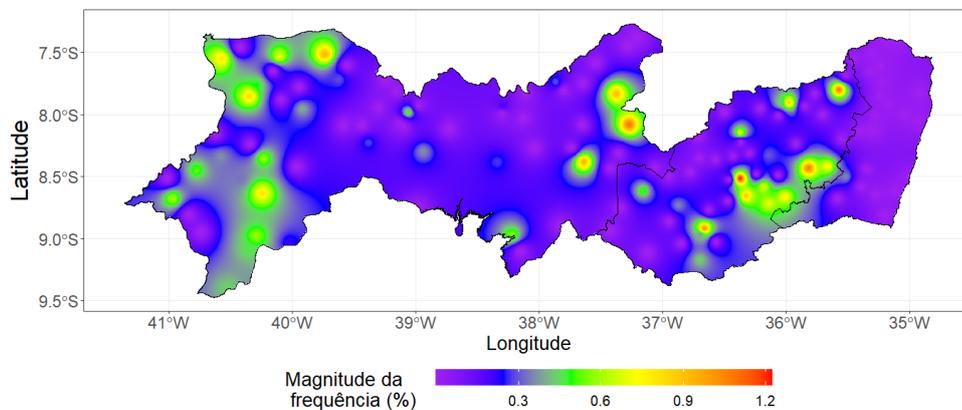
Considerando os resultados do teste por categoria, nota-se da [Figura 11](#) que o Sertão foi a região que apresentou as maiores proporções de estações pluviométricas com tendência positiva (cor vermelha - aumento da ocorrência de seca) em todas as categorias. Observa-se, por exemplo, que, das tendências positivas, 50% das estações foram significativa para a categoria moderada e, em igual número, para a severa. O Agreste apresentou proporção de estações com tendência significativa maior para a seca do tipo severa (48,89% das estações que apresentaram frequência de seca com tendência positiva). A Zona da Mata foi a única das regiões que apresentou frequências de seca com tendência negativa (cor azul - diminuição da ocorrência de seca) para todas as categorias. Além disso, a proporção de estações com tendência positiva significativa nesta região foi maior conforme o aumento do nível categórico de seca (de leve, com 12,5%, a extrema, com 33,33%). Observa-se, ainda,

que na Zona da Mata (e somente nela), a proporção de estações com tendência positiva significativa para a seca do tipo extrema foi ainda maior que para seca total (25%).

Analisando para o estado de Pernambuco como um todo, a proporção de estações com tendência significativa foi de 59,40% (57,89% positivas e 1,50% negativas) para a seca em geral (seca total). Por categoria de seca, foram 34,59% (33,83% positivas e 0,75% negativas) para o tipo leve, 41,35% (40,60% positivas e 0,75% negativas) para o tipo moderada, 46,61% (45,11% positivas e 1,50% negativas) para a seca severa, e 39,85% (38,35% positivas e 1,50% negativas) para a seca extrema.

Para determinar a magnitude das tendências da ocorrência de seca anual, aplicou-se o teste de Sen's *slope* às séries de frequência de seca por categoria e total. Por categoria, entretanto, não houve nenhuma área em destaque; as magnitudes chegaram a, no máximo, 0,004 em alguns pontos isolados. A distribuição espacial da magnitude das tendências (de aumento ou diminuição) das frequências de seca em geral (seca total) é apresentada na [Figura 12](#). Observa-se que a magnitude das tendências é expressiva em áreas ao oeste e leste do Sertão, bem como no sudeste do Agreste.

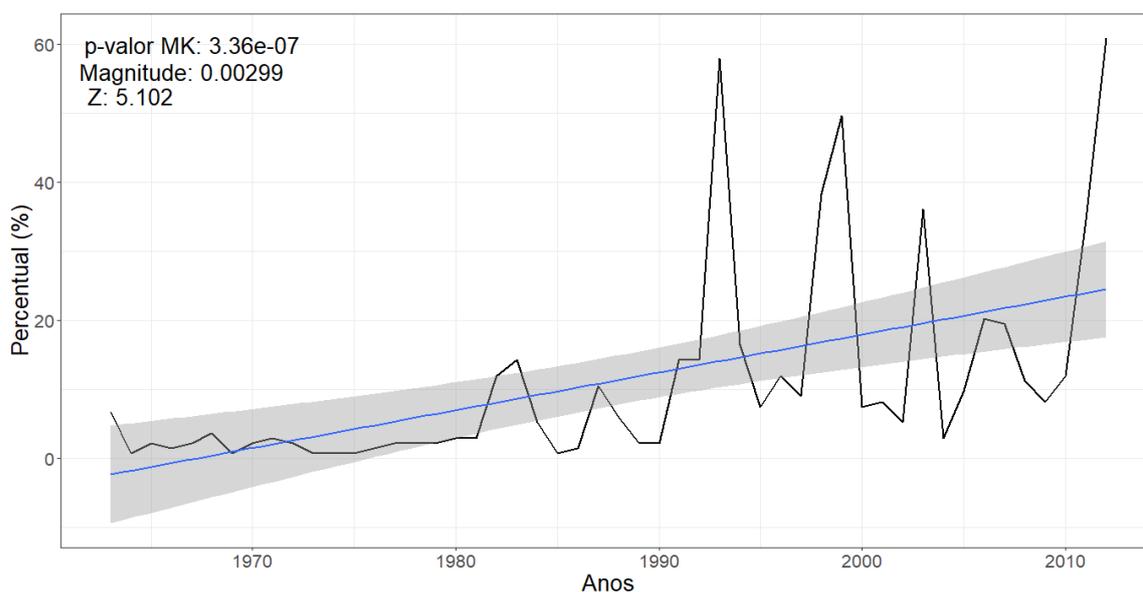
Figura 12 – Distribuição espacial da magnitude das tendências de frequência anual de seca total.



Fonte: Elaboração própria

A figura [Figura 13](#) mostra a proporção de estações que apresentaram frequência de seca máxima (igual a 100%) ao longo dos anos, em Pernambuco. Observa-se que, a partir dos da década de 1990, há a ocorrência de expressivos picos de proporção de estações com frequência máxima, com destaque para os anos de 1993, 1998-1999, 2003 e 2011-2012. O ano de 1993 está inserido em um período de seca longa ([CARMO; LIMA, 2020](#)), já 1998 e 1999, compreendem anos de seca severa de *El Niño* ([JONES; MURPHY, 2009](#)). Os anos de 2003 e 2011-2012 coincidem com eventos de *El Niño* moderado ([SOBRAL et al., 2019](#)) e *La Niña* ([MARENGO et al., 2017](#)), respectivamente.

Figura 13 – Série de percentual de estações com frequência máxima para seca total.



Fonte: Elaboração própria

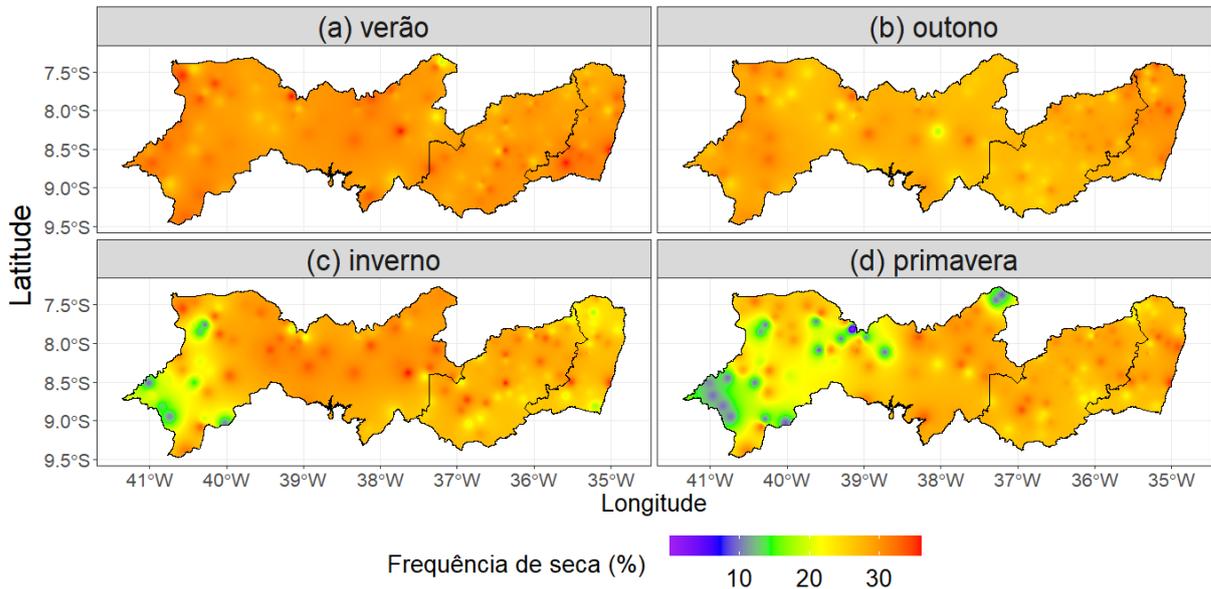
#### 5.2.1.2 Escala sazonal – Indicador SPI-3

As distribuições espaciais da frequência sazonal de seca, total e por categoria, para cada estação do ano em Pernambuco, são apresentadas nesta seção. A [Figura 14](#) mostra os resultados obtidos para a frequência sazonal de seca em qualquer das categorias (seca total).

A ocorrência de seca durante o verão ([Figura 14a](#)) exibiu frequência percentual entre 24,50% e 35,76%, com média de 29,93%. A distribuição da frequência mostrou-se mais alta em pontos ao noroeste e centro-leste do Sertão, e ao sul da Zona da Mata. No outono ([Figura 14b](#)), a variação se deu entre 24,18% e 34,64%, resultando numa média de 29,52%. Para essa estação do ano, a frequência de seca total apresentou maiores valores em áreas ao oeste do Sertão e norte do Agreste, na divisa com a Zona da Mata, e no centro da Zona da Mata. No inverno ([Figura 14c](#)), houve seca com frequência entre 17,64% e 34,64%, e média de 25,29%. As maiores ocorrências de seca durante essa estação foram observadas em áreas localizadas ao centro e ao leste do Sertão pernambucano. Por outro lado, é possível observar valores mais baixos da distribuição espacial da frequência total no oeste do Sertão e em áreas ao norte e ao sul da Zona da Mata. Durante a primavera ([Figura 14d](#)), a frequência de seca variou entre 22,22% e 35,29%, e exibiu média de 27,53%. Valores menores da frequência de seca total mostram-se ainda mais visíveis no oeste do Sertão, enquanto valores mais altos podem ser observados ao leste do Sertão e norte da Zona da Mata.

Considerando as frequências sazonais de seca por categoria, obtiveram-se os resul-

Figura 14 – Distribuição espacial da frequência sazonal de seca total para cada estação do ano referente ao período de 1962 a 2012.



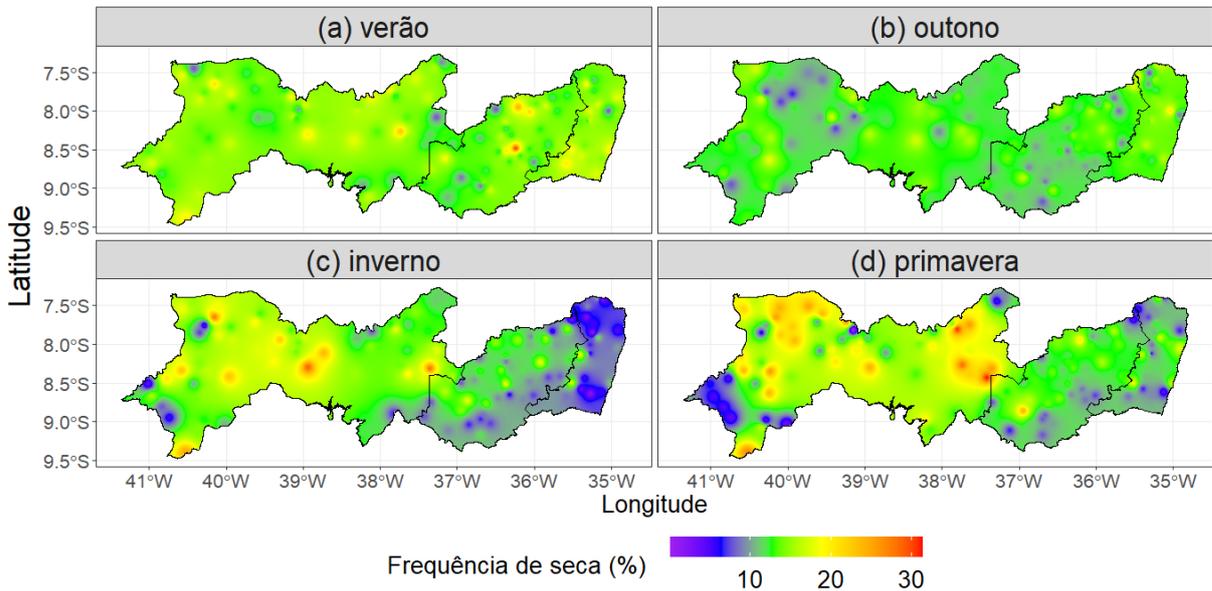
Fonte: Elaboração própria

tados apresentados a seguir.

**i) Seca leve (Figura 15):** a distribuição espacial da frequência sazonal de seca considerada leve para cada estação mostrou que, durante o verão (Figura 15a), esse tipo de seca ocorreu com maior frequência em pontos localizados ao centro e ao norte do Agreste, bem como ao sul da Zona da Mata. Pontos de menor frequência, entretanto, podem ser observados nas proximidades da divisa entre Sertão e Agreste, e no oeste do Sertão. No outono (Figura 15b), os valores mais baixos de frequência são encontrados em alguns pontos ao oeste do Sertão, e ao sul e norte do Agreste pernambucano. Os maiores contrastes de frequência sazonal da seca leve são, entretanto, observados nas distribuições espaciais obtidas para o inverno (Figura 15c) e a primavera (Figura 15d).

Considerando ainda a distribuição de frequência obtida para o inverno (Figura 15c), vê-se que a seca leve ocorreu com maior frequência no Sertão, ao centro e ao oeste (onde ocorrem os menores níveis de precipitação nesse período), e com menor frequência ao longo de toda Zona da Mata, seguindo ao sul do Agreste (onde ocorrem os maiores níveis de precipitação média do período). A primavera (Figura 15d), por sua vez, exibiu os valores mais altos de frequência de seca leve no Sertão, em áreas extensas tanto ao norte quanto ao oeste. No extremo oeste do Sertão, entretanto, observam-se também as maiores áreas do estado com baixa frequência de seca leve. Valores menores de frequência podem ainda ser observados ao sul do Agreste, bem como ao norte e sul da Zona da Mata.

Figura 15 – Distribuição espacial da frequência sazonal de seca leve para cada estação do ano referente ao período de 1962 a 2012.

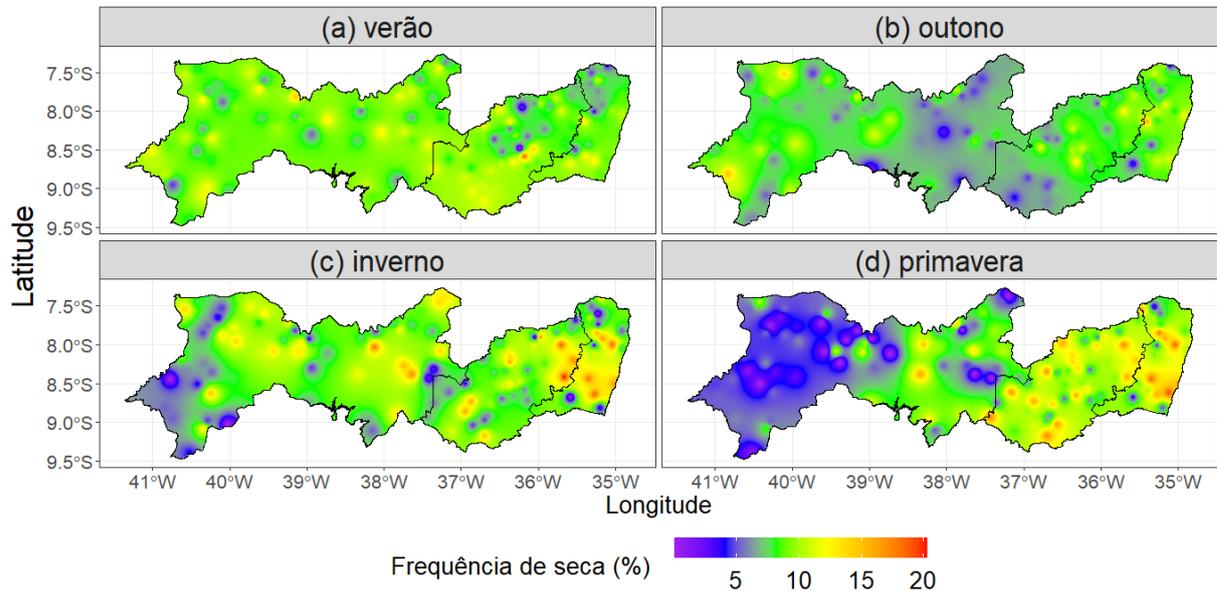


Fonte: Elaboração própria

A análise quantitativa apontou para as seguintes variações de frequência de seca leve em Pernambuco durante o período de 1962 a 2012: (a) mínima de 7,94% e máxima de 30,46% (com média de 14,45%) no verão; (b) entre 6,53% e 20,26% (com média de 12,53%) no outono; (c) de 1,31% a 28,75% (com média de 12,32%) no inverno; e de 0 a 31,37% (com média de 13,78%) na primavera.

**ii) Seca moderada (Figura 16):** a distribuição espacial da frequência de seca moderada obtida para os meses de verão (Figura 16a) revelou que houve maior ocorrência desse tipo de seca em áreas ao oeste e leste do Sertão, bem como ao sul do Agreste e Zona da Mata. As menores frequências, entretanto, foram identificadas ao norte do Agreste e da Zona da Mata. Na distribuição obtida para o outono (Figura 16b), encontra-se em destaque a área central do estado (leste do Sertão e sul da Zona da Mata), onde são observadas as menores frequências. Durante o inverno (Figura 16c), as maiores frequências de seca ocorreram no leste do Sertão e do Agreste, e na maior parte da Zona da Mata. As menores frequências, por outro lado, ocorreram em áreas ao oeste de Pernambuco e ao norte e sul da Zona da Mata. A primavera (Figura 16d), por sua vez, foi a estação do ano que exibiu os maiores contrastes na distribuição da frequência de seca do tipo moderada. Os resultados indicam que ocorreu seca moderada com maior frequência nas regiões Agreste, Zona da Mata, e numa pequena parte no centro do Sertão, e com menor frequência na região oeste do Sertão.

Figura 16 – Distribuição espacial da frequência sazonal de seca moderada para cada estação do ano referente ao período de 1962 a 2012.

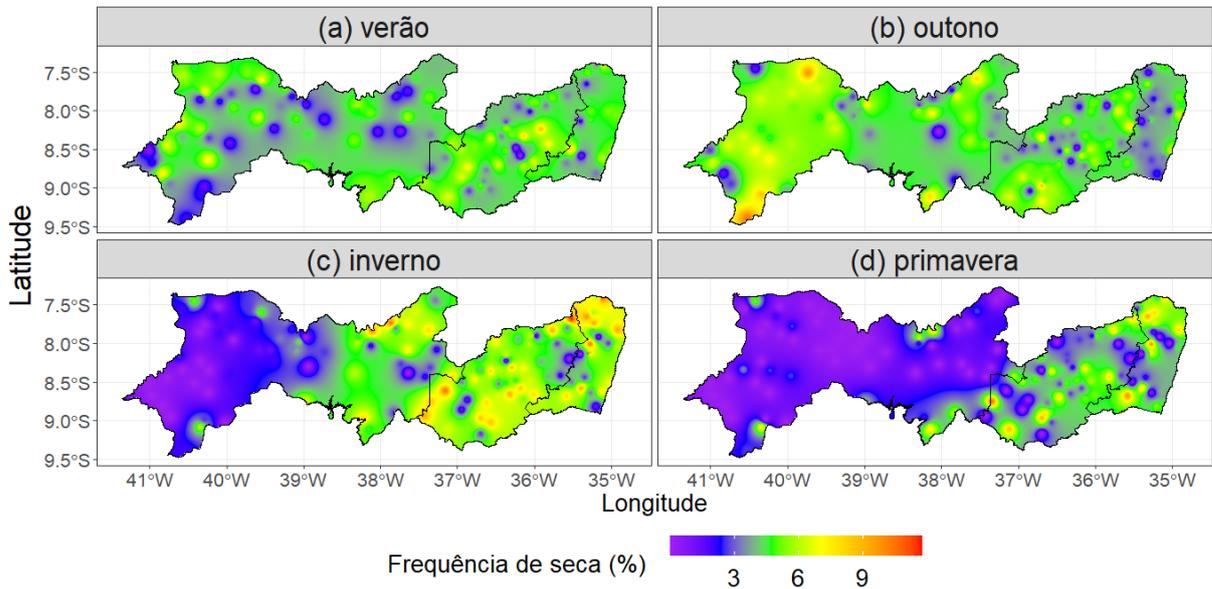


Fonte: Elaboração própria

Quantitativamente, observou-se que a frequência de seca moderada variou entre 0 e 18,54% (com média de 8,94%) no verão, entre 1,96% e 15,68% (com média de 7,82%) no outono, de 0 a 20,26% (com média de 9,1%) no inverno, e de 0 a 18,95% (com média de 8,37%) durante a primavera.

**iii) Seca severa (Figura 17):** de acordo com a distribuição de frequência sazonal de seca severa obtida para o verão (Figura 17a), esse tipo de seca foi menos frequente no Sertão, no centro do Agreste e no sul da Zona da Mata, e mais frequente em áreas localizadas ao oeste do Sertão e ao sul e leste do Agreste pernambucano. Durante o outono (Figura 17b), as frequências mais altas de seca severa foram observadas no oeste do Sertão, e as mais baixas, ao leste do Sertão, cento-norte do Agreste e pela Zona da Mata. No inverno (Figura 17c), por outro lado, as secas severas revelaram-se menos frequentes em todo o oeste e no leste do Sertão, no leste do Agreste (divisa com a Zona da Mata), e ao sul da Zona da Mata. Ocorreram, entretanto, com maior frequência em áreas ao leste do Sertão (divisa com o Agreste) e ao norte da Zona da Mata. Durante os meses da primavera (Figura 17d), por sua vez, observaram-se os menores valores de frequência de seca severa em praticamente toda a região Sertão (com exceção de alguns pontos localizados ao norte e ao sul), bem como em pequenas áreas espalhadas ao sul, norte e leste do Agreste (divisa com a Zona da Mata), e ao norte e sul da Zona da Mata. Os maiores valores de frequência de seca severa podem ser identificados no sul da divisa do Sertão com o Agreste e sul da Zona da Mata.

Figura 17 – Distribuição espacial da frequência sazonal de seca severa para cada estação do ano referente ao período de 1962 a 2012.



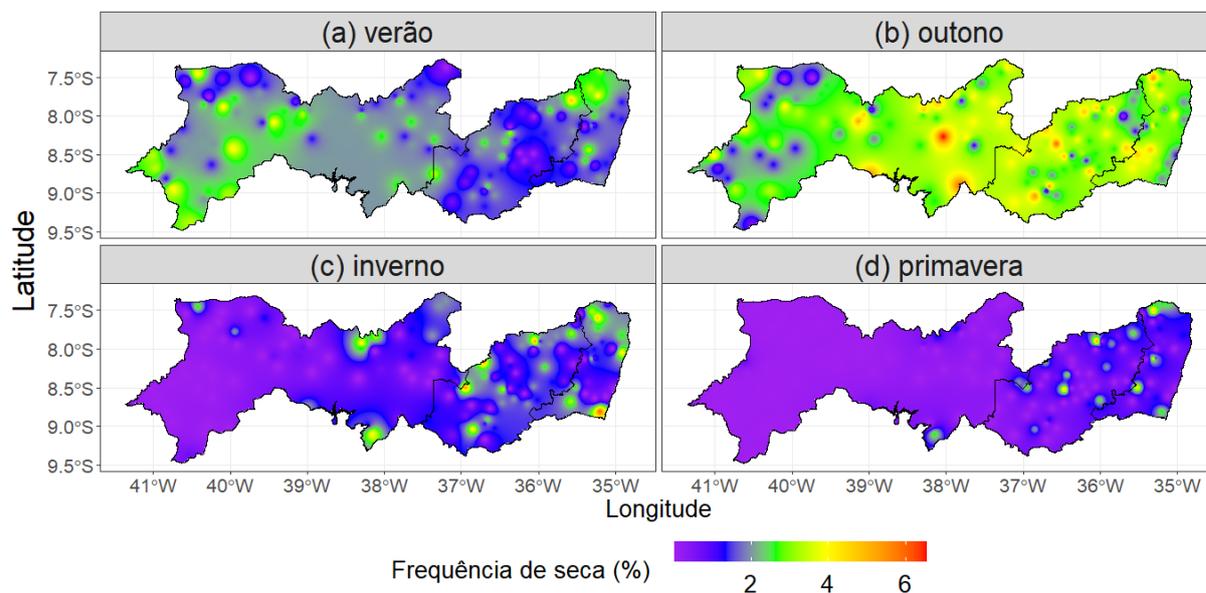
Fonte: Elaboração própria

Quantitativamente, obtiveram-se para esse tipo de seca: frequência mínima de 0 e máxima de 8,61% (com média de 4,3%) durante o verão; variação entre 0 e 10,46% (com média de 4,64%) no outono; entre 0 e 11,76% (com média 4,39%) nos meses de inverno; e variação entre 0 e 10,46% (com média de 2,8%) durante a primavera.

**iv) Seca extrema (Figura 18):** a distribuição espacial da frequência sazonal de seca extrema durante o verão (Figura 18a) indicou que as maiores concentrações dessa categoria de seca ocorreram no oeste do Sertão e no norte do Agreste e da Zona da Mata. Além disso, a maior parte da região do Agreste e da Zona da Mata e o norte do Sertão apresentaram baixas frequências de seca extrema. Os resultados mostram ainda que a variação da frequência se deu entre 0 e 4,63%, com média de 1,87%. Na estação outono (Figura 18b), a frequência de seca extrema variou entre 0 e 6,53%, com média de 2,97%, e mostrou-se mais elevada na maior parte do território pernambucano. Observa-se, entretanto, baixas frequências no oeste do Sertão, em alguns pontos no leste do Agreste e no litoral sul na Zona da Mata. A seca extrema ocorreu com frequência ainda mais baixas numa área ainda mais extensa do estado durante o inverno (Figura 18c), em maior parte no Sertão, salvo algumas localidades no norte e sul dessa região; oeste, norte e sul do Agreste; e norte e sul da Zona da Mata. A variação nos meses de inverno se deu entre 0 e 5,88%, com média de 1,11%. Durante a primavera (Figura 18d), a frequência de seca extrema variou entre 0 e 5,22%, com média de 0,54%. Nessa estação, as frequências de seca extrema foram as menores por todo o território pernambucano (principalmente no Sertão), com exceção de

alguns pontos que distribuídos pelo Agreste e Zona da Mata.

Figura 18 – Distribuição espacial da frequência sazonal de seca extrema para cada estação do ano referente ao período de 1962 a 2012.



Fonte: Elaboração própria

#### 5.2.1.2.1 Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney

A Figura 19 apresenta os resultados do teste Wilcoxon-Mann-Whitney aplicado às distribuições espaciais das frequências sazonais médias de seca (total e por categoria) para cada estação do ano.

Conforme indicado na Figura 19, a distribuição espacial obtida para o verão, por exemplo, revela uma diferença estatística ao nível de significância de 5% entre as regiões Agreste e Zona da Mata quanto à categoria de seca leve (Figura 15a), e entre Agreste e Sertão quanto à seca extrema (Figura 18a).

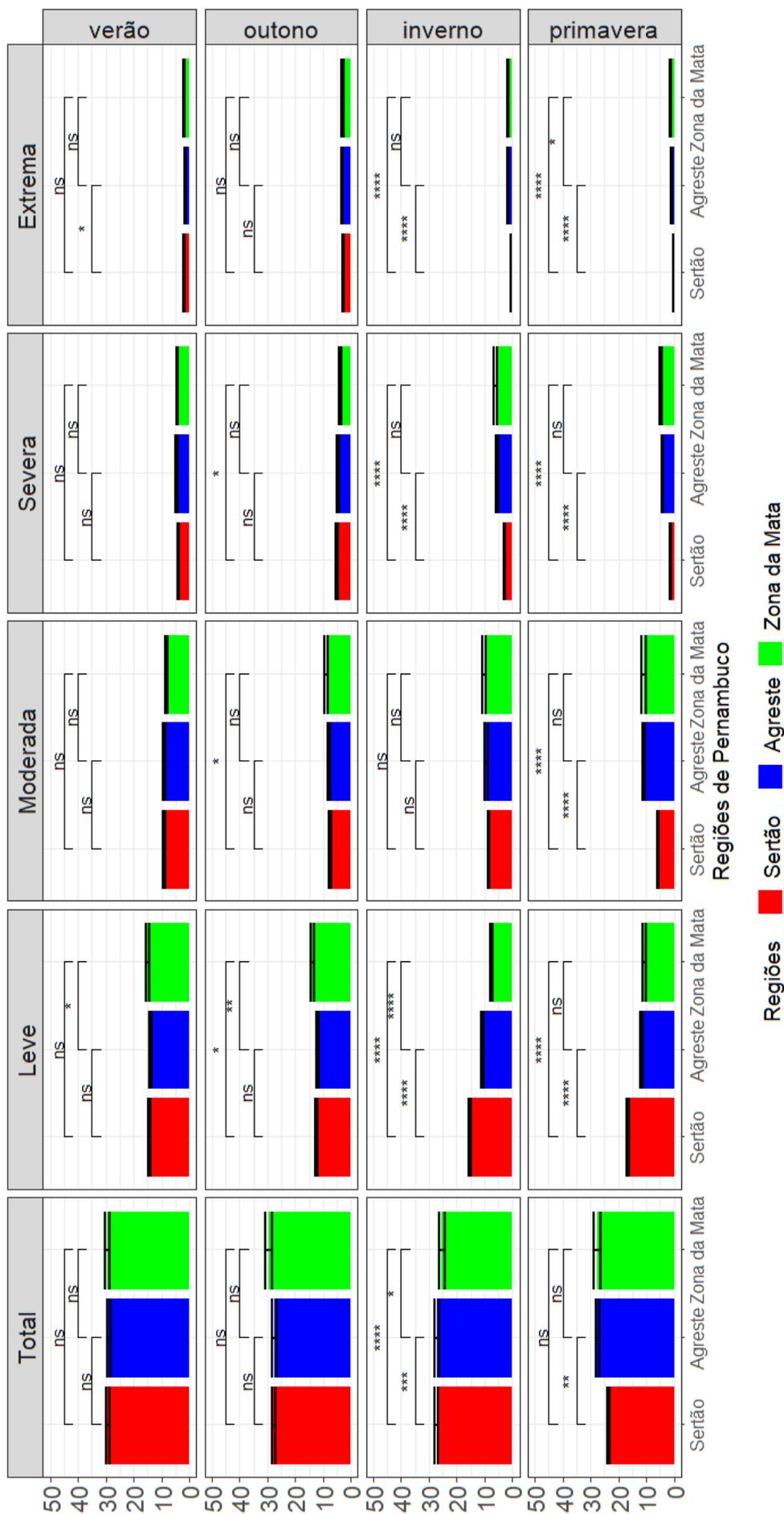
Para o outono, os resultados revelam, quanto à seca leve, uma diferença estatística entre as regiões Sertão e Zona da Mata ao nível de significância de 5%, e entre Agreste e Zona da Mata ao nível de 1%. Quanto às categorias de seca moderada e severa, resultados indicaram diferença estatística entre as regiões Sertão e Zona da Mata ao nível de significância de 5%.

Com base na distribuição espacial de frequência de seca durante o inverno, por outro lado, o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney revelou diferenças estatísticas entre as regiões Sertão e Zona da Mata ao nível de significância de 0,01%, Sertão e Agreste ao nível de 0,1%, e agreste e Zona da Mata ao nível de significância de 5% quanto à frequência de seca de

um modo geral (seca total). Quanto à ocorrência de seca leve, houve diferença estatística ao nível de significância de 0,01% entre todas as regiões. Com relação à ocorrência de seca nas categorias severa e extrema, as distribuições espaciais das frequências médias indicaram diferenças estatísticas ao nível de 0,01% entre as regiões Agreste e Sertão, e Sertão e Zona da Mata.

Considerando a primavera, todas as categorias de seca apontaram para diferenças estatísticas ao nível de significância de 0,01% entre as regiões Sertão e Agreste, e Sertão e Zona da Mata. Quanto à categoria de seca extrema, resultados indicaram, ainda, uma diferença estatística entre o Agreste e a Zona da Mata ao nível de significância de 5%. Para a seca em geral (seca total), por outro lado, observou-se diferença estatística (ao nível de significância de 1%) apenas entre as regiões Sertão e Agreste.

Figura 19 – Resultados do teste Wilcoxon-Mann-Whitney para frequência sazonal (em %). Os símbolos "\*", "\*\*", "\*\*\*", "\*\*\*\*" e "\*\*\*\*\*" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa.



Fonte: Elaboração própria

#### 5.2.1.2.2 Teste de tendência de Mann-Kendall e Sen's *slope*

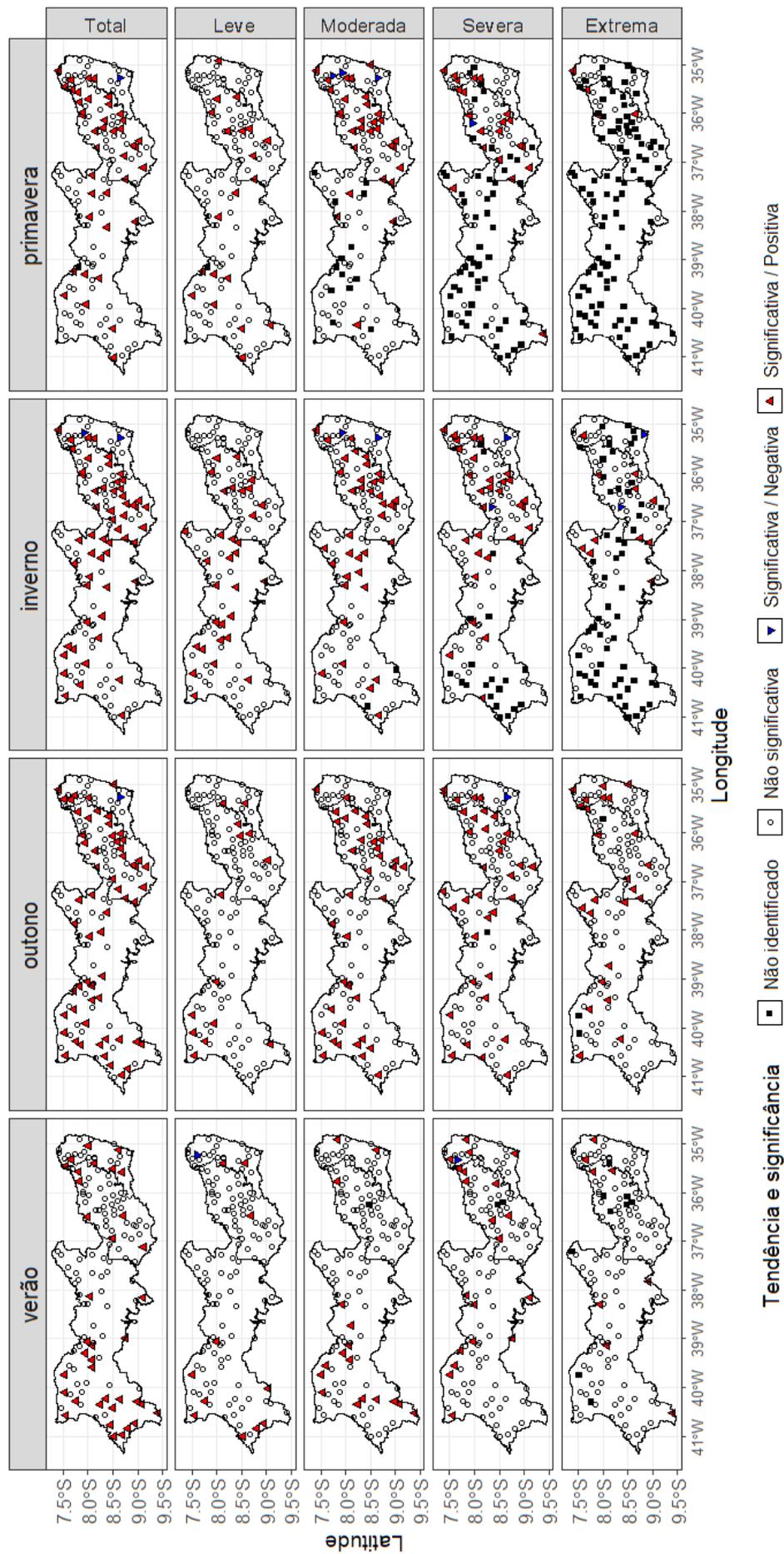
Os resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado às séries temporais de frequência sazonal de seca (total e por categoria) para cada estação pluviométrica são ilustrados na [Figura 20](#). Os triângulos preenchidos (vazados) indicam tendência significativa (não-significativa); a cor vermelha (azul) representa tendência positiva (negativa). Os pontos pretos informam as estações onde não ocorreu seca e, portanto, não há série temporal de frequência de seca.

Com base nos resultados apresentados na [Figura 20](#), calculou-se, para cada região do estado, a proporção de estações com frequência sazonal de seca (total e por categoria) indicando tendência significativa (de aumento ou diminuição), para cada estação do ano. O resultado é ilustrado na [Figura 21](#). Dela, observa-se por exemplo que a região Sertão apresentou a maior proporção (32,81%) de estações pluviométricas com tendência significativa de aumento da frequência sazonal de seca leve durante o inverno. Nessa mesma região, observa-se que houve maior proporção de tendência significativa de seca moderada e severa durante o verão e o outono. Para a frequência de seca total, bem como para a categoria extrema, o outono foi a estação do ano que apresentou as maiores proporções de tendência significativas. Além disso, houve tendência de redução da ocorrência sazonal de seca no Sertão apenas para a categoria de seca leve durante a primavera.

No Agreste pernambucano, as frequências de seca leve apresentaram maiores proporções de significância estatística no inverno e na primavera; de seca moderada na primavera e no inverno; e de seca severa no inverno e na primavera. A proporção para frequência de seca extrema foi maior para as estações outono e inverno. As frequências de seca total, por outro lado, apresentaram maiores proporções no inverno e na primavera. Com exceção da categoria da seca extrema, as frequências de todas as secas apresentaram maiores proporções de tendência significativa durante o inverno e a primavera. Essas foram, entretanto, as estações que registraram frequências de seca com tendências negativas.

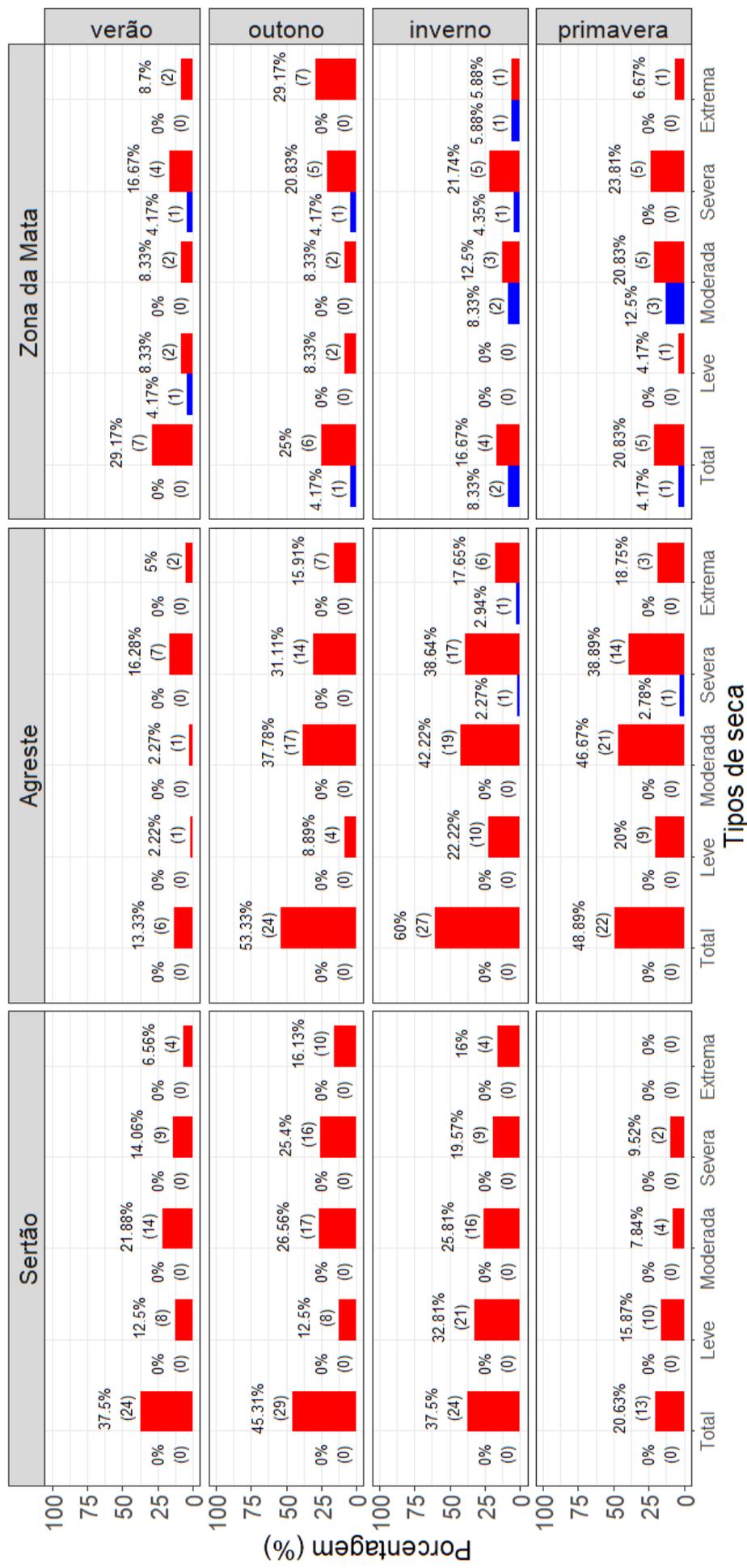
Na região Zona da Mata, a frequência sazonal de seca total apresentou maior proporção de estações meteorológicas com tendência significativa no verão e outono. Analisando por categoria, a seca leve apresentou a maior proporção de tendência significativa de aumento de sua ocorrência durante o verão, e a seca moderada, durante o inverno e a primavera. Para o outono, por outro lado, observam-se as maiores proporções de tendência significativa na categoria de seca severa.

Figura 20 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para as frequências sazonais de seca (total e por categoria) para cada estação pluviométrica.



Fonte: Elaboração própria

Figura 21 – Proporção de estações pluviométricas com tendência significativa para as frequências sazonais de seca (total e por categoria). A cor vermelha (azul) indica tendência de aumento (diminuição) da frequência sazonal de seca.



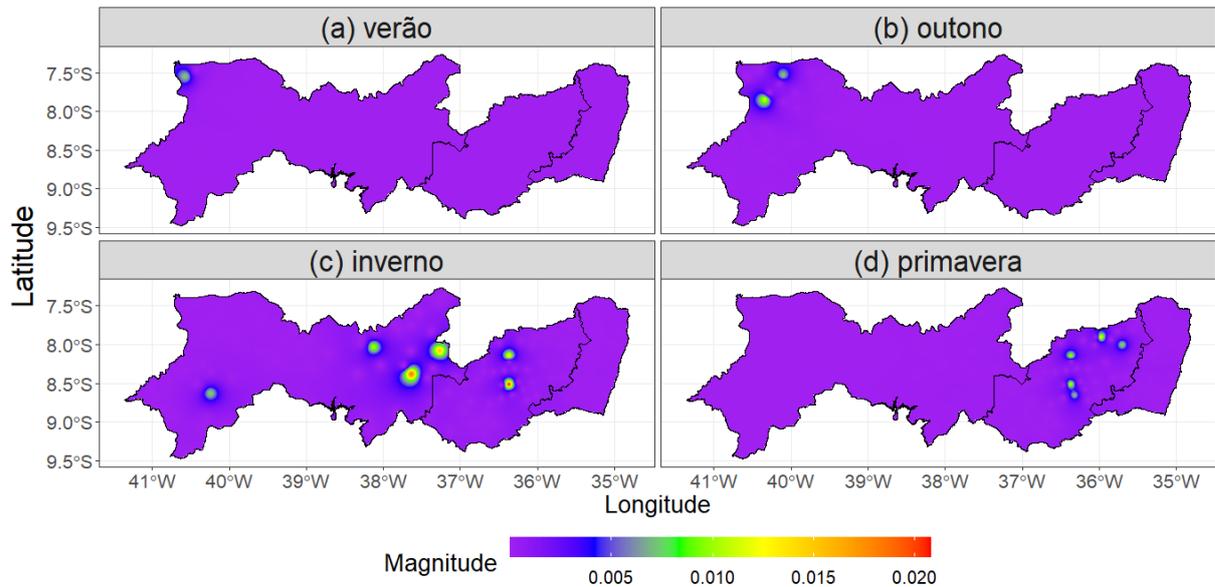
Tendência ■ Negativa ■ Positiva

Tipos de seca

Fonte: Elaboração própria

A [Figura 22](#) ilustra a distribuição espacial da magnitude das tendências de frequência sazonal de seca total.

Figura 22 – Magnitude das tendências da frequência sazonal de seca total para cada estação do ano.



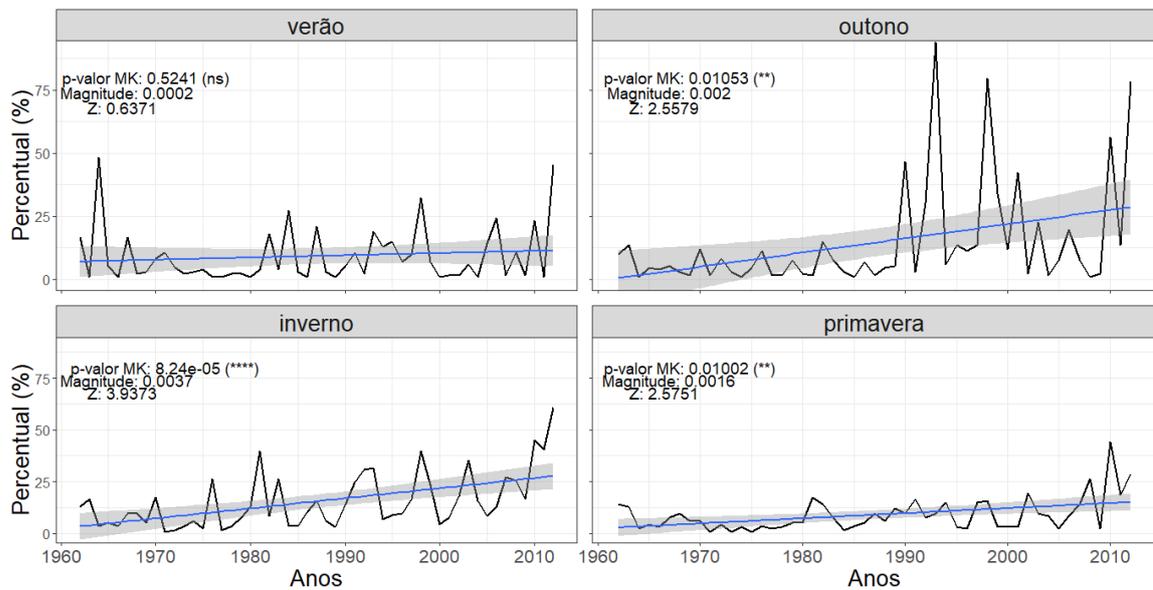
Fonte: Elaboração própria

Os resultados apresentados na [Figura 22](#) indicam que, embora se tenha observado tendência significativa de aumento na frequência de seca em alguma categoria nas regiões Sertão e Agreste (ambas em considerável proporção), a magnitude dessas tendências se mostrou muito próxima de zero em praticamente todo o estado. Destacam-se, entretanto, pequenas áreas i) ao noroeste do Sertão durante o verão e o outono; ii) sudoeste e leste do Sertão, centro e centro-norte do Agreste no inverno; e iii) no centro-norte do Agreste durante a primavera. As maiores magnitudes foram observadas no Sertão e no Agreste. A Zona da Mata, por outro lado, não apresentou magnitude relevante em nenhuma estação do ano.

Na [Figura 23](#) estão as séries de proporção de estações com frequência máxima por ano e por estação do ano. Conforme o teste Mann-Kendall, com exceção do verão, as séries apresentaram tendência significativa e positiva, indicando que há um aumento do número de estações que apresentaram frequência máxima (100%) e que esse aumento foi maior no outono. Além disso, os picos mais destacados ocorrem na estação do outono, destaque para o ano de 1993 e 1998. Para as outras estações os picos ocorrem em 1964 (verão), 2012 (inverno) e 2010 (primavera). Há registros de seca no verão de 1964 em outras regiões do Brasil ([MARENGO et al., 2021](#)); já os anos de 2010 e 2012 são anos de ocorrência de

seca durante o fenômeno da *La Niña* (MARENGO et al., 2013; MARENGO; TORRES; ALVES, 2017).

Figura 23 – Série de percentual de estações com frequência máxima para seca total por estação do ano.



Fonte: Elaboração própria

## 5.2.2 Área afetada pela seca

### 5.2.2.1 Escala anual – Indicador SPI-12

A área afetada pela seca variou em Pernambuco entre 0 e 99,25%, para a seca total, com pico de seca em 1993; entre 0 e 71,43%, para a seca leve, com pico de seca em 1963; entre 0 e 84,21%, para a seca moderada, com pico ocorrendo em 1993; entre 0 e 75,19%, para a seca severa, com pico ocorrendo em 2012; e, para seca extrema, a variação foi de 0 e 65,41%, com pico ocorrendo em 2012. No ano de 1993, em que ocorreram os valores máximos de área afetada dos tipos de seca total e moderada, ocorreu uma das secas mais severas na região Nordeste e que, segundo Rao, Hada e Herdies (1995) e Cunha et al. (2018), está associada a um evento atípico de *El Niño*. O ano de 2012, onde ocorreram os picos de área das secas severa e extrema, está associado com a migração para o norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que é seguida de um evento de *El Niño* (CUNHA et al., 2018).

Além disso, conforme a Tabela 5, as categorias regional, parcial e global, são mais frequentes nos tipos de seca total e leve, enquanto que a categoria local é mais frequente na seca moderada e severa. Na seca extrema predomina a categoria sem seca aparente. Conforme a Tabela 5, a medida que a seca torna-se mais grave, menor é a abrangência

espacial dos eventos secos. Brito et al. (2018) aponta que no Nordeste há a ocorrência de secas mais severas, porém mais curtos.

Tabela 5 – Categorias de área afetada por tipo de seca na escala anual (SPI-12)

Tipo de seca	Sem seca aparente	Local	Parcial	Regional	Global
Total	5	8	3	9	26
Leve	6	7	4	11	23
Moderada	9	17	6	9	10
Severa	26	15	1	5	4
Extrema	41	4	1	2	3

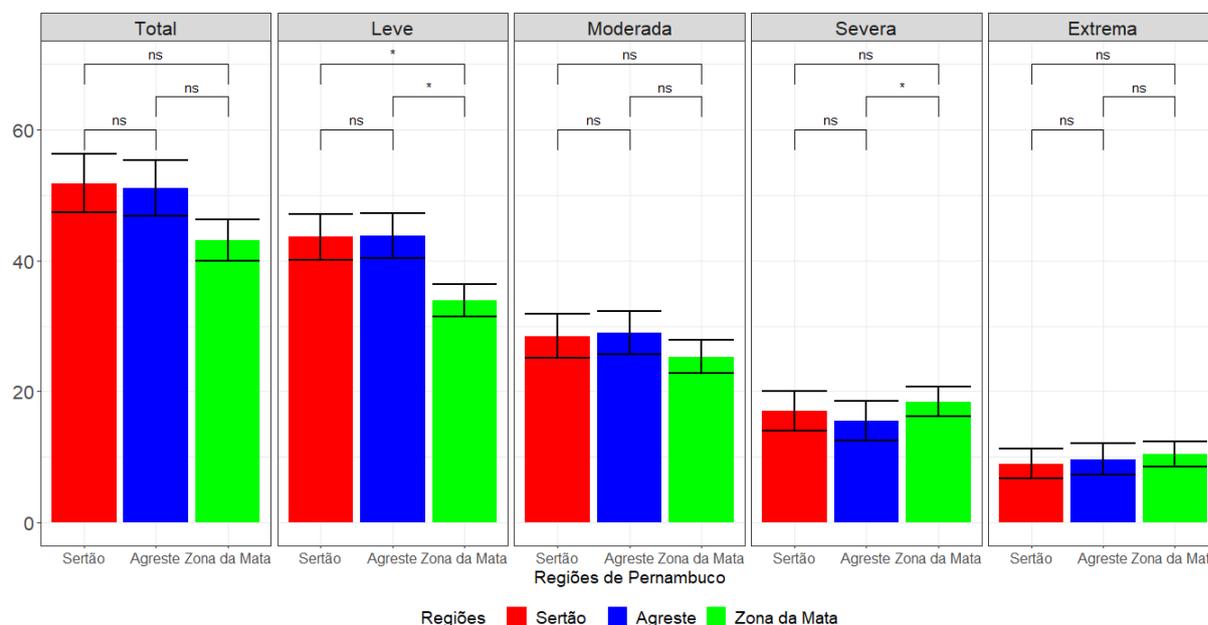
Fonte: Elaboração própria

#### 5.2.2.1.1 Teste Wilcoxon-Mann-Whitney

A Figura 24 apresenta os resultados do teste Wilcoxon-Mann-Whitney entre a área afetada pela seca por região de Pernambuco e por tipo de seca. No tipo de seca leve, os resultados apontam que há diferenças estatisticamente significativas entre as médias de área afetada das regiões do Agreste e Zona da Mata e as médias das área afetadas das regiões do Sertão e da Zona da Mata, ao nível de significância de 5%. Para o tipo de seca moderada, os resultados do teste não apontaram diferenças estatisticamente significativas entre as médias de área afetada das regiões. Para seca severa, o teste apresentou diferença estatística significativa entre as médias de área afetada das regiões do Agreste e da Zona da Mata. Para a seca extrema e a seca total o teste apresentou o mesmo resultado em ambos os tipos de seca: não há diferenças estatisticamente significativas entre as médias de área afetada das regiões de Pernambuco.

A Zona da Mata foi a região com maior média de área afetada durante as secas mais graves (severa e extrema), enquanto que o Agreste apresentou maiores médias de área afetada para seca leve e seca moderada e o Sertão, maior média para a seca total.

Figura 24 – Resultado do teste Wilcoxon-Mann-Whitney para área afetada pela seca (em %). Os símbolos "\*", "\*\*", "\*\*\*" e "\*\*\*\*" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa.



Fonte: Elaboração própria

### 5.2.2.2 Escala sazonal – Indicador SPI-3

A estação do verão apresentou uma variação de área afetada entre 15,04% e 87,96%, para seca total, com picos de área afetada nos anos de 1984 e 2012. Conforme a Tabela 6, as categorias de área afetada mais frequentes foram a global (28) e regional (15). Para a seca leve, a variação foi entre 6,77% e 61,65%, com pico de área afetada em 1993. As categorias mais frequentes para a seca leve foram a regional (23), local (10) e parcial (9). Para a seca moderada, a variação de área afetada ocorreu entre 3,76% e 59,4%, com pico em 2012. As categorias de área afetada mais frequentes foram, respectivamente, a local (22), a regional (10) e sem seca aparente (9), parcial (8) e global (2). Na seca severa a variação foi entre 0,75% e 37,59%, com pico em 1998. E na seca extrema, a variação foi entre 0 e 24,06%, com pico em 1984. As categorias de área afetada mais frequente foram a sem seca aparente (33) e local (13). Não há ocorrências da categoria global e em apenas dois anos ocorre a categoria regional. A área afetada pela seca variou entre 0 e 24,06%, com pico de seca em 1984. Apenas as categorias sem seca aparente (43) e local (8) ocorreram no período de estudo.

Tabela 6 – Categorias de área afetada pela seca por tipo de seca e estação do ano (SPI-3)

Estação do ano	Tipo de seca	Categoria de área afetada				
		Sem seca aparente	Local	Parcial	Regional	Global
verão	Total	0	3	5	15	28
	Leve	2	10	9	23	7
	Moderada	9	22	8	10	2
	Severa	33	13	3	2	0
	Extrema	43	8	0	0	0
outono	Total	5	9	3	12	22
	Leve	5	16	11	15	4
	Moderada	17	20	6	6	2
	Severa	40	5	0	3	3
	Extrema	43	4	1	3	0
inverno	Total	7	10	6	9	19
	Leve	11	14	9	10	7
	Moderada	19	15	8	7	2
	Severa	36	10	3	2	0
	Extrema	48	3	0	0	0
primavera	Total	1	9	6	12	23
	Leve	3	16	7	21	4
	Moderada	13	21	12	4	1
	Severa	44	6	1	0	0
	Extrema	51	0	0	0	0

Fonte: Elaboração própria

Na estação do outono, a variação de área afetada ocorreu da seguinte forma: entre 0,75% a 100%, para seca total, com picos nos anos de 1998 e 2012. As categorias de área global, regional e local, que foram as mais frequentes, ocorreram, respectivamente, durante 22, 12 e 9 anos. A área da seca leve variou entre 0 e 57,14%, com picos em 1990 e 2003, com maior frequência das categorias local (16), regional (15) e parcial (1). Para a seca moderada, a variação ocorreu entre 0 e 60,15%, com pico em 2012; sendo as categorias local (20) e sem seca aparente (17) as mais frequentes, seguidas de parcial e regional (6 anos cada) e global (2). Entre 0 e 61,65%, para seca severa, com pico em 1998 e a categoria sem seca aparente (40) sendo a mais frequente. Entre 0 e 48,87%, para seca extrema, com pico em 1993, sendo a categoria sem seca aparente, assim como para seca severa, sendo a mais frequente (43 anos).

A estação do inverno apresentou variação de 3,76% a 94,73%, para seca total, com valor máximo no ano de 2012. As categorias de área mais frequentes foram a global (19), local (10) e regional (9), sendo essas categorias mais concentradas nas décadas de 1992-2001 e 2002-2012. Entre 3% a 60,9%, para seca leve, com picos em 1993 e 1998 e as categorias local (14), sem seca aparente (11) e regional (10). Variação entre 0 e 57,89%, para tipo de seca moderada, com pico em 1998, ocorrendo 9 eventos secos globais e regionais. A seca severa variou entre 0 e 46,61%, com pico em 2012. A maior parte das categorias de seca foram sem seca aparente (36) e local (10), mas há a ocorrência de eventos secos globais (2) e regionais (3). E, por fim, entre 0 e 23,3%, para seca extrema, com pico em 2012. Apenas há a ocorrência de eventos sem secas aparentes (48) e locais (3).

Na estação da primavera ocorreram variações entre 9,02% a 90,97%, para seca total, com pico em 2008; entre 8,27% e 57,89%, para seca leve, com máxima em 2012; entre 2,25% e 54,88%, para o tipo moderado de seca, com máxima em 2008; entre 0 e 28,57%, para seca severa, com pico em 2008; e entre 0 e 9,02%, para o tipo de seca extrema, com máxima em 1962. Para o tipo de seca total, eventos de seca global e regional foram os mais frequentes e compreendem um período de 35 anos. Na área afetada da seca leve predominam os eventos de secas regionais (21) e locais (16), porém em 4 anos ocorrem eventos de abrangência global (1981, 1998, 2008 e 2012). Para a seca moderada, predominam os eventos de secas locais (21), de sem seca aparente (13) e parciais (12). Há a ocorrência de um evento de seca global no ano de pico, em 2008. Na seca severa, o evento mais predominante foi o de ausência de seca (sem seca aparente) durante 44 anos e não há ocorrência das categorias globais e regionais. A seca extrema, durante todo o período, não apresentou eventos de secas com abrangência significativa (51 anos de sem seca aparente).

Conforme [Carmo e Lima \(2020\)](#), os anos de pico de área afetada de 1990 e 1993, fazem parte de um período de ocorrência de uma seca longa e mais intensa, enquanto que o ano de 1998, ocorreu uma seca menos intensa, mas que afetou um 32% da região Nordeste. [Sobral et al. \(2019\)](#), cita que os anos de pico de área afetada de 1993, 1998 e 2003, foram anos de fortes eventos de *El Niño*, enquanto que os anos de pico de área afetada de 1984 e 2008 foram anos de ocorrência de *La Niña*.

A [Tabela 7](#) apresenta as médias de área afetada para as escalas anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3). A seca total apresentou, em média, eventos secos com abrangência regional, com exceção do verão onde há uma maior ocorrência de secas globais. Nas secas leves, predominam, em média, a categoria regional e regional parcial, com exceção do inverno, onde eventos secos locais são mais expressivos, em média. Para a seca moderada, a escala anual apresentou, em média, eventos secos regionais parciais, enquanto que para a escala sazonal os eventos de secas foram locais. A seca severa, em média, apresentou

eventos de seca local na escala anual, no verão e no outono, enquanto que no inverno e primavera e em todas as escalas da seca extremas, em média, não há ocorrência de eventos de seca significativos (sem seca aparente). Comparando as escalas, a estação do outono apresentou os maiores valores de desvios-padrão.

Tabela 7 – Média e desvio padrão (entre parênteses) da área afetada por seca nas escalas anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3).

Escala	Categoria de seca				
	Total	Leve	Moderada	Severa	Extrema
Anual	48,67% (28,56%)	40,43% (22,98%)	27,61% (21,93%)	17,02% (19,88%)	9,7% (15,39%)
verão	55,67% (25,14%)	35,42% (15,92%)	22,52% (15,80%)	11,23% (12,02%)	4,69% (7,57%)
outono	44,15% (28,68%)	29,08% (17,93%)	18,82% (16,89%)	10,26% (16,14%)	6,45% (12,74%)
inverno	38,02% (27,21%)	24,79% (19,64%)	18,48% (15,87%)	9,7% (11,84%)	3,06% (5,84%)
primavera	45,15% (24,71%)	30,14% (16,69%)	20,18% (15,44%)	7,32% (9,96%)	1,77% (3,27%)

Fonte: Elaboração própria

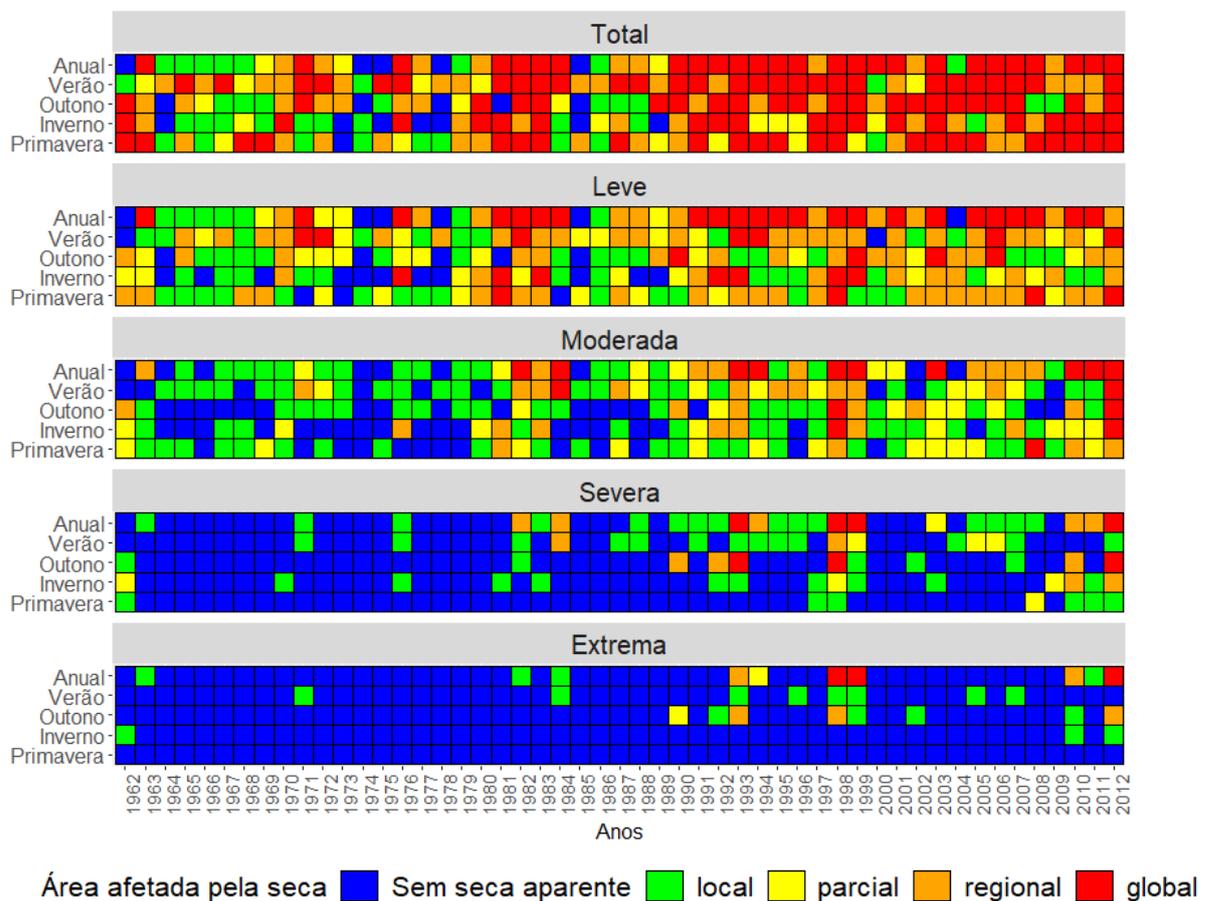
A [Figura 25](#) mostra o comportamento das categorias de seca ao longo dos anos. A categoria de eventos globais e regionais são mais evidentes para a seca total e seca leve do que para as demais categorias de seca, principalmente, ao final do período de estudo. Nos anos de 1993, 1998 e 2012, todas as escalas de tempo apresentaram eventos globais de seca total, sendo esses anos. Para a seca total, os anos de 1981-1984, 1990-1996, 1998-2001, 2005-2008, 2010-2012 (anual); 1981-1984, 1993-1999, 2003-2008 (verão); 2001-2007 (outono); 1991-1993, 1997-1999 e 2009-2012 (inverno); e 1981-1983, 1993-1995, 2002-2005 e 2008-2012 (primavera), foram os períodos que mais apresentaram anos consecutivos com eventos secos globais. O período de 1990-1996, onde anos de secas globais foram identificadas, é considerado um período de secas severas e prolongadas, enquanto que o período de 2001-2007 coincide com anos onde o Nordeste teve mais afetadas por secas (CARMO; LIMA, 2020; BRITO et al., 2018). Os anos de 1983, 1993, 1998, 2003 e 2012 foram anos em que todas as escalas presenciaram eventos de secas totais globais. O ano de 1983, 1993 e 2003 foram anos de seca de significativa abrangência espacial e de ocorrência de fenômeno de *El Niño* (CARMO; LIMA, 2020; JONES; MURPHY, 2009; SOBRAL et al., 2019).

A seca leve apresenta períodos de eventos globais consecutivos para a escala anual entre 1981-1984, 1991-1996 e 2005-2008. Os eventos de secas regionais ocorrem em mais de dois anos consecutivos no período de 2009-2011, entretanto são mais frequentes no tipo de seca leve nos períodos de 1995-1999 (verão), 1993-1995 e 2002-2007 (primavera).

A medida que os tipos de secas tornam-se mais graves, menores são as ocorrências de eventos globais e regionais. O tipo de seca moderada apresentou anos consecutivos de

eventos secos globais de 2010-2012 (anual) e eventos regionais entre 2005-2008 (anual). Os eventos secos da categoria regional parcial são os de menor ocorrência no período de estudo, com ocorrência de períodos consecutivos entre os anos de 1994-1996 (inverno da seca total), 1971-1973 (outono da seca leve) e 2009-2011 e 2002-2005 (inverno e primavera da seca moderada). Períodos consecutivos de eventos secos locais de mais de dois anos são observados em todos os tipos de seca, com exceção da seca extrema. A categoria sem seca aparente apresenta longos períodos consecutivos de ocorrência nos tipos de seca severa e extrema na escala sazonal. Para a escala anual e todos os tipos de seca, os anos de 1998, 1999 e 2012 foram anos de eventos secos de abrangência global.

Figura 25 – Categorias de área afetada pela seca ao longo dos anos

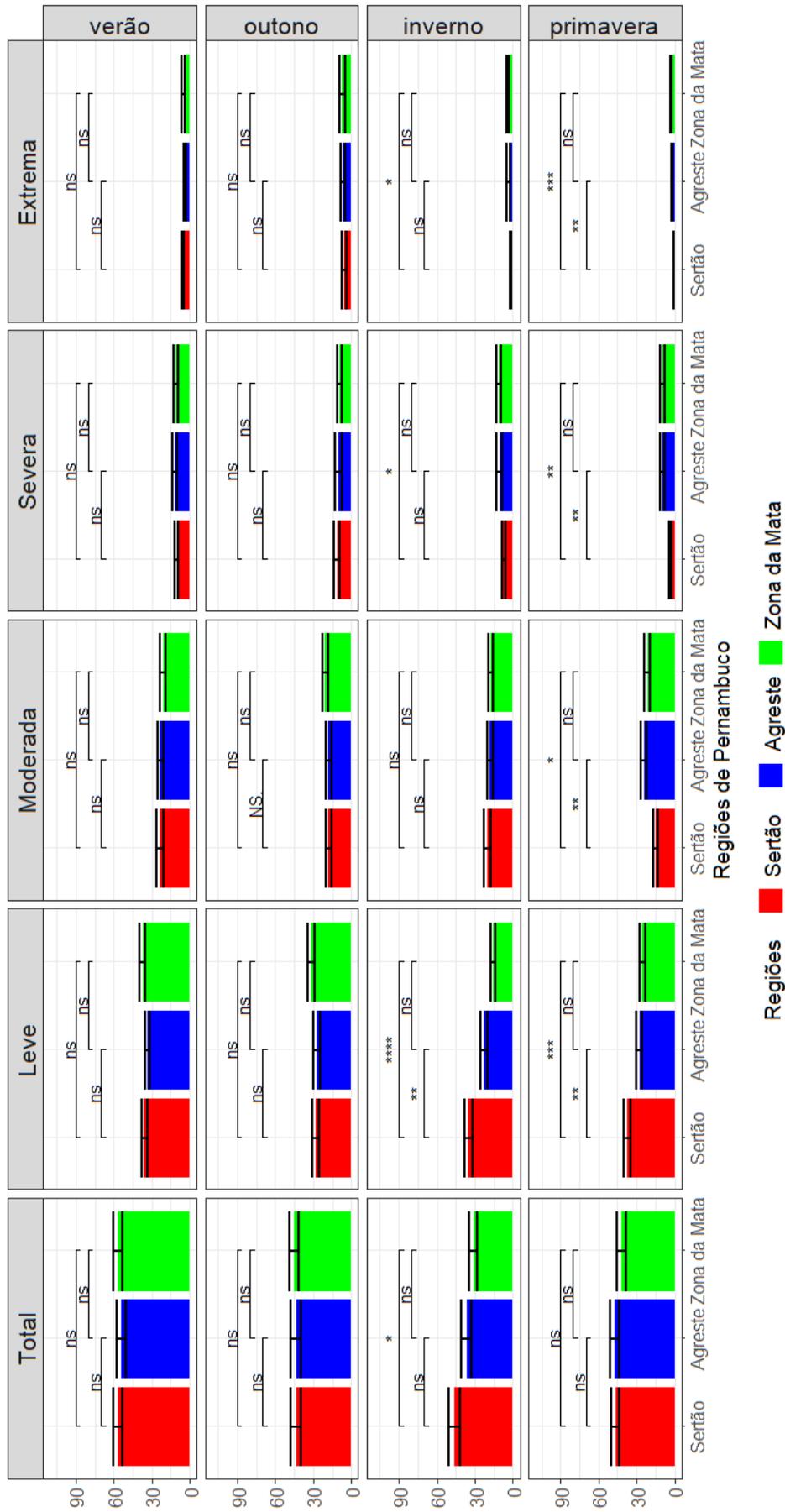


Fonte: Elaboração própria

#### 5.2.2.2.1 Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney

Na Figura 26 estão os resultados do teste Wilcoxon-Mann-Whitney para as valores de área afetada pela seca por estação do ano e por tipo de seca.

Figura 26 – Médias das áreas afetadas pela seca e os resultados do teste Wilcoxon-Mann-Whitney. Os símbolos "\*", "\*\*", "\*\*\*", "\*\*\*\*" e "\*\*\*\*\*" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa.



Fonte: Elaboração própria

Os resultados para a estação do verão, [Figura 26](#), apontam que não há diferença estatisticamente significativa, ao nível de significância de 5%, entre as médias de área afetada pela seca das regiões para todos os tipos de seca. Assim, como ocorreu para as médias de frequência sazonal.

Para a estação do outono, [Figura 26](#), os resultados são similares aos da estação do verão, onde não há evidência para diferença estatisticamente significativa, ao nível de significância de 5%, entre as médias de área afetada pela seca em cada tipo de seca. As estações do verão e do outono são as que menos aparecem diferenças estatísticas entre as regiões, semelhante ao que ocorre com a frequência de seca; e iii) para seca moderada não há evidência para diferença estatística entre as regiões de Pernambuco.

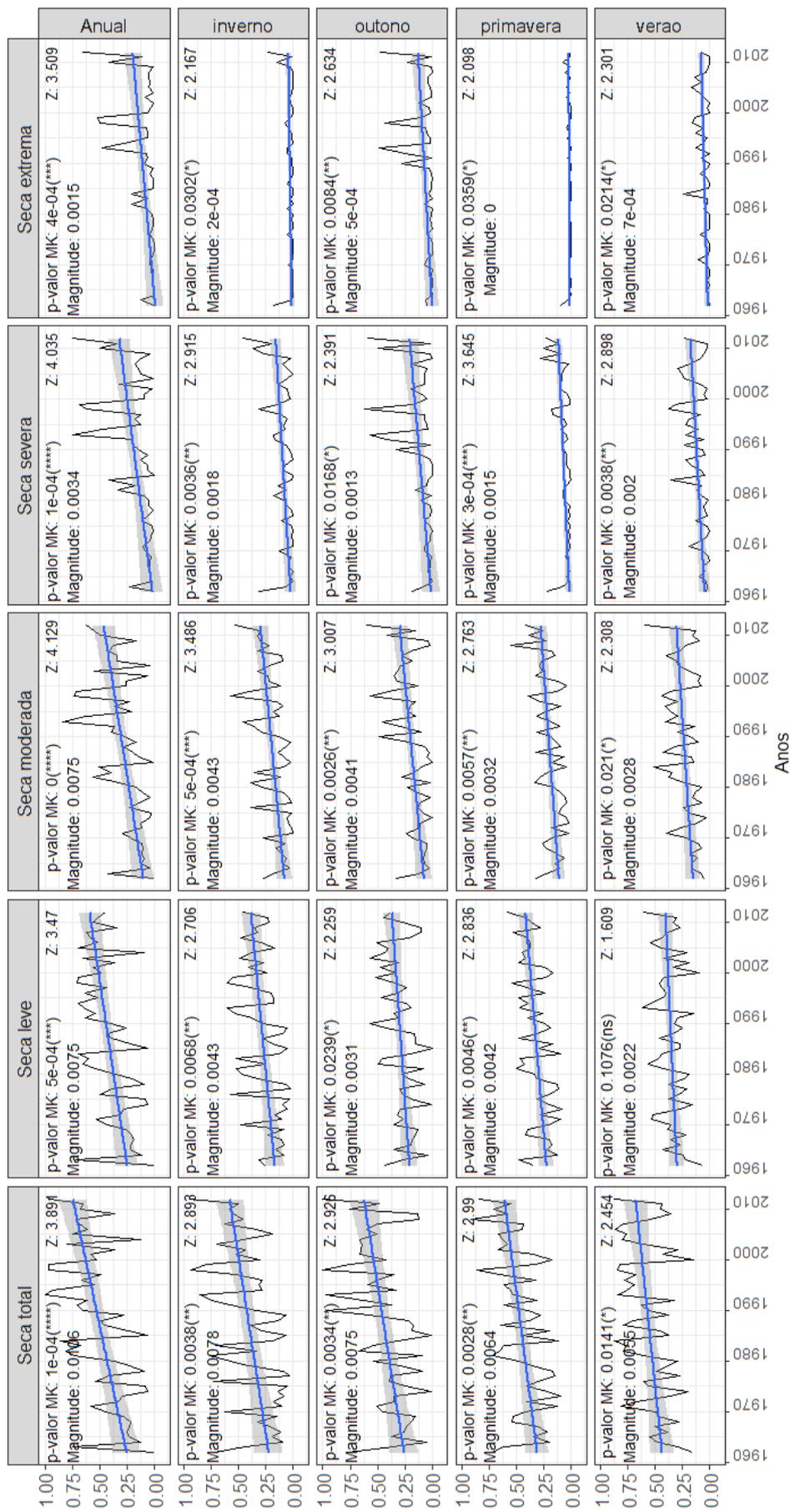
Conforme a [Figura 26](#), o teste identificou diferença significativa entre: i) Sertão e Zona da Mata, Agreste e Sertão, ao nível de significância de, respectivamente, 0,1% e 1%, quanto a área afetada média de seca leve; e ii) entre Sertão e Zona da Mata ao nível de significância de 5%, quanto a área afetada média das secas severa, extrema e total.

De acordo com a [Figura 26](#), para a estação da primavera, há diferença significativa entre: i) Sertão e Zona da Mata, Agreste e Sertão, ao nível de significância de, respectivamente, 0,1% e 1%, quanto a área afetada média de seca leve; ii) entre Sertão e Zona da Mata, Agreste e Sertão, ao nível de significância de, respectivamente, 5% e 1%, quanto a área média de seca moderada; iii) entre Sertão e Zona da Mata, Agreste e Sertão, ao nível de significância de 1% , quanto a área média de seca severa; iv) entre Sertão e Zona da Mata, Agreste e Sertão, ao nível de significância de, respectivamente, 1% e 0,1%, quanto a área média de seca extrema; e v) para a seca total não há evidência para diferença estatística entre as regiões.

### 5.2.2.3 Análise de tendência

A [Figura 27](#) apresenta as séries de área afetada pela seca para o estado de Pernambuco, para a escala sazonal (SPI-3) e para a escala anual (SPI-12). Para a escala anual (SPI-12), todas as séries de área afetada pela seca apresentaram tendência significativa, ao nível de significância 0,01%, para os tipos de seca total, moderada e severa, e 0,1%, para os tipos leve e extrema. Verificou-se também que menor é a magnitude da tendência das secas mais graves. A séries de área afetada pela seca com maior magnitude foi a do tipo de seca total.

Figura 27 – Séries de área afetada pelo tipo de seca nas escalas anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3). Os símbolos "\*\*\*\*", "\*\*\*\*", "\*\*\*\*" e "\*\*\*\*" indicam que há tendência significativa entre as regiões ao nível de significância, respectivamente, de 5%, de 1%, de 0,1% e 0,01%. A sigla "ns" significa que o resultado do teste é não significativo.



Fonte: Elaboração própria

Na escala sazonal (SPI-3), todas as séries de área afetada das estações do outono, inverno e primavera apresentaram evidência para presença de tendência significativa e positiva. No inverno, as séries de área afetada dos tipos de seca total, leve e severa, apresentaram tendência significativa ao nível de significância de 1%, da seca moderada ao nível de 0,1% e da seca extrema a 5%. No outono, os resultados do teste Mann-Kendall para as séries da área afetada foram significativos ao nível de 5% (seca extrema), 1% (seca total, leve e severa) e 0,1% (seca moderada).

O verão foi a estação que apresentou resultados com significância estatística a 5%, para as secas total, moderada e extrema; e a 1% para a seca severa. A seca leve não apresentou resultado para presença significativa de tendência.

A estação do inverno apresentou o maior crescimento de área afetada, para os tipos de seca total, leve e moderada. Na estação do outono, a série de área afetada que apresentou maior crescimento ao longo dos anos, após a seca total, foi a seca moderada. Após a estação do verão, a estação da primavera foi a apresentou menores magnitudes de tendência de área afetada, principalmente para a seca extrema. Os resultados apontam para uma crescimento da abrangência das secas ao longo dos anos e em todas as estações do ano, em Pernambuco.

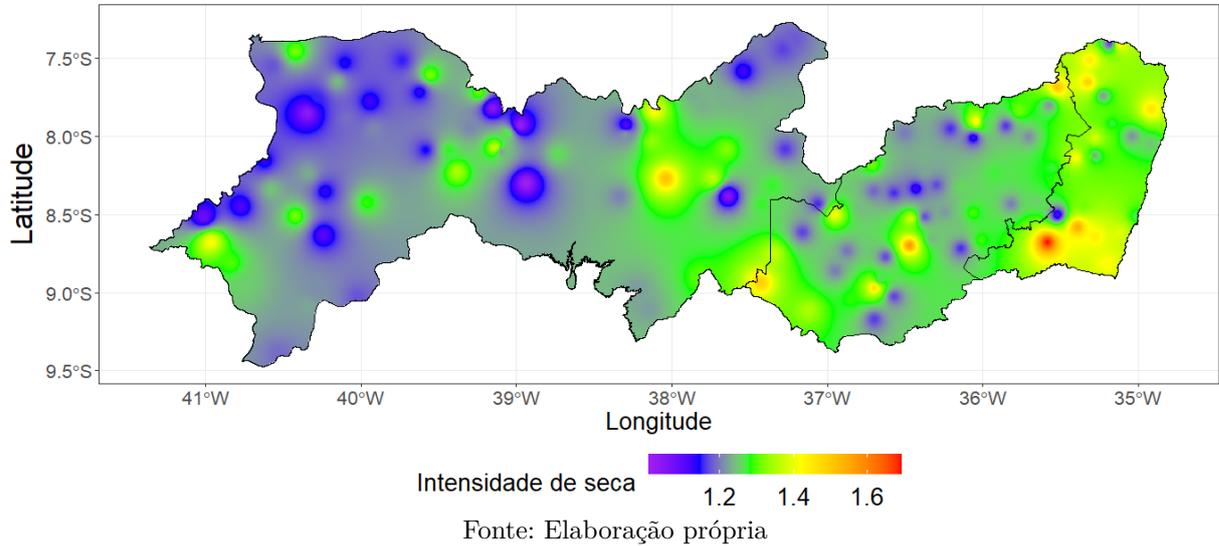
## 5.2.3 Intensidade de seca

### 5.2.3.1 Escala anual – Indicador SPI-12

Durante o período de 1962 a 2012, a intensidade de seca total anual (SPI-12) no Sertão apresentou variação entre 1,008 (seca moderada) e 1,511 (seca severa), com média de 1,215 (seca moderada); no Agreste pernambucano variou entre 1,115 e 1,572, com média de 1,260; e na Zona da Mata a variação entre 1,110 e 1,691, e média de 1,351. Em todas as regiões as variações ocorreram entre secas moderada e secas severa.

Na [Figura 28](#), a intensidade de seca total apresenta maior concentração ao sul da Zona da Mata, próximo da divisa com o Agreste, e também ao norte da Zona da Mata. Também ocorrem concentrações no centro do Agreste e ao sul na divisa com o Sertão. O Sertão pernambucano, ao longo do seu território, apresentam baixas concentrações de intensidade de seca total, principalmente ao centro e no oeste, porém com intensidade mais elevada ao leste do Sertão. A medida que desloca-se do Sertão até a Zona da Mata, próximo do litoral, a intensidade de seca torna-se mais intensa.

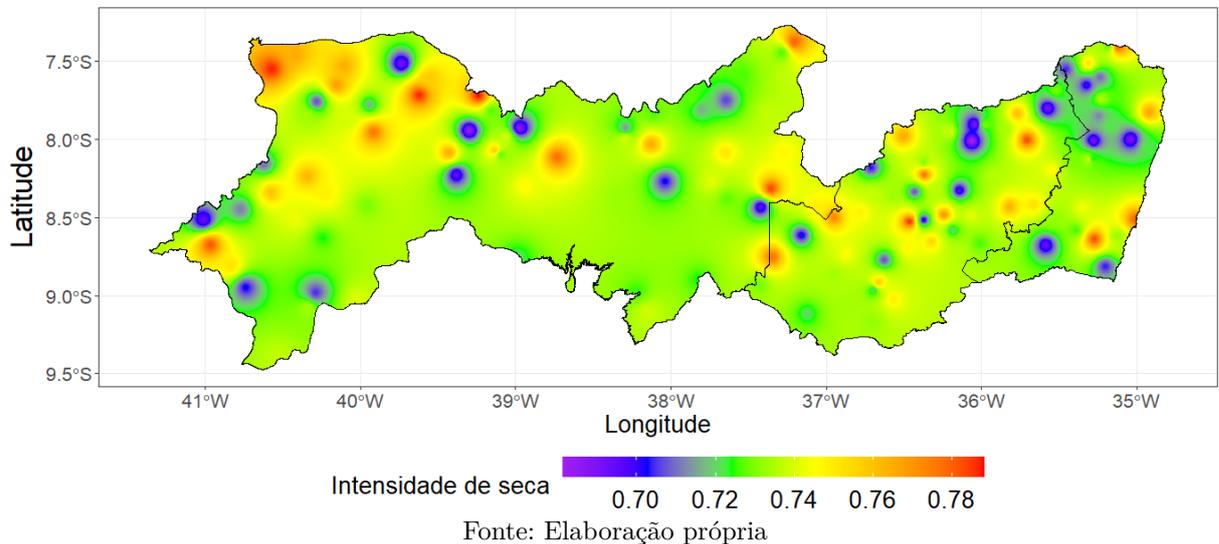
Figura 28 – Distribuição espacial da intensidade de seca total anual (SPI-12) em Pernambuco e regiões



A intensidade de seca leve variou entre o valor mínimo de 0,681 e o máximo de 0,788, com média de 0,735. No Sertão, a variação foi entre 0,685 e 0,788, com média de 0,736. No Agreste, entre 0,681 e 0,786, média de 0,736. Na Zona da Mata, entre 0,690 e 0,782, média de 0,73.

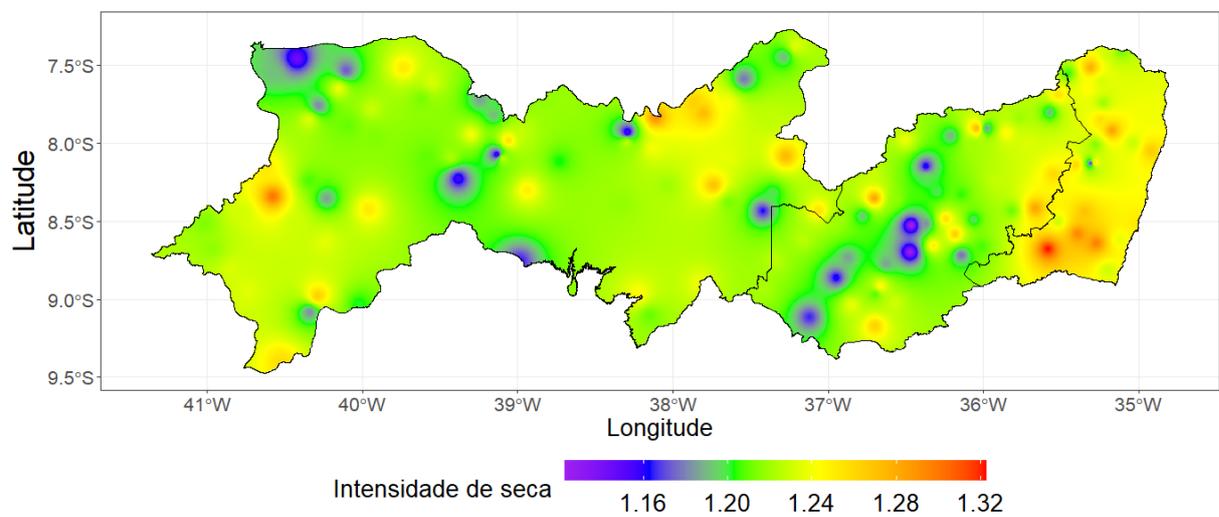
Na Figura 29, a distribuição da intensidade de seca leve anual apresenta-se ao longo do território pernambucano, mais no noroeste, parte do centro e nordeste do Sertão. No Agreste, no centro e no oeste da região. Na Zona da Mata, a intensidade de seca apresentou valores mais elevados no sul e no norte. Valores baixos de intensidade de seca leve podem ser observados no norte do Sertão, norte do Agreste e da Zona da Mata.

Figura 29 – Distribuição espacial da intensidade de seca leve anual (SPI-12) em Pernambuco e regiões



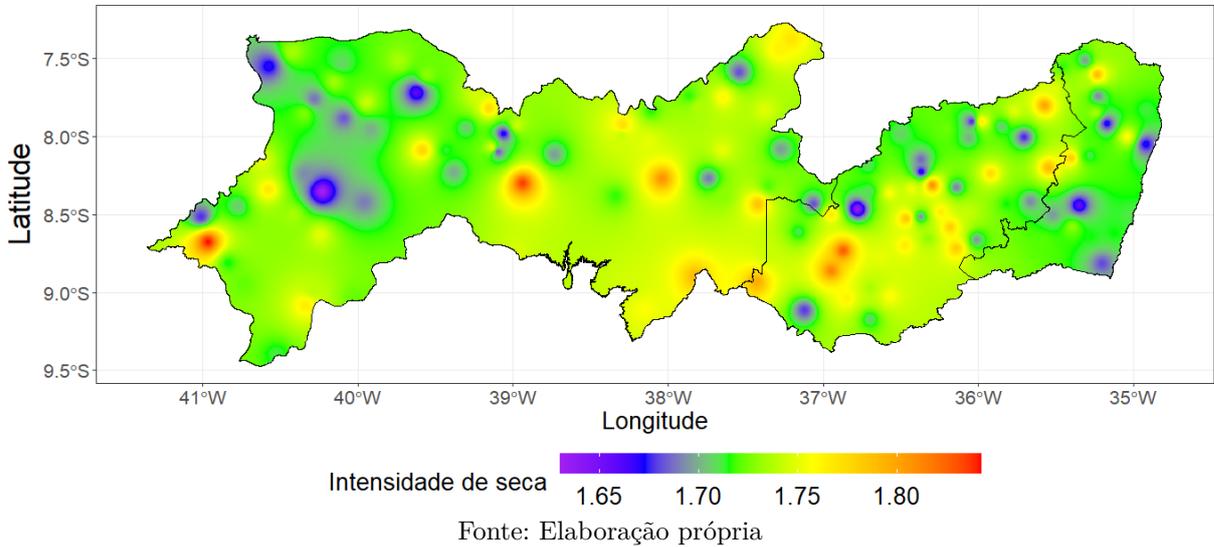
A intensidade de seca moderada variou entre 1,120 e 1,320, com média 1,223. No mapa da [Figura 30](#) é apresentada a distribuição espacial da intensidade de seca moderada, onde no Sertão pernambucano as maiores concentrações ocorrem no sudoeste e nordeste. No Agreste há no centro da região dois pontos onde a intensidade é a mais baixa e todo território pernambucano. Destaque para o sul da Zona da Mata, onde ocorrem valores mais alto de intensidade da seca moderada.

Figura 30 – Distribuição espacial da intensidade de seca moderada anual (SPI-12) em Pernambuco e regiões



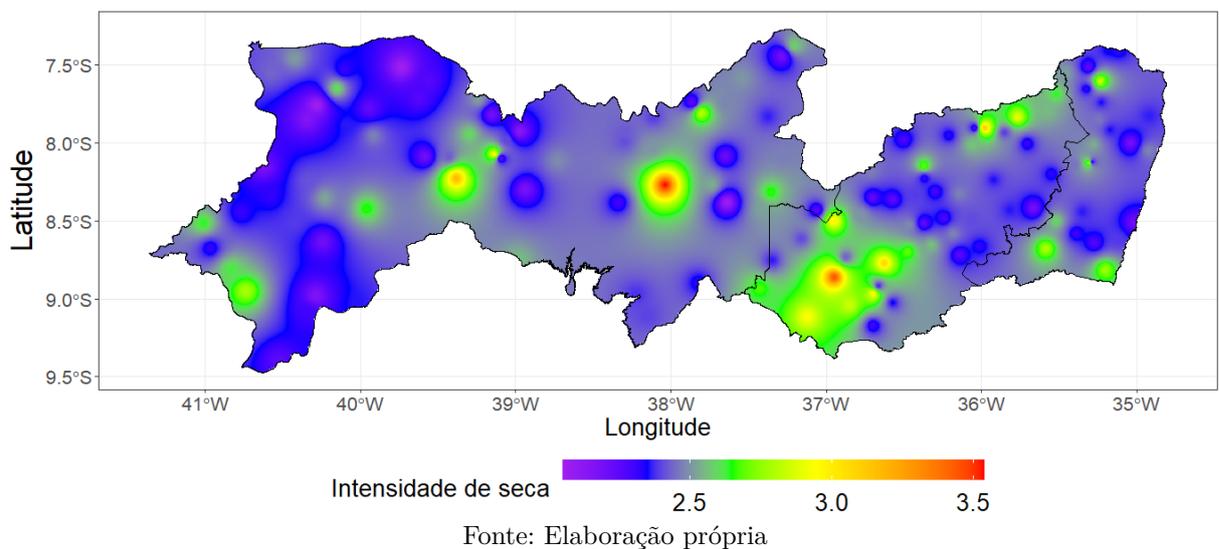
A intensidade severa variou entre 1,630 e 1,843, com média de 1,730. No Sertão pernambucano, a intensidade de seca severa foi mais presente no extremo oeste e no centro-leste da região. Na região Agreste, no centro e no sul a intensidade severa é mais presente, assim como no norte, na divisa com a Zona da Mata ([Figura 31](#)).

Figura 31 – Distribuição espacial da intensidade de seca severa anual (SPI-12) em Pernambuco e regiões



A intensidade de seca extrema variou entre 2,052 e 3,537, com média de 2,450. A distribuição da intensidade de seca severa apresentou mais gravidade ao leste do Sertão. No Agreste, valores maiores foram identificados ao sudoeste da região. Em comparação com as outras regiões, a Zona da Mata apresentou valores de intensidade menores (Figura 32).

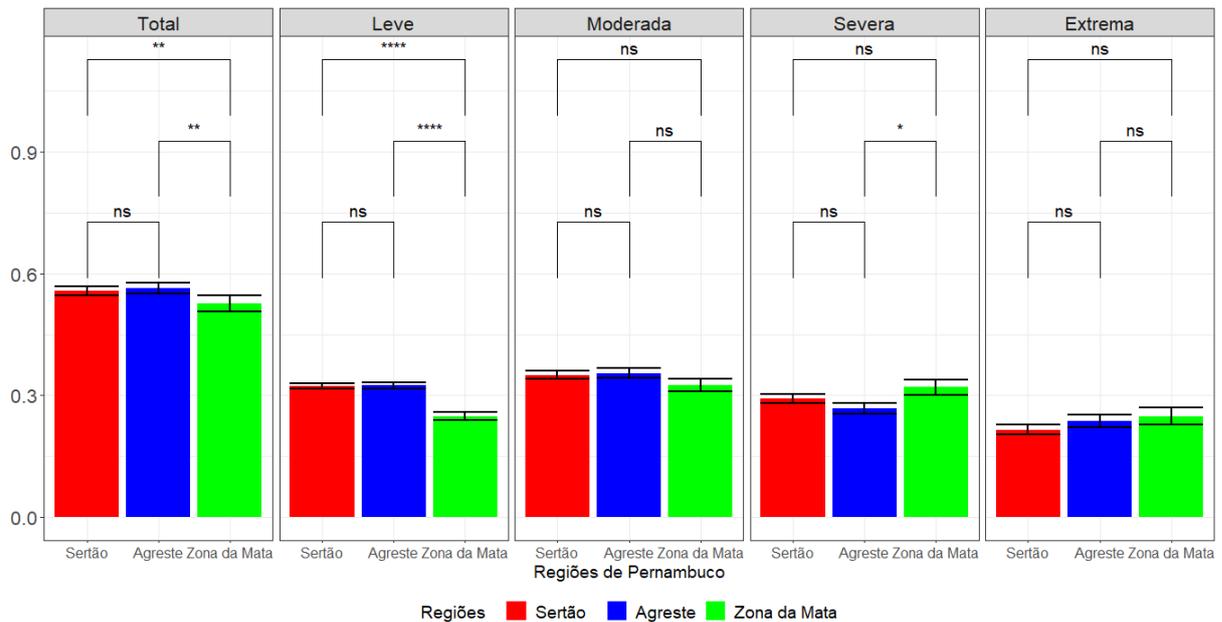
Figura 32 – Distribuição espacial da intensidade de seca extrema anual (SPI-12) em Pernambuco e regiões



Na Figura 33 estão os resultados para o teste Wilcoxon-Mann-Whitney, para identificar se há diferença estatística entre as intensidades de seca entre as regiões e por tipo de seca. Para seca leve e seca total, os resultados apontam que há evidência para diferença estatística entre os valores de intensidade do Agreste e a Zona da Mata e entre as médias de intensidade Sertão e a Zona da Mata. Para seca moderada e extrema, os

resultados apontam que não há diferença estatística entre os valores de intensidade em todas as regiões de Pernambuco. Para seca severa há diferença entre as intensidades do Agreste a Zona da Mata de Pernambuco.

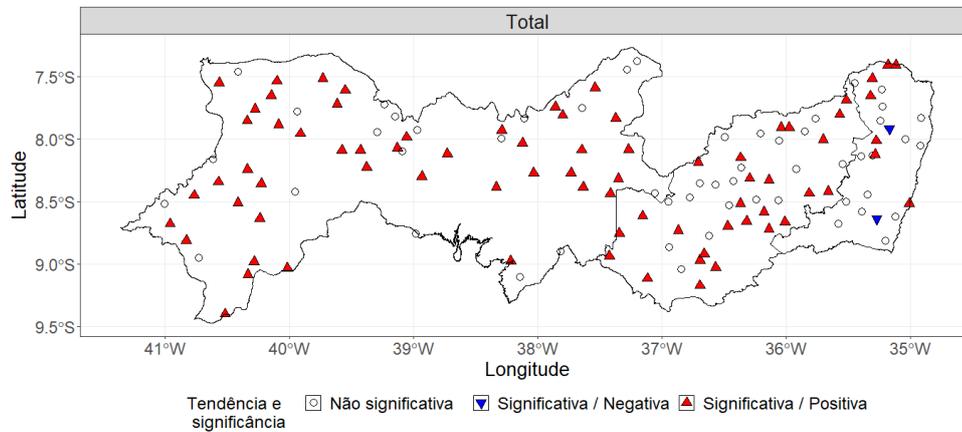
Figura 33 – Resultado do teste Wilcoxon-Mann-Whitney para intensidade de seca anual. Os símbolos "\*", "\*\*", "\*\*\*" e "\*\*\*\*" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa.



Fonte: Elaboração própria

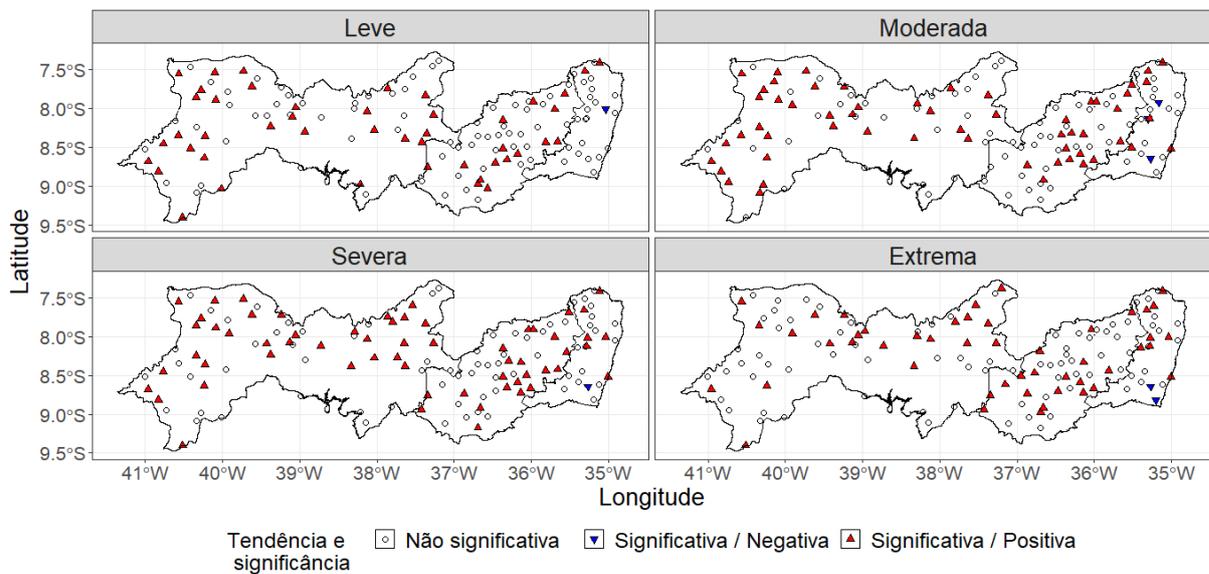
A distribuição espacial das tendências na intensidade sazonal de seca é apresentada na [Figura 34](#) para a seca total e na [Figura 35](#) para as categorias leve, moderada, severa e extrema. Os triângulos que apontam para cima representam tendência positiva (aumento na intensidade de seca) e os que apontam para baixo, informam sobre tendência negativa (diminuição na intensidade de seca). Triângulos preenchidos indicam que a tendência é significativa.

Figura 34 – Tendência e significância estatística das séries de intensidade anual de seca total para cada estação pluviométrica do estado de Pernambuco.



Fonte: Elaboração própria

Figura 35 – Tendência e significância estatística das séries de intensidade anual de seca nas categorias leve, moderada, severa e extrema.

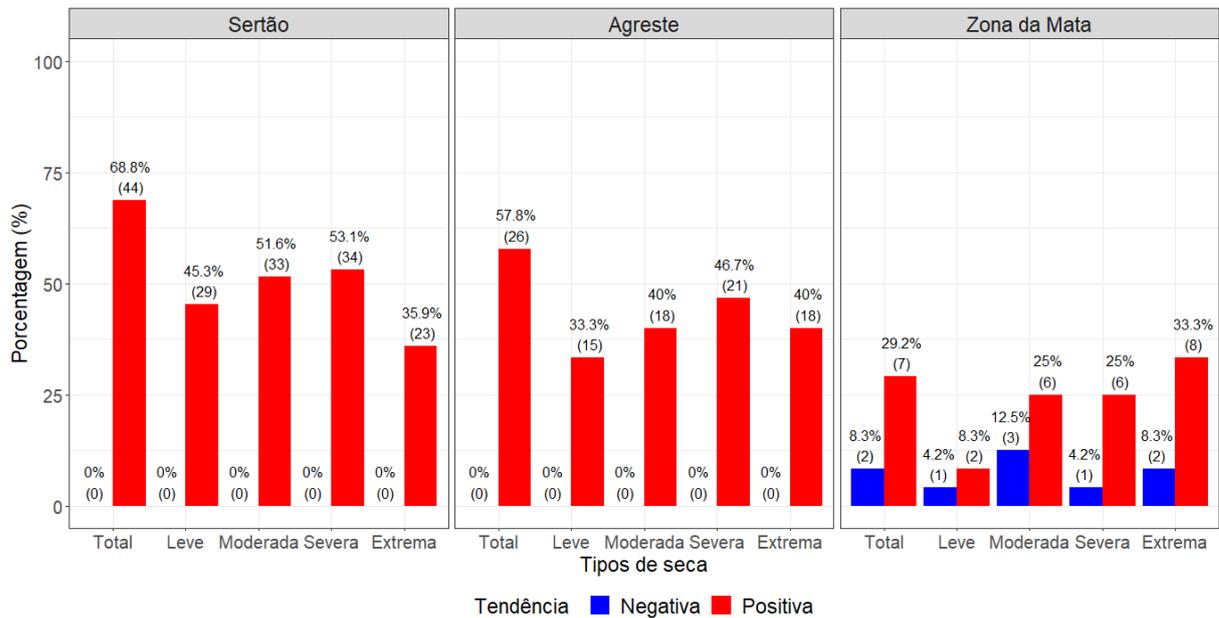


Fonte: Elaboração própria

Na [Figura 36](#) é mostrada a proporção de estações pluviométricas que apresentaram intensidade com tendência significativa por região de Pernambuco para cada tipo de seca. Os resultados mostraram-se bastante semelhantes com os da [Figura 11](#). O Sertão pernambucano, com 64 estações, apresentou maiores proporções das estações com tendência significativa para as secas moderadas e severas. O Agreste apresentou proporções maiores para as secas severas e extremas. A Zona da Mata foi a única região que apresentou, para todos os tipos de seca, tendência negativas e significativas para intensidade de seca.

Semelhante a frequência anual, a medida que a gravidade da seca aumenta, mais estações apresentam tendência significativa para intensidade de seca. A proporção das secas leve, moderada, severa e total foram maiores no Sertão de Pernambuco, enquanto a seca extrema apresentou uma proporção maior de estações com tendência significativa no Agreste.

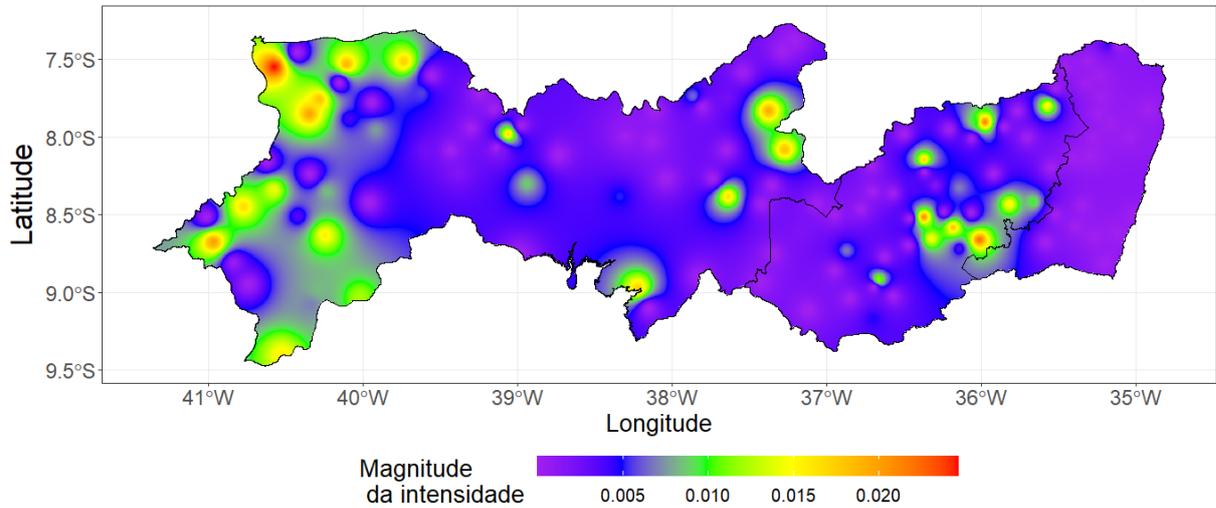
Figura 36 – Proporção de estações pluviométricas que apresentaram tendência significativa para a intensidade anual de seca (total e por categoria) em cada região do estado (Sertão, Agreste e Zona da Mata).



Fonte: Elaboração própria

As magnitudes de tendência da intensidade de seca total (Figura 37), apresentaram-se mais expressivas no oeste e leste do Sertão e ao leste do Agreste, assim como para frequência de seca total. Para a Zona da Mata, os valores de magnitude de seca foram os menores, quase não se destacando no mapa.

Figura 37 – Distribuição espacial da magnitude das tendências da intensidade anual de seca total.

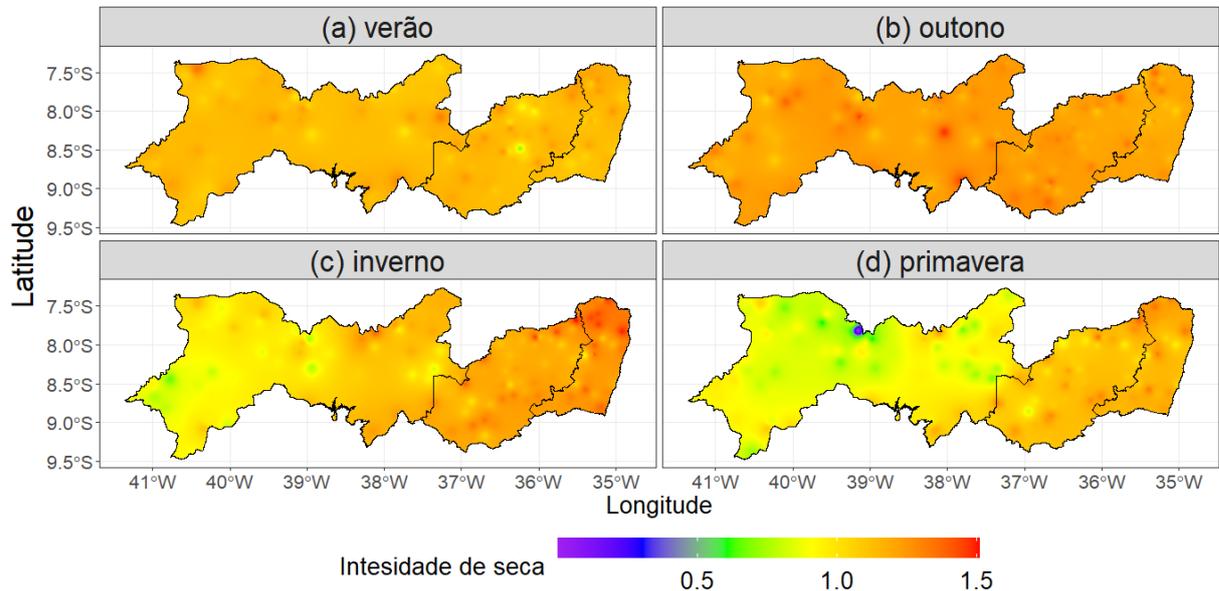


Fonte: Elaboração própria

#### 5.2.3.2 Escala sazonal – Indicador SPI-3

A [Figura 38](#) apresenta a distribuição espacial das intensidades de seca total para cada estação do ano do ano. Na estação do verão a distribuição espacial apresentou algumas concentrações mais elevadas de intensidade de seca ao norte do Sertão, em diversos pontos ao centro do Agreste e ao norte da Zona da Mata. Há um ponto de intensidade baixa no centro do Agreste. Na estação do outono, a intensidade de seca total foram mais elevadas na região do Sertão, ao sul do Agreste e no norte da Zona da Mata. A diferença entre as intensidade de seca tornam-se mais perceptíveis nas estações do inverno e da primavera. No inverno, o oeste do Sertão apresentou intensidades menores, mas tornam-se mais intensas a medida que desloca-se para o litoral, principalmente ao norte no Agreste e da Zona da Mata. Na estação da primavera, o Sertão pernambucano apresenta menores valores de intensidade de seca total, comparado com das outras estações e outras regiões, além de haver um ponto de ao norte com baixa intensidade. Os maiores valores de intensidade distribuem-se pelo Agreste e Zona da Mata, principalmente ao norte dessas regiões.

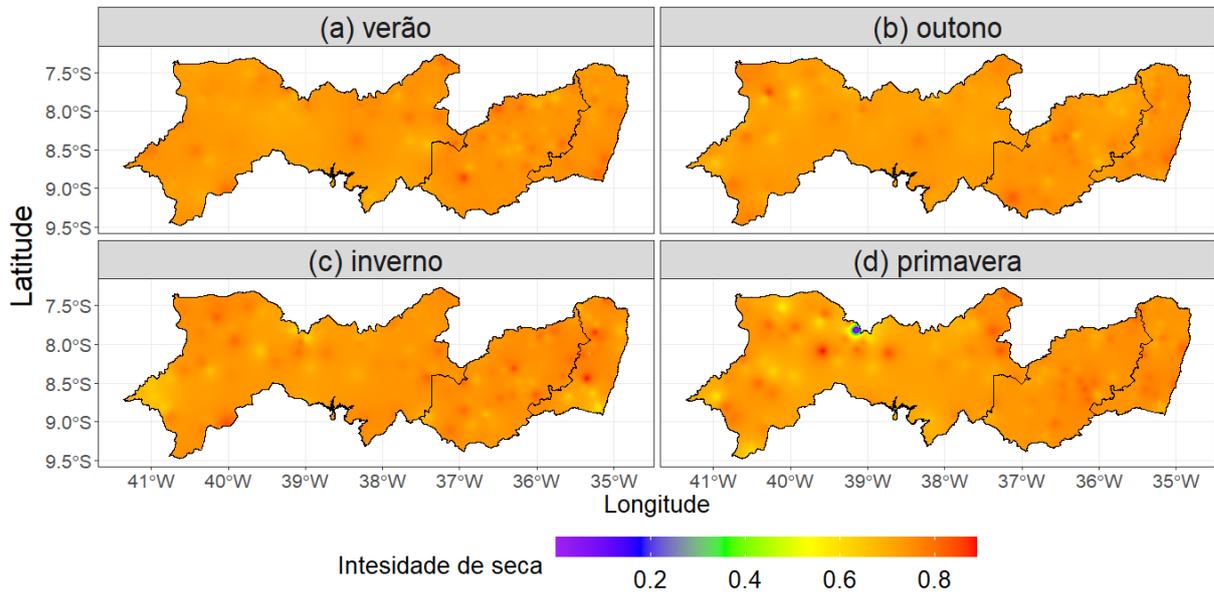
Figura 38 – Distribuição espacial das tendências da intensidade sazonal de seca total para cada estação do ano.



Fonte: Elaboração própria

Na [Figura 39](#) é mostrada a distribuição espacial da intensidade de seca leve entre as estações do ano. Na estação do verão, há a ocorrência de baixas intensidades de seca leve na parte centro-oeste, sul e leste do Sertão, no centro e no norte do Agreste e norte da Zona da Mata, enquanto que há pontos de maior intensidade ocorrendo no sul e norte do Agreste pernambucano e no sul da Zona da Mata. No outono, há presença de pontos de baixa intensidade no oeste do Sertão e no norte e leste do Agreste, enquanto que maiores intensidades são percebidas o noroeste do Sertão, sul e centro do Agreste, e no sul da Zona da Mata. Na estação do inverno, há a ocorrência de intensidades baixas no extremo oeste e ao norte do Sertão, no oeste do Agreste e ao sul da Zona da Mata. Já os maiores valores de intensidade foram percebidos no noroeste e sudoeste do Sertão, ao leste do Agreste e no centro e norte da Zona da Mata. Na primavera, a intensidade distribui-se quase que uniformemente, havendo maiores intensidades de secas no oeste do Sertão e um ponto de intensidade de seca ao norte; já no Agreste, há ocorrências de secas maiores no leste, enquanto que na Zona da Mata, ao sul.

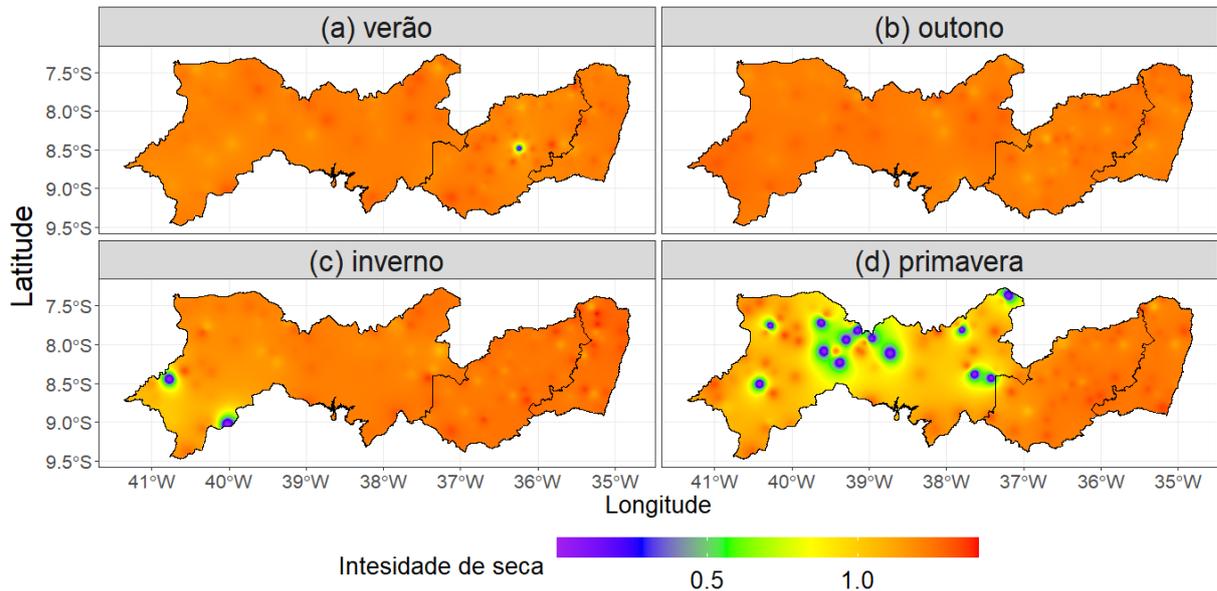
Figura 39 – Distribuição espacial da intensidade sazonal de seca leve para cada estação do ano.



Fonte: Elaboração própria

Na [Figura 40](#), a grande parte dos mapas apresentam, nas regiões, uma distribuição espacial bem semelhante, principalmente entre as estações do verão, outono e inverno. Os destaques das intensidade de seca moderadas são a presença de pontos de baixa intensidade de seca; como, por exemplo, na estação do verão, onde ocorre no centro do Agreste, enquanto no restante da região e nas outras, as intensidades apresentaram-se bem elevadas. No outono, todo o mapa mostrou intensidade de seca moderada alta. A estação do inverno, semelhantemente ao verão e outono, também apresentou intensidades altas, com exceção no oeste do Sertão, onde ocorrem dois pontos de baixa intensidade de seca moderada. Por fim, na estação da primavera, a região do Sertão chama a atenção pela presença de vários pontos de ocorrência de baixa intensidade de seca moderada, principalmente, do centro para o oeste da região; enquanto que o Agreste e a Zona da Mata, a intensidade apresentou valores altos.

Figura 40 – Distribuição espacial da intensidade sazonal de seca moderada para cada estação do ano.

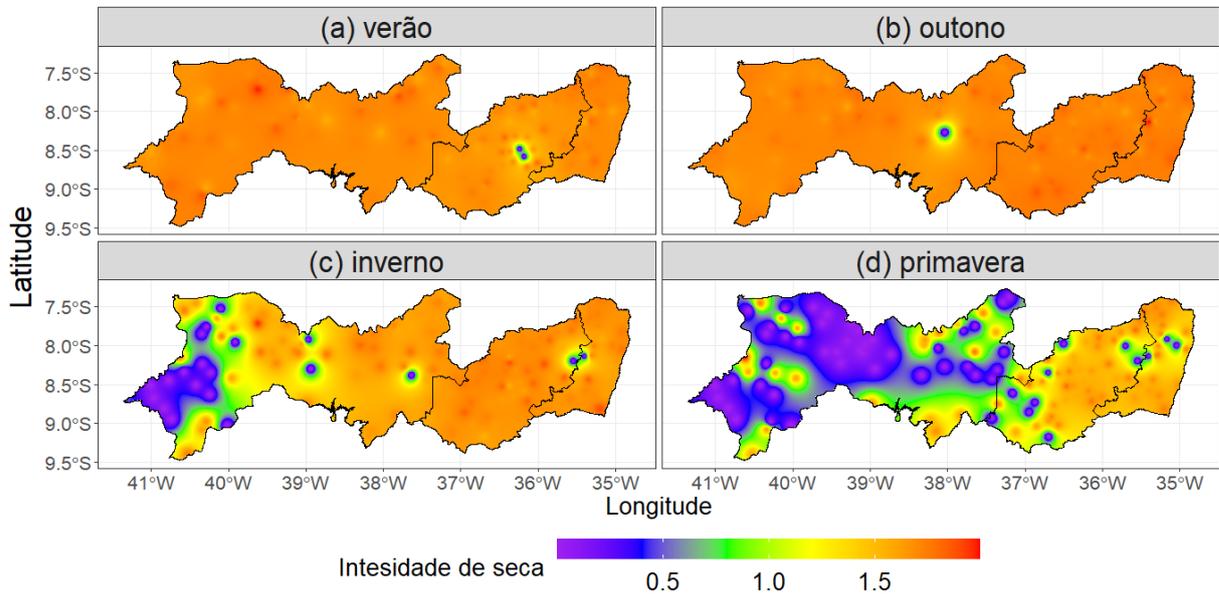


Fonte: Elaboração própria

Na [Figura 41](#) há a interpolação espacial da intensidade de seca por estação do ano. A estação do verão mostrou-se com intensidade de seca alta em todas as regiões de Pernambuco, no noroeste do Sertão; entretanto há a ocorrência de dois pontos no centro-leste da região do Agreste onde a intensidade de seca severa é baixa. Na estação do outono, a distribuição espacial da intensidade de seca severa é similar ao que ocorre na estação do verão, porém com intensidade maior no sul do Agreste e oeste da Zona da Mata. Além disso, destaca-se um ponto de baixa intensidade de seca severa ao leste do Sertão.

No inverno, o Agreste e a Zona da Mata foram as regiões que apresentaram maior intensidade de seca severa, ocorrendo um ponto de baixa intensidade na divisa dessas regiões. A região do Sertão, por sua vez, apresentou em seu oeste uma área considerável de baixa intensidade de seca e alguns pontos onde as estações pluviométricas também apresentaram baixa intensidade de seca ao centro e ao leste dessa região. E, na primavera, a região Sertão destaca-se novamente por apresentar uma área ainda maior para baixa intensidade de seca severa ao longo do território. No Agreste e Zona da Mata, a maior parte da área apresentou intensidade de seca severa alta, mas ocorrendo pontos, no oeste e no leste do Agreste e norte da Zona da Mata, de baixa intensidade de seca.

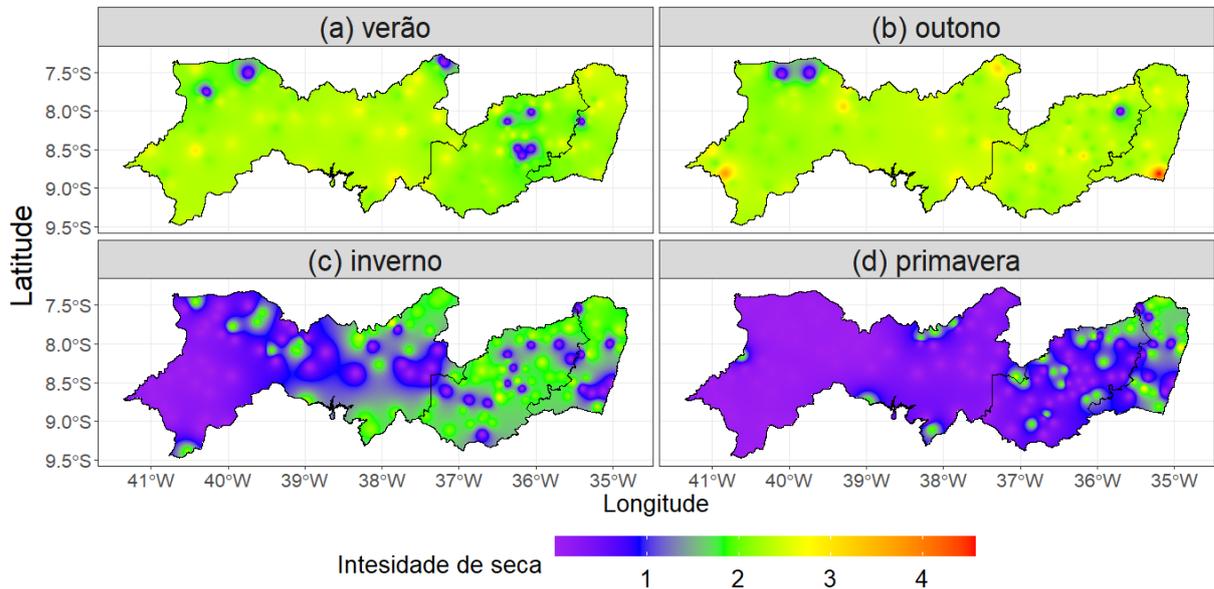
Figura 41 – Distribuição espacial da intensidade sazonal de seca severa para cada estação do ano.



Fonte: Elaboração própria

A Figura 42 mostra a espacialização da intensidade de seca extrema. No verão pernambucano é apresentado que na grande parte do território com presença de intensidade de seca severas em valores intermediários, entretanto destaca-se a ocorrência de pontos de baixa intensidade no norte do Sertão, no centro e no leste do Agreste e no oeste da Zona da Mata. No outono, também possível encontrar novamente áreas de baixa intensidade de seca no noroeste do Sertão e leste do Agreste; já valores mais altos de intensidade podem ser observados no sudoeste do Sertão e, principalmente, no sul da Zona da Mata. As estações do inverno e primavera destacam-se pela presença de uma considerável área do território pernambucano com baixa intensidade de seca extrema. No inverno, a maior parte da área do Sertão mostrou-se com baixa intensidade, ocorrendo em vários pontos no Agreste e ao sul da Zona da Mata. Na primavera, praticamente todo território do Sertão apresentou baixa intensidade de seca severa; no Agreste, a maior parte de sua área mostrou baixa intensidade desse tipo de seca, com exceção de algumas áreas no centro e ao norte. Na Zona da Mata, a intensidade de seca foi maior no norte e ao sul.

Figura 42 – Distribuição espacial da intensidade sazonal de seca extrema para cada estação do ano.



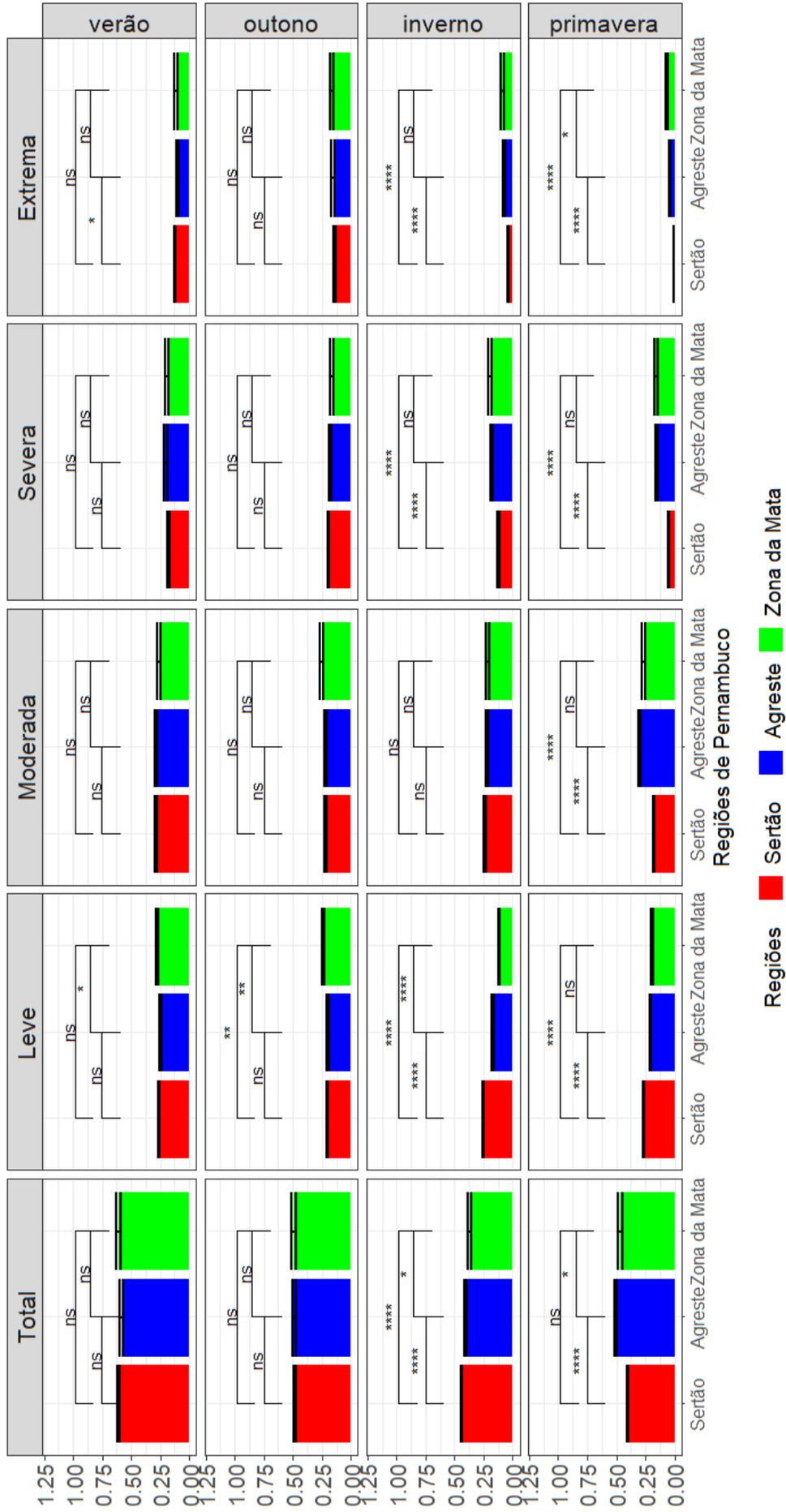
Fonte: Elaboração própria

Na [Figura 43](#) estão os resultados do teste Wilcoxon-Mann-Whitney para analisar se as intensidades de secas (por tipo de seca e por estação do ano) possuem diferença estatística entre as regiões de Pernambuco. Os resultados do verão apresentaram diferença estatística entre as médias de intensidades de seca leve entre as regiões do Agreste e da Zona da Mata, e entre as médias das regiões do Sertão e do Agreste, para seca extrema.

Para o outono, o teste identificou diferença estatística entre as médias de intensidade entre o Agreste e a Zona da Mata, e entre as regiões do Sertão e Zona da Mata. (apenas seca leve). Na estação do inverno, há evidência para diferença estatística entre as médias de intensidade entre todas as regiões, para seca total e leve; e entre as regiões do Sertão e Zona da Mata, e entre as regiões do Sertão e do Agreste, para secas severas e extremas.

Na primavera, os resultados são, em sua maioria, significativos para a existência de diferença estatística entre as médias de intensidade do Sertão e Agreste e as regiões do Sertão e Zona da Mata (para os tipos de seca leve, moderada e severa). Diferença estatística entre as médias de intensidade de todas as regiões para a seca extrema. E, para seca total, há diferença estatística entre as médias de intensidade das regiões do Sertão e Agreste e as regiões do Agreste e Zona da Mata.

Figura 43 – Resultados do teste Wilcoxon-Mann-Whitney para a intensidade de seca sazonal nas regiões Sertão, Agreste e Zona da Mata. Os símbolos "\*", "\*\*", "\*\*\*", "\*\*\*\*" e "\*\*\*\*\*" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa.



Fonte: Elaboração própria

Na [Figura 44](#) estão as representações das tendências e significância estatística das séries de intensidade de seca para as estações pluviométricas distribuídas pelo estado de Pernambuco. Assim como para as frequências sazonais, as secas severa e extrema foram as que menos apresentaram resultados para identificar qual a tendência das séries de intensidade de seca.

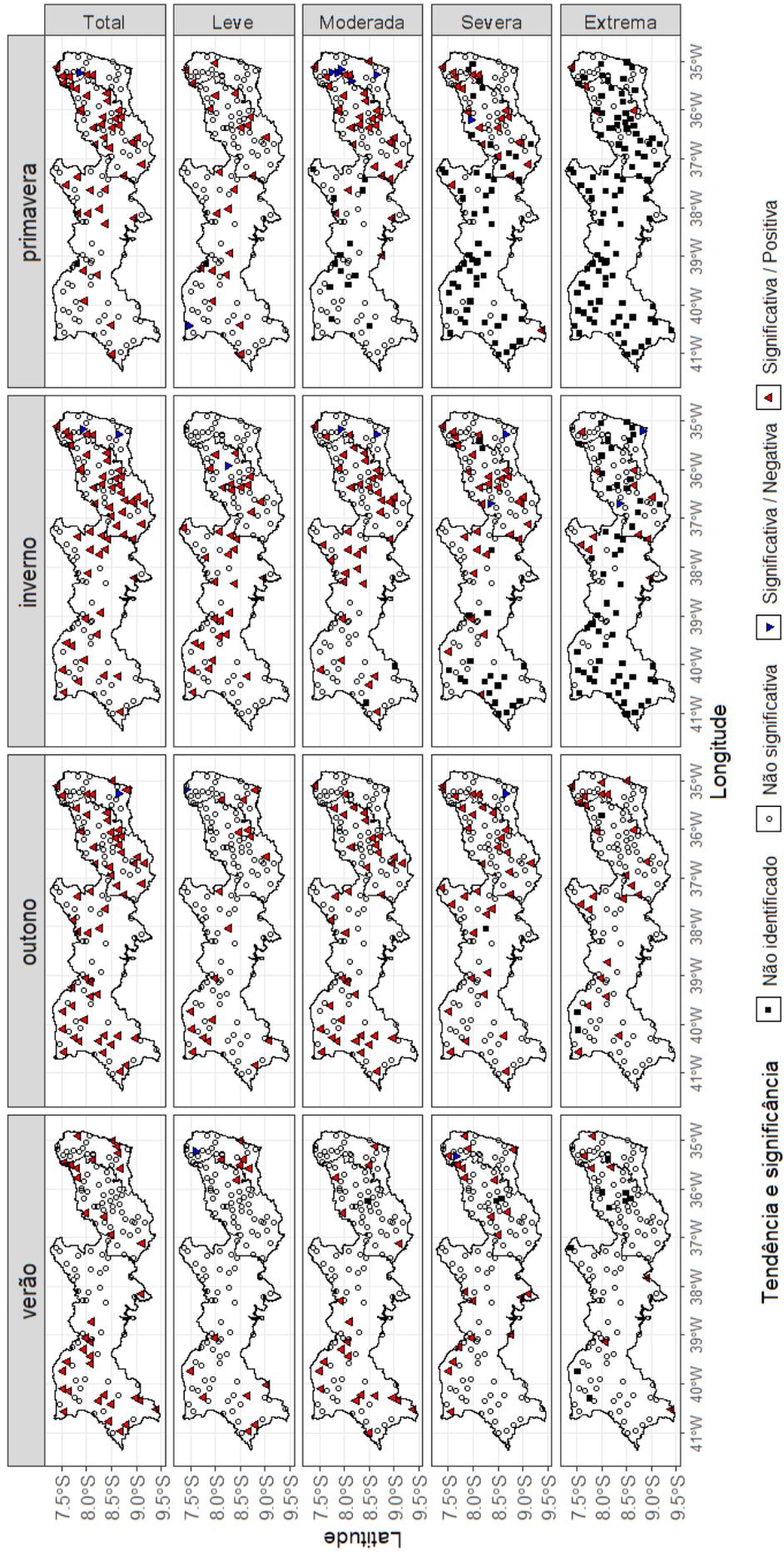
Na [Figura 45](#) estão as proporções de estações pluviométricas que apresentaram tendências significativas para as séries de intensidade. As proporções foram calculadas por tipo de seca, por região e por estação do ano.

O Sertão apresentou a maior proporção de estações com tendência significativa para intensidade de seca leve no inverno, enquanto todas as outras categorias de seca, as maiores proporções na estação do outono. Todos os tipos de secas em todas as estações do ano apresentaram proporções com tendência positiva, com exceção do tipo seca leve na primavera, onde uma pequena proporção de estações (1,6%) mostrou tendência negativa.

No Agreste de Pernambuco, os tipos de secas leve, severa e total apresentaram maiores proporções de tendências significativas das séries de intensidade de seca para a estação do inverno, enquanto que para o tipo de seca moderada as maiores proporções de estações significativas ocorreram durante a primavera e em seguida no inverno. O tipo de seca extrema apresentou tendência de intensidade significativa com mais ocorrências na estação do outono e, em seguida, no inverno. Ressalta-se a presença de proporção de estações pluviométricas com tendência negativa no inverno e na primavera.

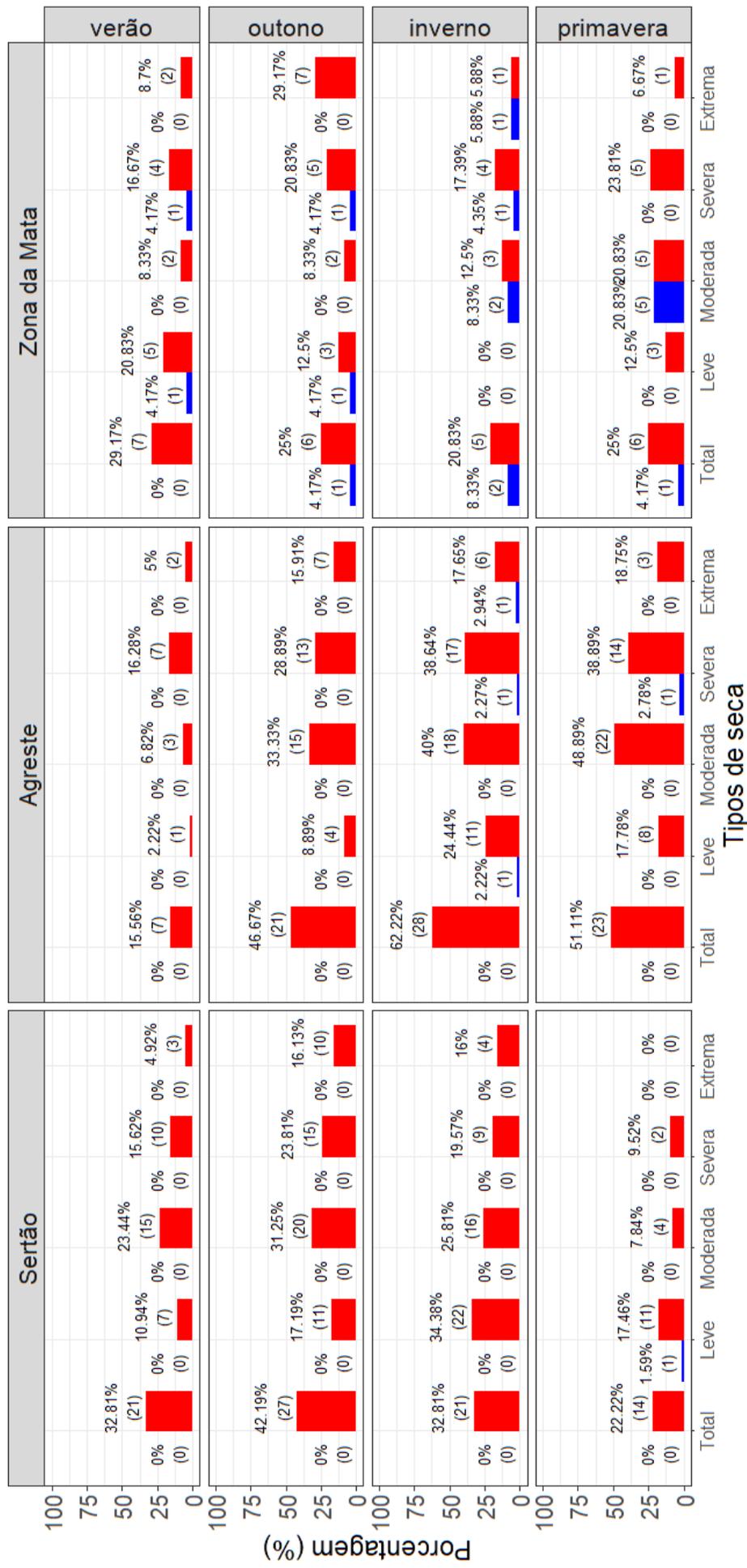
Na Zona da Mata de Pernambuco, as secas do tipo leve apresentaram maiores proporções de tendência significativa para intensidade de seca no verão, as do tipo moderadas mostrou maior proporção na primavera, enquanto que secas do tipo severa e extrema apresentaram maiores proporções no outono pernambucano. E por fim, o tipo seca total teve maiores proporções de estações com tendência significativa no verão e no outono. A Zona da Mata foi a única região que apresentou proporções com tendência negativa em todas as estações do ano.

Figura 44 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para as intensidades sazonais de seca (total e por categoria) para cada estação pluviométrica.



Fonte: Elaboração própria

Figura 45 – Proporção de estações pluviométricas com tendência significativa para intensidade sazonal de seca (total e por categoria) para cada estação do ano.



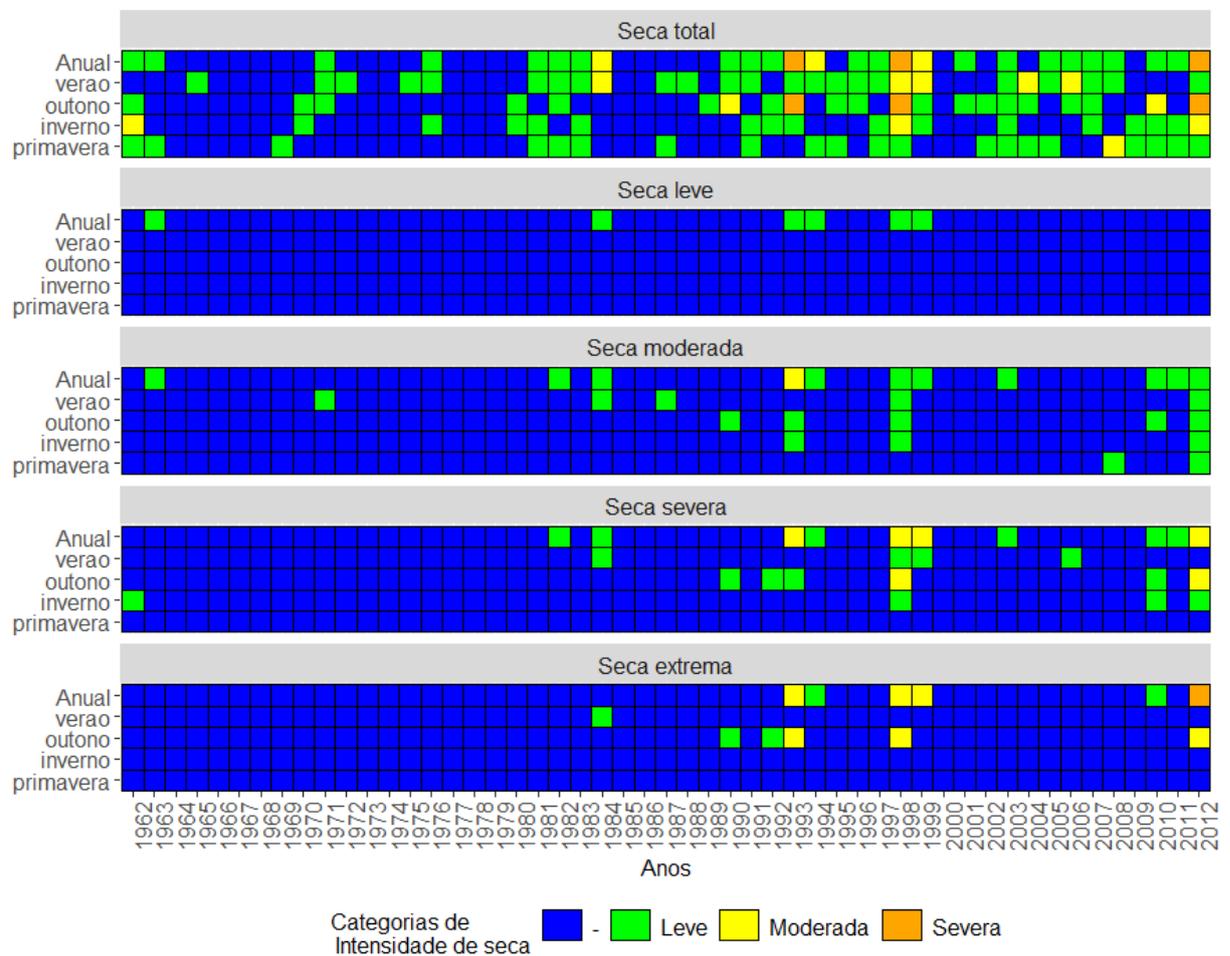
Tendência ■ Negativa ■ Positiva

Fonte: Elaboração própria

### 5.2.3.3 Intensidade média de seca

Conforme a [Figura 46](#), para as secas leve, moderada, severa e extrema, em média, há maior ocorrência de eventos que não caracterizam secas, com exceção da década de 1990 e no final da série em que há intensidades leves, moderadas e severas. Para a seca total, há mais eventos de intensidade leve e alguns moderados, enquanto os eventos severos ocorrem na escala anual e no outono, mais especificamente, nos anos de 1993, 1998 e 2012, sendo anos de intensas secas no Nordeste ([MARENGO et al., 2017](#)). Não há ocorrência de eventos de intensidade extrema.

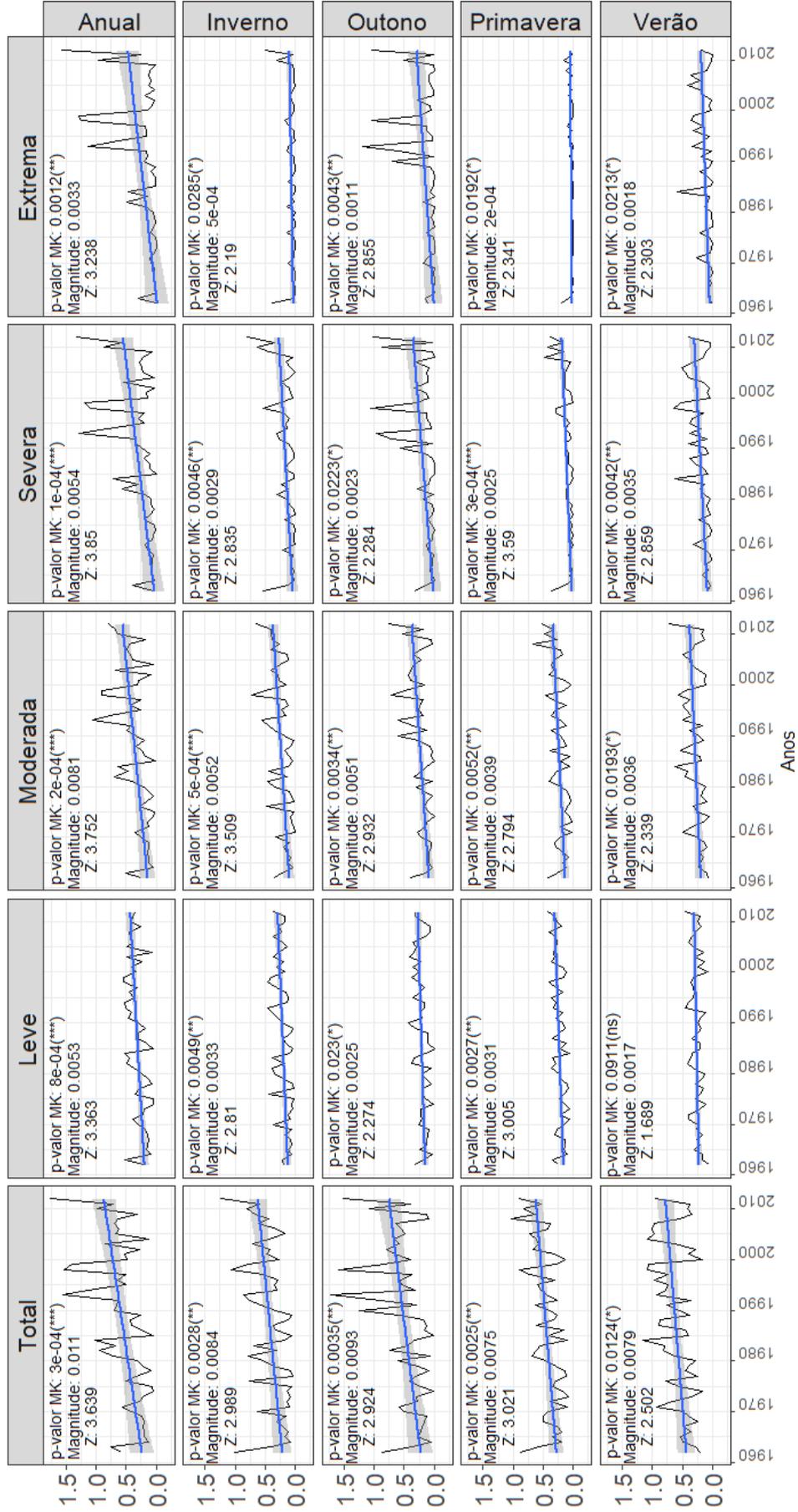
Figura 46 – Intensidade média de seca (total e por categoria) nas escalas anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3).



Fonte: Elaboração própria

Conforme a [Figura 47](#), com exceção da seca leve no verão, todas as séries de intensidade média apresentaram tendências positivas significativas ao nível de significância de 5%.

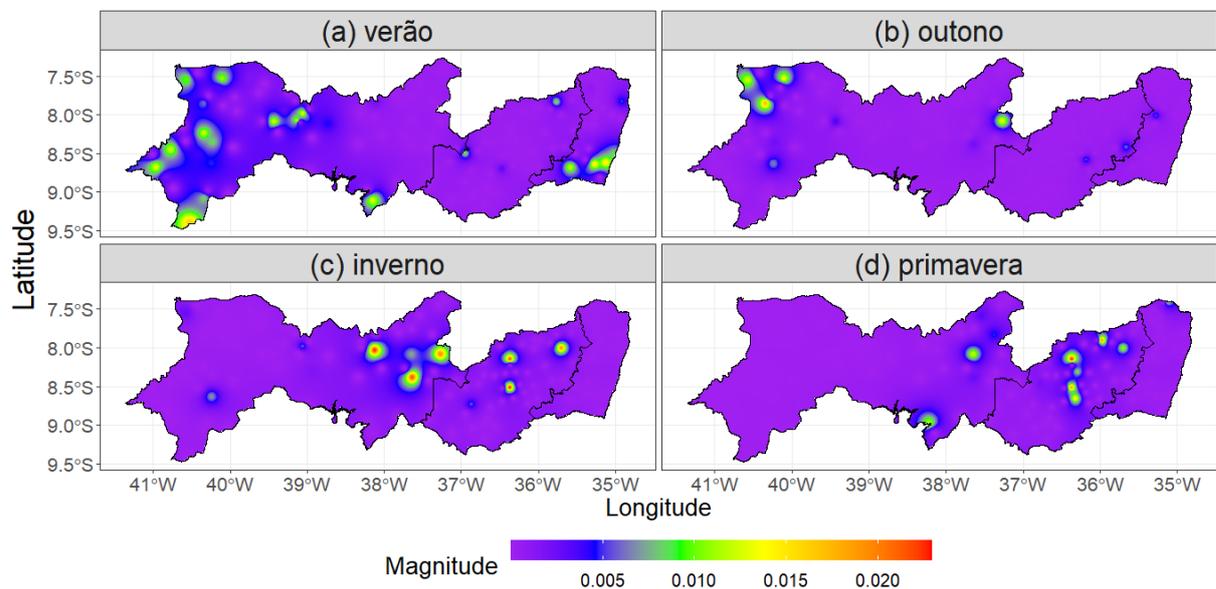
Figura 47 – Séries de intensidade média de seca nas escalas anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3) e Total. Os símbolos "\*", "\*\*", "\*\*\*", "\*\*\*\*" e "\*\*\*\*\*" correspondem aos níveis de significância 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente. A sigla "ns" indica diferença estatística não significativa.



Fonte: Elaboração própria

A magnitudes das tendências das intensidades, [Figura 48](#), de seca total foram mais intensas no oeste e no sul do Sertão, e no sul da Zona da Mata, na estação do verão. Para a estação do outono, as magnitudes destacam-se mais no noroeste do Sertão e em uma pequena região no leste do Sertão. No inverno, as magnitudes foram mais presentes no leste do Sertão e em pontos no centro-norte do Agreste. Na primavera, no leste do Sertão e no centro-norte do Agreste e no norte da Zona da Mata. Diferente das magnitudes das frequências de seca total sazonal, há mais pontos distribuídos pelo território pernambucano, principalmente no verão.

Figura 48 – Magnitudes das tendências de intensidade de seca total em escala sazonal (SPI-3).



Fonte: Elaboração própria

### 5.3 Análise de regressão entre as características de seca

Nessa seção serão analisadas as relações entre área afetada pela seca e a intensidade média de seca na escala anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3). Na [Tabela 8](#) estão apresentadas as correlações entre as intensidade média de seca e a área afetada pela seca por tipo de seca e por escala.

Todos os valores dos coeficientes de correlação de Pearson apresentaram uma forte relação entre a intensidade média de seca e a área afetada pela seca, principalmente entre as secas mais graves (moderada, severa e extrema). Analisando a seca como um todo, a escala anual apresentou uma relação menor do que os tipos de seca. Na escala sazonal, para a seca em sua totalidade, a primavera foi a estação com maior correlação entre as

características de intensidade e área afetada.

Tabela 8 – Correlação entre intensidade média de seca e área afetada pela seca por tipo de seca e por escala.

	Total	Leve	Moderada	Severa	Extrema
Anual	0.896	0.979	0.989	0.999	0.999
verão	0.972	0.997	0.999	0.999	0.998
outono	0.951	0.996	0.999	0.999	0.998
inverno	0.977	0.998	0.999	0.999	0.998
primavera	0.985	0.997	0.998	0.999	0.998

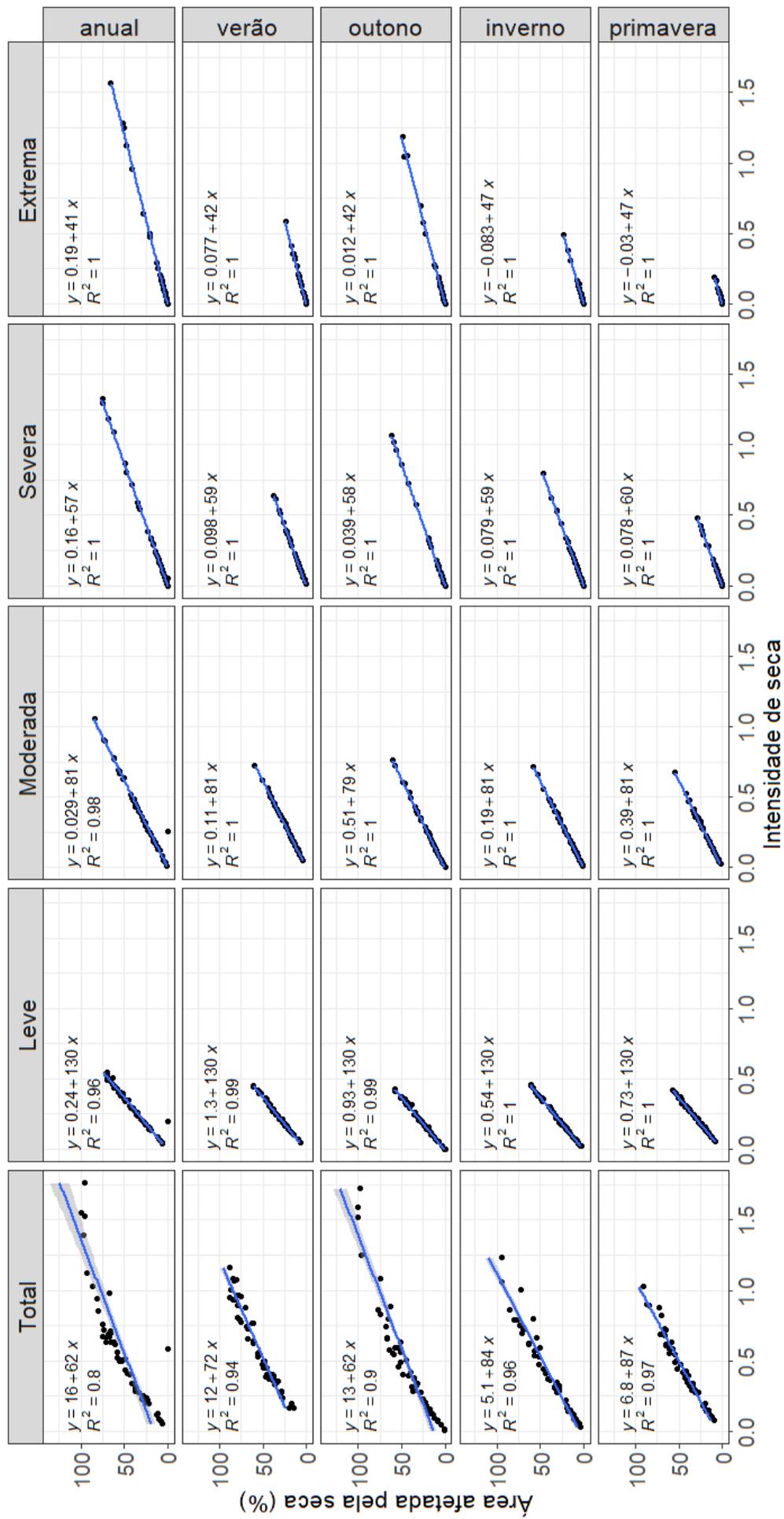
Fonte : Elaboração própria

Na [Figura 49](#) apresenta os gráficos de regressão entre essas duas características de seca para cada escala e tipo de seca com suas respectivas retas de regressão, equações e coeficiente de determinação  $R^2$ .

Para toda as escalas de tempo e tipos de secas foi observada relação positiva entre a intensidade média e área afetada pela seca, ou seja, a medida que há um aumento da intensidade de seca, há um aumento da abrangência espacial desse evento seco. As secas em sua totalidade não apresentam uma relação linear, principalmente na escala anual. Na escala sazonal, a estação em que a relação apresenta-se mais linear é a primavera.

No tipo de seca leve, tanto na escala anual como sazonal, o gráfico de dispersão é mais concentrado, do que nos outros tipos de seca; e a variação de um aumento da intensidade na área afetada é o mesmo. À medida que as secas tornam-se mais graves, as inclinação das retas de regressão diminuem, implicando que a variação de um aumento da intensidade de seca proporciona um aumento menor da abrangência espacial em secas mais graves. Porém, em todos os tipos de seca e em todas as escalas de tempo, eventos secos mais intensos estão relacionadas a uma abrangência espacial maior. Além disso, uma pequeno aumento na intensidade de seca implica em um aumento significativo da proporção de estações que sofrem alguma categoria de seca.

Figura 49 – Gráficos das regressões lineares entre intensidade média de seca e área afetada pela seca na escala anual (SPI-12) e sazonal (SPI-3)



Fonte: Elaboração própria

## 6 Conclusão

Esse trabalho realizou uma análise da dinâmica espacial e temporal das características de seca dos SPI-3 (sazonal) e SPI-12 (anual), para o estado de Pernambuco entre os anos de 1962 a 2012. As séries de SPI-3 e SPI-12 apresentaram, em sua maioria, tendências negativas estatisticamente significativas, indicando que o território pernambucano experimentou escassez de precipitação e períodos com eventos de seca durante os anos analisados. As magnitudes dessas tendências apresentaram valores mais expressivos nas regiões do Sertão e no Agreste de Pernambuco. A partir das séries de SPI sazonal e anual, foi realizada a caracterização dos eventos secos por meio dos indicadores de frequência, área afetada e intensidade.

A frequência de seca em Pernambuco apresentou maiores concentrações no oeste do Sertão e no sul da Zona da Mata. O Sertão apresentou uma frequência média anual (SPI-12) de seca leve maior que as outras regiões, enquanto que as frequências médias das secas moderada, severa e extrema foram maiores na Zona da Mata de Pernambuco. O Sertão também exibiu as maiores proporções de estações com tendência positiva significativa, seguida do Agreste e da Zona da Mata. As magnitudes das tendências da frequência de seca total exibiram valores maiores no oeste do Sertão e ao leste do Agreste. Para a escala sazonal (SPI-3), as estações do inverno e da primavera foram as que exibiram resultados mais expressivos para a distribuição espacial da frequência de seca e para diferenças estatísticas significativas entre as médias de frequência de seca das regiões de Pernambuco. As magnitudes das frequências de seca total sazonal mostraram-se mais expressivas na estação do inverno.

A área de afetada apresentou mais eventos de abrangência global para os tipos de seca total e leve, porém a medida que as secas tornam-se mais graves (de moderada a extrema), menor a abrangência dos eventos secos. A área afetada pela seca apresentou valores médios maiores das secas leve, moderada e severa na estação do verão, enquanto que a seca extrema teve um valor médio maior na estação do outono. Para a seca total, a categoria global de área afetada pela seca apresentou períodos consecutivos nos anos de 1969-1973, 1993-1999 e 2003-2009 (verão), 2008-2012 (primavera) e 1989-1993 (outono). Já períodos de eventos secos regionais consecutivos ocorreram na escala anual (2005-2009) e no inverno (2007-2011) para seca total, e na escala anual (1988-1992) e no verão (1987-1991), para seca leve. Assim como para a frequência de seca, as estações do inverno e do outono

foram as que apresentaram resultados de diferença estatística entre as médias de área afetada pela seca das regiões de Pernambuco. Por fim, com exceção da seca leve no verão, todas as séries de área afetada pela seca mostraram aumento significativo ao longo dos anos, indicando aumento da abrangência espacial dos eventos secos em Pernambuco.

Na distribuição espacial anual da intensidade, destacam-se áreas no Sertão e Agreste, e ao sul da Zona da Mata, na escala anual. A região do Sertão apresentou maiores proporções de estações com tendências significativas em relação às outras regiões. As magnitudes das tendências da seca total foram mais expressivas no oeste do Sertão e ao leste do Agreste. Na escala sazonal, assim como ocorre na frequência de seca, as estações do inverno e primavera são as que exibem maiores diferença na distribuição espacial, principalmente nas secas total, moderada, severa e extrema. As proporções de estações com tendência significativa apontaram o Sertão com maiores proporções nas estações do verão e outono e a região do Agreste nas estações do inverno e primavera. A intensidade média de seca não apresentou categoria de seca extrema em nenhum ano ou estação do ano e alguns poucos anos de seca severa, entretanto todas as séries de seca em todas as escalas (com exceção da seca leve no verão) exibiram crescimento significativo ao longo do período de estudo. As magnitudes de tendência da intensidade de seca total sazonal mostrou-se mais expressiva em diversas partes de Pernambuco, principalmente, no oeste do Sertão e sul da Zona da Mata (verão e outono) e no leste do Sertão e centro do Agreste (inverno e primavera).

Por fim, entre a área afetada pela seca e a intensidade média de seca há, para todos os tipos de seca e todas as escalas, uma relação positiva e, em alguns casos, quase perfeita e que indica que um aumento da intensidade média de seca reflete em um aumento da área afetada pela seca, ou seja, secas mais intensas estão relacionadas com secas mais abrangentes.

Com base nos resultados, pode-se concluir que os eventos de seca em Pernambuco, entre os anos de 1962 a 2012, mais frequentes, mais espacialmente abrangentes e mais intensos com o passar dos anos. Os resultados também apontam que anos como 1993, 1999 e 2012, foram anos em que essas características alcançaram seus máximos, em decorrência do fenômeno do *El Niño*. Os resultados podem fornecer informações úteis para o desenvolvimento de políticas públicas focadas na gestão de recursos hídricos em todo estado e mitigação dos efeitos de eventos secos na população pernambucana.

## Referências Bibliográficas

- ABADI, A. M. et al. Drought and all-cause mortality in nebraska from 1980 to 2014: Time-series analyses by age, sex, race, urbanicity and drought severity. **Science of the Total Environment**, Elsevier, v. 840, p. 156660, 2022.
- AFZALI, A. et al. Spatio-temporal analysis of drought severity using drought indices and deterministic and geostatistical methods (case study: Zayandehroud river basin). **Desert**, University of Tehran, v. 21, n. 2, p. 165–172, 2016.
- AGHELPOUR, P.; BAHRAMI-PICHAGHCHI, H.; KISI, O. Comparison of three different bio-inspired algorithms to improve ability of neuro fuzzy approach in prediction of agricultural drought, based on three different indexes. **Computers and electronics in agriculture**, Elsevier, v. 170, p. 105279, 2020.
- AKHTARI, R.; MAHDIAN, M.; MORID, S. Assessment of spatial analysis of spi and edi drought indices in tehran province. **Iran-Water Resources Research**, Iranian Water Resources Association, v. 2, n. 3, p. 27–38, 2007.
- AL-HUSBAN, Y.; ZGHOUL, M. et al. Analysis of drought patterns in azraq depression (ad), during the period (1984–2016). **International Journal of Applied Environmental Sciences**, Research India Publications, v. 12, n. 2, p. 341–358, 2017.
- AL-QINNA, M. I. et al. Drought analysis in jordan under current and future climates. **Climatic change**, Springer, v. 106, n. 3, p. 421–440, 2011.
- ALAM, I. et al. The effects of drought severity and its aftereffects on mortality in bangladesh. **Yonago Acta Medica**, Tottori University Medical Press, v. 64, n. 3, p. 292–302, 2021.
- ALSTON, M.; KENT, J. The impact of drought on secondary education access in australia’s rural and remote areas. **Centre for Rural Social Research (ILWS)**, Charles Sturt University, Wagga Wagga, 2006.
- ALVALA, R. et al. Drought monitoring in the brazilian semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, SciELO Brasil, v. 91, 2017.
- ANDRADE, C. S. M.; TIRYAKI, G. F. **Econometria na prática**. [S.l.]: Alta Books Editora, 2019.
- APAC. **Relatório de situação de recursos hídricos do Estado de Pernambuco**. [s.n.], 2012. (Agência Pernambucana de Águas e Clima). Disponível em: <<https://www.lai.pe.gov.br/apac/wp-content/uploads/sites/9/2019/03/Relat%C3%B3rio-de-situa%C3%A7%C3%A3o-de-recursos-h%C3%ADricos-do-Estado-de-Pernambuco-APAC-2011-2012.pdf>>.

- ASFORA, M. C.; LIMA, M.; LACERDA, M. R. d. S. Diagnóstico da seca 2011-2016 em pernambuco: impactos e políticas de mitigação. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, n. 44, p. 247–273, 2017.
- ATWOLI, L.; MUHIA, J.; MERALI, Z. Mental health and climate change in africa. **BJPsych International**, Cambridge University Press, v. 19, n. 4, p. 86–89, 2022.
- AUGUIE, B.; ANTONOV, A. gridextra: miscellaneous functions for “grid” graphics. **R package version**, v. 2, n. 1, 2017.
- AWANGE, J. L.; MPELASOKA, F.; GONCALVES, R. M. When every drop counts: Analysis of droughts in brazil for the 1901-2013 period. **Science of the Total Environment**, Elsevier, v. 566, p. 1472–1488, 2016.
- AWCHI, T. A.; KALYANA, M. M. Meteorological drought analysis in northern iraq using spi and gis. **Sustainable Water Resources Management**, Springer, v. 3, n. 4, p. 451–463, 2017.
- BACANLI, Ü. G. Trend analysis of precipitation and drought in the a egean region, t urkey. **Meteorological Applications**, Wiley Online Library, v. 24, n. 2, p. 239–249, 2017.
- BAGHERI, F. Mapping drought hazard using spi index and gis (a case study: Fars province, iran). **International Journal of Environment and Geoinformatics**, v. 3, n. 1, p. 22–28, 2016.
- BAHRAMI, M.; BAZRKAR, S.; ZAREI, A. R. Modeling, prediction and trend assessment of drought in iran using standardized precipitation index. **Journal of Water and Climate Change**, IWA Publishing, v. 10, n. 1, p. 181–196, 2019.
- BAKKALI, S.; AMRANI, M. About the use of spatial interpolation methods to denoising moroccan resistivity data phosphate “disturbances” map. **Acta Montanistica Slovaca**, v. 13, n. 2, p. 216–222, 2008.
- BARGAOUI, Z. K.; JEMAI, S. Spi-3 analysis of medjerda river basin and gamma model limits in semi-arid and arid contexts. **Atmosphere**, MDPI, v. 13, n. 12, p. 2021, 2022.
- BERMAN, J. D. et al. Drought and the risk of hospital admissions and mortality in older adults in western usa from 2000 to 2013: a retrospective study. **The Lancet Planetary Health**, Elsevier, v. 1, n. 1, p. e17–e25, 2017.
- BEZERRA, A. C. et al. Annual rainfall in pernambuco, brazil: regionalities, regimes, and time trends. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 36, p. 403–414, 2021.
- BHALME, H. N.; MOOLEY, D. A. Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, 1980.
- BIRSAN, M.-V. et al. Changes in annual temperature extremes in the carpathians since ad 1961. **Natural Hazards**, Springer, v. 74, n. 3, p. 1899–1910, 2014.

- BIVAND, R. et al. rgdal: Bindings for the geospatial data abstraction library. **R package version**, v. 1, p. 4–8, 2019.
- BIVAND, R. et al. Tools for handling spatial objects. **R Package Version 0.9-4**, 2018.
- BIVAND, R.; RUNDEL, C.; PEBESMA, E. rgeos: interface to geometry engine-open source (geos). **R package version 0.3-26**, 2017.
- BOER, R.; RAMDHANI, F. et al. Spatiotemporal variation of drought characteristics based on standardized precipitation index in central java over 1990-2010. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. [S.l.], 2021. v. 893, n. 1, p. 012022.
- BONACCI, O. et al. Proposal of a new method for drought analysis. 2023.
- BRITO, S. S. B. et al. Frequency, duration and severity of drought in the semiarid northeast brazil region. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 38, n. 2, p. 517–529, 2018.
- BROWN LISA E MEDLOCK, J. e. M.; VIRGÍNIA. Impacto da seca nas doenças transmitidas por vetores - como alguém gerencia o risco ? **saúde pública**, Elsevier, v. 128, n. 1, p. 29–37, 2014.
- BUSHRA, N. et al. The relationship between the normalized difference vegetation index and drought indices in the south central united states. **Natural Hazards**, Springer, v. 96, n. 2, p. 791–808, 2019.
- BYUN, H.-R.; WILHITE, D. A. Daily quantification of drought severity and duration. **Journal of Climate**, v. 5, p. 1181–1201, 1996.
- CALOIERO, T.; CAROLETTI, G. N.; COSCARELLI, R. Imerg-based meteorological drought analysis over italy. **Climate**, MDPI, v. 9, n. 4, p. 65, 2021.
- CALOIERO, T.; VELTRI, S. Drought assessment in the sardinia region (italy) during 1922–2011 using the standardized precipitation index. **Pure and Applied Geophysics**, Springer, v. 176, n. 2, p. 925–935, 2019.
- CARMO, M. V. N. S. d.; LIMA, C. H. R. Caracterização espaço-temporal das secas no nordeste a partir da análise do índice spi. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 35, p. 233–242, 2020.
- CARROLL, N.; FRIJTERS, P.; SHIELDS, M. A. Quantifying the costs of drought: new evidence from life satisfaction data. **Journal of Population Economics**, Springer, v. 22, n. 2, p. 445–461, 2009.
- CAVUS, Y.; AKSOY, H. Spatial drought characterization for seyhan river basin in the mediterranean region of turkey. **Water**, MDPI, v. 11, n. 7, p. 1331, 2019.
- CHIGUSIWA, L.; KEMBO, G.; KAIRIZA, T. Drought and social conflict in rural zimbabwe: Does the burden fall on women and girls? **Review of Development Economics**, Wiley Online Library, 2023.

- CONDEPE/FIDEM, P. de. **Bacia Hidrográfica do Rio Una, GL 4 e GL 5**. [S.l.]: Recife, 2006.
- CONTRERAS, D. et al. The drivers of child mortality during the 2012–2016 drought in la guajira, colombia. **International Journal of Disaster Risk Science**, Springer, v. 11, p. 87–104, 2020.
- COSTA, A. C. Local patterns and trends of the standard precipitation index in southern portugal (1940–1999). **Advances in Geosciences**, Copernicus GmbH, v. 30, p. 11–16, 2011.
- CRAUSBAY, S. D. et al. Defining ecological drought for the twenty-first century. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 98, n. 12, p. 2543–2550, 2017.
- CUNHA, A. P. M. et al. Changes in the spatial–temporal patterns of droughts in the brazilian northeast. **Atmospheric Science Letters**, Wiley Online Library, v. 19, n. 10, p. e855, 2018.
- DENG, S. et al. A multi-scalar evaluation of differential impacts of canonical enso and enso modoki on drought in china. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 39, n. 4, p. 1985–2004, 2019.
- DEY, N. et al. Assessing environmental and health impact of drought in the northwest bangladesh. **Journal of Environmental Science and Natural Resources**, v. 4, n. 2, p. 89–97, 2011.
- DIKICI, M. Drought analysis with different indices for the asi basin (turkey). **Scientific Reports**, Nature Publishing Group, v. 10, n. 1, p. 1–12, 2020.
- DIKSHIT, A. et al. Spatial based drought assessment: Where are we heading? a review on the current status and future. **Science of The Total Environment**, Elsevier, p. 157239, 2022.
- DING, Y.; HAYES, M. J.; WIDHALM, M. Measuring economic impacts of drought: a review and discussion. **Disaster Prevention and Management: An International Journal**, Emerald Group Publishing Limited, 2011.
- EDWARDS, B.; GRAY, M.; HUNTER, B. The impact of drought on mental health in rural and regional australia. **Social Indicators Research**, Springer, v. 121, n. 1, p. 177–194, 2015.
- EPSTEIN, A. et al. Drought and intimate partner violence towards women in 19 countries in sub-saharan africa during 2011–2018: a population-based study. **PLoS Medicine**, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 17, n. 3, p. e1003064, 2020.
- ESTÁCIO, A. B. S.; SILVA, S. M. O. da; FILHO, F. de A. S. Statistical uncertainty in drought forecasting using markov chains and the standard precipitation index (spi). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 471–493, 2021.

GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B. de. Aspectos climáticos da captação de água de chuva no estado de pernambuco. **Embrapa Semiárido-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, Revista de Geografia, Recife, v. 22, n. 2, p. 100-116, jul./dez. 2005., 2005.

GIBBS, W.; MAHER, J. **Rainfall Deciles as Drought Indicators**. Bureau of Meteorology, 1967. (Bulletin (Australia. Bureau of Meteorology)). Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=rUFYnQEACAAJ>>.

GIDEY, E. et al. Modeling the spatio-temporal meteorological drought characteristics using the standardized precipitation index (spi) in raya and its environs, northern ethiopia. **Earth Systems and Environment**, Springer, v. 2, n. 2, p. 281–292, 2018.

GOIN, D. E.; RUDOLPH, K. E.; AHERN, J. Impact of drought on crime in california: A synthetic control approach. **PLoS one**, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 12, n. 10, p. e0185629, 2017.

GUENANG, G. M.; KAMGA, F. M. Computation of the standardized precipitation index (spi) and its use to assess drought occurrences in cameroon over recent decades. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, n. 10, p. 2310–2324, 2014.

GUO, H. et al. Assessment of three long-term satellite-based precipitation estimates against ground observations for drought characterization in northwestern china. **Remote Sensing**, MDPI, v. 14, n. 4, p. 828, 2022.

GUO, Y. et al. Propagation thresholds of meteorological drought for triggering hydrological drought at various levels. **Science of the Total Environment**, Elsevier, v. 712, p. 136502, 2020.

HANIGAN, I. C.; CHASTON, T. B. Climate change, drought and rural suicide in new south wales, australia: future impact scenario projections to 2099. **International journal of environmental research and public health**, MDPI, v. 19, n. 13, p. 7855, 2022.

HAYES, M. et al. The lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. **Bulletin of the American Meteorological Society**, JSTOR, v. 92, n. 4, p. 485–488, 2011.

HIJMANS, R. J.; ETTEN, J. van. raster: Geographic data analysis and modeling. **R package version**, v. 2, n. 8, 2016.

HORRIDGE, M.; MADDEN, J.; WITTWER, G. The impact of the 2002–2003 drought on australia. **Journal of Policy Modeling**, Elsevier, v. 27, n. 3, p. 285–308, 2005.

INOCÊNCIO, T. de M. et al. Linking drought propagation with episodes of climate-induced water insecurity in pernambuco state-northeast brazil. **Journal of Arid Environments**, Elsevier, v. 193, p. 104593, 2021.

IQBAL, M. W. et al. Farmers' perceptions of and adaptations to drought in herat province, afghanistan. **Journal of Mountain Science**, Springer, v. 15, n. 8, p. 1741–1756, 2018.

JAIN, V. K. et al. Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the ken river basin. **Weather and Climate Extremes**, Elsevier, v. 8, p. 1–11, 2015.

- JHA, S.; SRIVASTAVA, R. Impact of drought on vegetation carbon storage in arid and semi-arid regions. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, Elsevier, v. 11, p. 22–29, 2018.
- JONES, E.; VLIET, M. T. van. Drought impacts on river salinity in the southern us: Implications for water scarcity. **Science of the total environment**, Elsevier, v. 644, p. 844–853, 2018.
- JONES, E. C.; MURPHY, A. D. **The political economy of hazards and disasters**. [S.l.]: Rowman Altamira, 2009.
- JOSHI, K. The impact of drought on human capital in rural india. **Environment and Development Economics**, Cambridge University Press, v. 24, n. 4, p. 413–436, 2019.
- KARAVITIS, C. A. et al. Application of the standardized precipitation index (spi) in greece. **Water, MDPI**, v. 3, n. 3, p. 787–805, 2011.
- KASSAMBARA, A. ggpubr:“ggplot2” based publication ready plots. Github, 2020.
- KATZ, R. W.; GLANTZ, M. H. Anatomy of a rainfall index. **Monthly Weather Review**, v. 114, n. 4, p. 764–771, 1986.
- KENDALL, M. G. Rank correlation methods. Griffin, 1948.
- KESHTKAR, A. R.; MOAZAMI, N.; AFZALI, A. Assessment of spatial interpolation techniques for drought severity analysis in iran’s salt lake basin. **Desert (2008-0875)**, v. 26, n. 1, 2021.
- KHAN, M. Z. K. et al. Impact of droughts on child mortality: a case study in southern african countries. **Natural hazards**, Springer, v. 108, n. 2, p. 2211–2224, 2021.
- KILIMANI, N. et al. Economy-wide impact of drought induced productivity losses. **Disaster Prevention and Management: An International Journal**, Emerald Publishing Limited, 2018.
- KIRCHGÄSSNER, G.; WOLTERS, J.; HASSLER, U. **Introduction to modern time series analysis**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- KRAUS, E. Subtropical droughts and cross-equatorial energy transports. **Monthly weather review**, v. 105, n. 8, p. 1009–1018, 1977.
- KUWAYAMA, Y. et al. Estimating the impact of drought on agriculture using the us drought monitor. **American Journal of Agricultural Economics**, Wiley Online Library, v. 101, n. 1, p. 193–210, 2019.
- LI, Q. et al. Investigation to the relation between meteorological drought and hydrological drought in the upper shaying river basin using wavelet analysis. **Atmospheric Research**, Elsevier, v. 234, p. 104743, 2020.
- LIAO, T. F. **Statistical group comparison**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

- LIMA, J. R. d.; MAGALHÃES, A. R. Secas no nordeste: registros históricos das catástrofes econômicas e humanas do século 16 ao século 21. **Parcerias Estratégicas**, v. 23, n. 46, p. 191–212, 2019.
- LIN, H. et al. Drought trends and the extreme drought frequency and characteristics under climate change based on spi and hi in the upper and middle reaches of the huai river basin, china. **Water**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 4, p. 1100, 2020.
- LOON, A. F. V. Hydrological drought explained. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, Wiley Online Library, v. 2, n. 4, p. 359–392, 2015.
- LOON, A. F. V.; LANEN, H. A. V. A process-based typology of hydrological drought. **Hydrology and Earth System Sciences**, Copernicus GmbH, v. 16, n. 7, p. 1915–1946, 2012.
- LOU, W. et al. Summer drought index using spei based on 10-day temperature and precipitation data and its application in zhejiang province (southeast china). **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Springer, v. 31, n. 10, p. 2499–2512, 2017.
- MACEDO, M. J. H. et al. Análise do índice padronizado de precipitação para o estado da paraíba, brasil. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Universidade de Taubaté, v. 5, n. 1, p. 204–214, 2010.
- MAFI-GHOLAMI, D.; ZENNER, E. K.; JAAFARI, A. Mapping recent (1997–2017) and future (2030) county-level social vulnerability to socio-economic conditions and natural hazards throughout iran. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 355, p. 131841, 2022.
- MANESH, M. B. et al. Linkage of agricultural drought with meteorological drought in different climates of iran. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer, v. 138, n. 1, p. 1025–1033, 2019.
- MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the econometric society**, JSTOR, p. 245–259, 1945.
- MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **The annals of mathematical statistics**, JSTOR, p. 50–60, 1947.
- MARENGO, J. A. et al. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid northeast brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, SciELO Brasil, v. 90, p. 1973–1985, 2017.
- MARENGO, J. A. et al. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical south america in 2012: flood in amazonia and drought in northeast brazil. **Journal of climate**, v. 26, n. 22, p. 9137–9154, 2013.
- MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over northeast brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, Springer, v. 129, n. 1, p. 103–115, 2015.

- MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do nordeste do brasil no contexto histórico. **Revista Climanálise**, v. 3, n. 1, p. 49–54, 2016.
- MARENGO, J. A. et al. Extreme drought in the brazilian pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. **Frontiers in Water**, Frontiers Media SA, v. 3, p. 639204, 2021.
- MARENGO, J. A. et al. Increase risk of drought in the semiarid lands of northeast brazil due to regional warming above 4 c. In: **Climate change risks in Brazil**. [S.l.]: Springer, 2019. p. 181–200.
- MARENGO, J. A. et al. Drought in northeast brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. **Climate Resilience and Sustainability**, Wiley Online Library, v. 1, n. 1, p. e17, 2022.
- MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in northeast brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer, v. 129, n. 3, p. 1189–1200, 2017.
- MAYBANK, J. et al. Drought as a natural disaster. **Atmosphere-Ocean**, Taylor & Francis, v. 33, n. 2, p. 195–222, 1995.
- MCKEE, T. B. et al. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: BOSTON. **Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology**. [S.l.], 1993. v. 17, n. 22, p. 179–183.
- MEDEIROS, R. M. de et al. Espacialização pelo método da krigagem nas variabilidades pluvial, evapotranspiração e evaporação no estado do pernambuco–brasil. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218**, v. 2, n. 8, p. e28573–e28573, 2021.
- MEDUGU, N. I.; MAJID, M. R.; JOHAR, F. Drought and desertification management in arid and semi-arid zones of northern nigeria. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, Emerald Group Publishing Limited, 2011.
- MEHR, A. D.; VAHEDDOOST, B. Identification of the trends associated with the spi and spei indices across ankara, turkey. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer, v. 139, n. 3, p. 1531–1542, 2020.
- MEKURIA, T. The effects of flooding and drought on clean water accesibility in ethiopia. 2022.
- MISHRA, A.; DESAI, V. Spatial and temporal drought analysis in the kansabati river basin, india. **International Journal of River Basin Management**, Taylor & Francis, v. 3, n. 1, p. 31–41, 2005.
- MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of hydrology**, Elsevier, v. 391, n. 1-2, p. 202–216, 2010.
- MONTEIRO, A. A. et al. Características da produção leiteira da região do agreste do estado de pernambuco, brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, Universidade Estadual de Londrina, v. 28, n. 4, p. 665–674, 2007.

- NAM, W.-H. et al. Drought hazard assessment in the context of climate change for south korea. **Agricultural Water Management**, Elsevier, v. 160, p. 106–117, 2015.
- NASHWAN, M. S.; SHAHID, S. Spatial distribution of unidirectional trends in climate and weather extremes in nile river basin. **Theoretical and applied climatology**, Springer, v. 137, n. 1, p. 1181–1199, 2019.
- NASIR, M. W.; TOTH, Z. Effect of drought stress on potato production: A review. **Agronomy**, MDPI, v. 12, n. 3, p. 635, 2022.
- NOORI, S. et al. Comparison of different geostatistical methods to estimate groundwater level at different climatic periods. **Water and Environment Journal**, Wiley-Blackwell, 111 River Street Hoboken NJ 07030-5774 United States, v. 27, n. 1, p. 10–19, 2013.
- NORDSTROM, A.; COTTON, C. Impact of a severe drought on education: More schooling but less learning. **Available at SSRN 3601834**, 2020.
- NTALI, Y. M.; LYIMO, J. G. Community livelihood vulnerability to drought in semi-arid areas of northern cameroon. **Discover Sustainability**, Springer, v. 3, n. 1, p. 1–14, 2022.
- NÜBLER, L. et al. Rainfall shocks, cognitive development and educational attainment among adolescents in a drought-prone region in kenya. **Environment and Development Economics**, Cambridge University Press, v. 26, n. 5-6, p. 466–487, 2021.
- PALMER, W. C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new crop moisture index. Taylor & Francis, 1968.
- PANU, U.; SHARMA, T. Challenges in drought research: some perspectives and future directions. **Hydrological Sciences Journal**, Taylor & Francis, v. 47, n. S1, p. S19–S30, 2002.
- PATEL, N.; CHOPRA, P.; DADHWAL, V. Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index. **Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling**, Wiley Online Library, v. 14, n. 4, p. 329–336, 2007.
- PAULO, A. A.; PEREIRA, L. S. Drought concepts and characterization: comparing drought indices applied at local and regional scales. **Water International**, Taylor & Francis, v. 31, n. 1, p. 37–49, 2006.
- PEBESMA, E. et al. Simple features for r. **R Package Version 1.0-9**, 2022.
- PEBESMA, E.; GRAELER, B. gstat: spatial and spatio-temporal geostatistical modelling, prediction and simulation. 2011. URL <http://CRAN.R-project.org/package=gstat>. **R package version**, p. 1–0, 2011.
- PEREIRA, R.; GONCALVES, C. geobr: Download official spatial data sets of brazil. **R package version**, v. 1, n. 1, 2021.
- RAO, V. B.; HADA, K.; HERDIES, D. L. On the severe drought of 1993 in north-east brazil. **International journal of climatology**, Wiley Online Library, v. 15, n. 6, p. 697–704, 1995.

- ROEVER, C. et al. Cattle grazing in semiarid forestlands: Habitat selection during periods of drought. **Journal of animal science**, Oxford University Press, v. 93, n. 6, p. 3212–3225, 2015.
- ROOY, M. V. A rainfall anomaly index independent of time and space, notes. WEATHER BUREAU SOUTH AFRICA, 1965.
- RULINDA, C. M. et al. Characterising and quantifying vegetative drought in east africa using fuzzy modelling and ndvi data. **Journal of Arid Environments**, Elsevier, v. 78, p. 169–178, 2012.
- SALIMI, H.; ASADI, E.; DARBANDI, S. Meteorological and hydrological drought monitoring using several drought indices. **Applied Water Science**, Springer, v. 11, n. 2, p. 1–10, 2021.
- SALVADOR, C. et al. Drought effects on specific-cause mortality in lisbon from 1983 to 2016: Risks assessment by gender and age groups. **Science of the Total Environment**, Elsevier, v. 751, p. 142332, 2021.
- SANTANA, G. R. de A.; SANTOS, E. B.; SILVA, M. G. A. J. da. Caracterização espaço-temporal das secas na bacia do rio paraíba do sul. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 4, p. 364–375, 2020.
- SANTOS, C. A. G. et al. Drought assessment using a trmm-derived standardized precipitation index for the upper são francisco river basin, brazil. **Environmental monitoring and assessment**, Springer, v. 189, n. 6, p. 1–19, 2017.
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on kendall's tau. **Journal of the American statistical association**, Taylor & Francis, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968.
- SENA, A. et al. Managing the health impacts of drought in brazil. **International journal of environmental research and public health**, MDPI, v. 11, n. 10, p. 10737–10751, 2014.
- SHAHABFAR, A.; EITZINGER, J. Spatio-temporal analysis of droughts in semi-arid regions by using meteorological drought indices. **Atmosphere**, MDPI, v. 4, n. 2, p. 94–112, 2013.
- SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: **Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference**. [S.l.: s.n.], 1968. p. 517–524.
- SILVA, A. S. A. d. et al. Multiscale complexity analysis of rainfall in northeast brazil. **Water**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 22, p. 3213, 2021.
- SILVA, A. S. A. da et al. Comparison of interpolation methods for spatial distribution of monthly precipitation in the state of pernambuco, brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 24, n. 3, p. 04018068, 2019.
- SILVA, A. S. Alves da et al. Trends and persistence of dry–wet conditions in northeast brazil. **Atmosphere**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 10, p. 1134, 2020.

- SILVA, T. R. B. F. et al. Climate indices-based analysis of rainfall spatiotemporal variability in pernambuco state, brazil. **Water**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 14, n. 14, p. 2190, 2022.
- SILVA, V. M. D. A. et al. O desastre seca no nordeste brasileiro. **POLÊM! CA**, v. 12, n. 2, p. 284–293, 2013.
- SOARES, D. B.; NÓBREGA, R. S.; GALVÍNCIO, J. D. Indicadores climáticos de desertificação na bacia hidrográfica do rio pajeú, pernambuco. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.
- SOBRAL, B. S. et al. Drought characterization for the state of rio de janeiro based on the annual spi index: trends, statistical tests and its relation with enso. **Atmospheric research**, Elsevier, v. 220, p. 141–154, 2019.
- SOLEIMANI, H. et al. Comparison of temporal and spatial trend of spi, di and czi as important drought indices to map using idw method in taleghan watershed. **Annals of Biological Research**, Scholars Research Library, v. 4, n. 6, p. 46–55, 2013.
- STAGGE, J. H. et al. Candidate distributions for climatological drought indices (spi and spei). **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 35, n. 13, p. 4027–4040, 2015.
- STANKE, C. et al. Health effects of drought: a systematic review of the evidence. **PLoS currents**, Public Library of Science, v. 5, 2013.
- STRÖMBERG, D. Natural disasters, economic development, and humanitarian aid. **Journal of Economic perspectives**, American Economic Association, v. 21, n. 3, p. 199–222, 2007.
- STROMMEN, N. D.; MOTHA, R. P. An operational early warning agricultural weather system. In: **Planning for Drought**. [S.l.]: Routledge, 2019. p. 153–162.
- SUBEDI, M. R. et al. Assessment of geostatistical methods for spatiotemporal analysis of drought patterns in east texas, usa. **Spatial Information Research**, Springer, v. 27, n. 1, p. 11–21, 2019.
- SURENDRAN, U. et al. Analysis of drought from humid, semi-arid and arid regions of india using drinc model with different drought indices. **Water Resources Management**, Springer, v. 33, n. 4, p. 1521–1540, 2019.
- SVENSSON, C.; HANNAFORD, J.; PROSDOCIMI, I. Statistical distributions for monthly aggregations of precipitation and streamflow in drought indicator applications. **Water Resources Research**, Wiley Online Library, v. 53, n. 2, p. 999–1018, 2017.
- SVOBODA, M. et al. Standardized precipitation index user guide. WMO, 2012.
- SVOBODA, M. D.; FUCHS, B. A. et al. **Handbook of drought indicators and indices**. [S.l.]: World Meteorological Organization Geneva, Switzerland, 2016.

- TABRIZI, A. A. et al. Utilization of time-based meteorological droughts to investigate occurrence of streamflow droughts. **Water resources management**, Springer, v. 24, n. 15, p. 4287–4306, 2010.
- TAYLOR, I. et al. The impact of climate mitigation on projections of future drought. **Hydrology and Earth System Sciences**, Copernicus GmbH, v. 17, n. 6, p. 2339–2358, 2013.
- TEAM, R. C. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria, 2019. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- TEAM, R. C. et al. Package stats. **The R Stats Package**, R Foundation for Statistical Computing Vienna, Austria, 2018.
- THORSTEN, P. Non-parametric trend tests and change-point detection. **R package**, 2018.
- TOMCZAK, M. Spatial interpolation and its uncertainty using automated anisotropic inverse distance weighting (idw)-cross-validation/jackknife approach. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, v. 2, n. 2, p. 18–30, 1998.
- TOSUNOGLU, F.; KISI, O. Trend analysis of maximum hydrologic drought variables using mann–kendall and sen’s innovative trend method. **River Research and Applications**, Wiley Online Library, v. 33, n. 4, p. 597–610, 2017.
- UWIMBABAZI, J. et al. Observed changes in meteorological drought events during 1981–2020 over rwanda, east africa. **Sustainability**, MDPI, v. 14, n. 3, p. 1519, 2022.
- VENANCIO, L. P. et al. Impact of drought associated with high temperatures on coffea canephora plantations: a case study in espírito santo state, brazil. **Scientific reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 10, n. 1, p. 19719, 2020.
- VICENTE-SERRANO, S. M. Evaluating the impact of drought using remote sensing in a mediterranean, semi-arid region. **Natural Hazards**, Springer, v. 40, n. 1, p. 173–208, 2007.
- VICENTE-SERRANO, S. M. et al. The complex influence of enso on droughts in ecuador. **Climate Dynamics**, Springer, v. 48, n. 1, p. 405–427, 2017.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of climate**, v. 23, n. 7, p. 1696–1718, 2010.
- VICENTE-SERRANO, S. M. et al. The nao impact on droughts in the mediterranean region. In: **Hydrological, socioeconomic and ecological impacts of the north Atlantic oscillation in the mediterranean region**. [S.l.]: Springer, 2011. p. 23–40.
- WABLE, P. S.; JHA, M. K.; SHEKHAR, A. Comparison of drought indices in a semi-arid river basin of india. **Water resources management**, Springer, v. 33, n. 1, p. 75–102, 2019.

WANG, Q. et al. An improved daily standardized precipitation index dataset for mainland china from 1961 to 2018. **Scientific Data**, Nature Publishing Group, v. 9, n. 1, p. 1–12, 2022.

WANG, W. et al. **Propagation of drought: from meteorological drought to agricultural and hydrological drought**. [S.l.]: Hindawi, 2016.

WICHER-DYSARZ, J.; DYSARZ, T.; JASKUŁA, J. Uncertainty in determination of meteorological drought zones based on standardized precipitation index in the territory of poland. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, MDPI, v. 19, n. 23, p. 15797, 2022.

WICKHAM, H. The tidyverse. **R package ver**, v. 1, n. 1, p. 1, 2017.

WICKHAM, H. **Tools for splitting, applying and combining data-package ‘plyr’**. 2020.

WICKHAM, H. et al. ggplot2: Create elegant data visualisations using the grammar of graphics. **R package version**, v. 2, n. 1, 2016.

WICKHAM, H. et al. dplyr: A grammar of data manipulation. **R package version 0.4**, v. 3, p. p156, 2015.

WILCOXON, F. Individual comparisons by ranking methods (1945). **Breakthroughs in Statistics**, p. 196–202, 1945.

WILHITE, D. A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. 2000.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. **Water international**, Taylor & Francis, v. 10, n. 3, p. 111–120, 1985.

WILHITE, D. A.; SIVAKUMAR, M. V.; PULWARTY, R. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. **Weather and Climate Extremes**, Elsevier, v. 3, p. 4–13, 2014.

WMO. **WMO atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970–2019)**. [S.l.], 2021.

WU, H. et al. An evaluation of the standardized precipitation index, the china-z index and the statistical z-score. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, Wiley Online Library, v. 21, n. 6, p. 745–758, 2001.

WU, H. et al. Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, Wiley Online Library, v. 27, n. 1, p. 65–79, 2007.

XU, Y. et al. Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: A case study in northern china. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 579, p. 124147, 2019.

- XU, Z. et al. Trends in global vegetative drought from long-term satellite remote sensing data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, IEEE, v. 13, p. 815–826, 2020.
- YADAV, A. Draught forecasting using machine learning: A case study of western australia. In: **AGU Fall Meeting Abstracts**. [S.l.: s.n.], 2021. v. 2021, p. GC22B–08.
- YAN, Z. et al. The spatio-temporal variability of droughts using the standardized precipitation index in yunnan, china. **Natural Hazards**, Springer, v. 88, n. 2, p. 1023–1042, 2017.
- YEVJEVICH, V. M. Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts, an. 1967.
- YUAN, S.; QUIRING, S.; PATIL, S. Spatial and temporal variations in the accuracy of meteorological drought indices. **Cuadernos de Investigación Geográfica**, v. 42, n. 1, p. 167–183, 2016.
- YUE, S. et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. **Hydrological processes**, Wiley Online Library, v. 16, n. 9, p. 1807–1829, 2002.
- ZARGAR, A.; SADIQ, R.; KHAN, F. I. Uncertainty-driven characterization of climate change effects on drought frequency using enhanced spi. **Water resources management**, Springer, v. 28, n. 1, p. 15–40, 2014.
- ZHANG, Q. et al. Spi-based evaluation of drought events in xinjiang, china. **Natural hazards**, Springer, v. 64, n. 1, p. 481–492, 2012.
- ZHANG, Q. et al. Multisource data based agricultural drought monitoring and agricultural loss in china. **Global and Planetary Change**, Elsevier, v. 172, p. 298–306, 2019.
- ZHANG, Y. et al. Response of ecohydrological variables to meteorological drought under climate change. **Remote Sensing**, MDPI, v. 14, n. 8, p. 1920, 2022.