

Uma aplicação do SPI (Standardized Precipitation Index) para dados de chuvas mensais em Pernambuco entre 1991-2019

An application of SPI (Standardized Precipitation Index) to monthly rainfall data in Pernambuco between 1991-2019

Una aplicación del SPI (Standardized Precipitation Index) para datos de lluvias mensuales en Pernambuco entre 1991-2019

Recebido: 01/09/2023 | Revisado: 15/09/2023 | Aceitado: 16/09/2023 | Publicado: 18/09/2023

Viviane Farias Felipe

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4097-7867>
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
E-mail: vivianefarias154@gmail.com

Jefferson Vieira dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1487-2865>
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
E-mail: jeffersonviera60@gmail.com

Nyedja Fialho Moraes Barbosa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1813-320X>
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
E-mail: nyedja@servidor.uepb.edu.br

Erika Fialho Moraes Xavier

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8217-7891>
Fundação Oswaldo Cruz, Brasil
E-mail: erika.xavier@fiocruz.br

Silvio Fernando Alves Xavier Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4832-0711>
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
E-mail: prosilviofernando@gmail.com

Jader da Silva Jale

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7414-1154>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: jader.silvasale@ufrpe.br

Resumo

A determinação e classificação de regiões propensas a eventos climáticos críticos, tanto de chuvas intensas quanto de períodos de seca é de suma importância no âmbito da variabilidade climática. No Nordeste brasileiro, uma região semiárida, a seca é um problema recorrente, enquanto eventos climáticos intensos, como chuvas fortes e deslizamentos de terra, afetam regiões metropolitanas e causam desastres. O estado de Pernambuco apresenta tendência de eventos climáticos extremos, com longos períodos de seca e chuvas intensas, que é responsável por numerosos desastres naturais no estado. O objetivo do trabalho foi analisar e classificar, de forma objetiva, a variabilidade climática entre 1991 e 2019 em cinco estações de Pernambuco localizadas nas diferentes mesorregiões do Estado representadas por: Recife, Palmares, Itaíba, Salgueiro e Petrolina, com base em diferentes escalas temporais (1, 3, 6, 9, 12, 24 e 36 meses). Para isso, utilizou-se o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) desenvolvido para classificar condições secas e úmidas de acordo com severidade. Através da análise observou-se que as escalas menores SPI-1 e SPI-3 revelaram o início e a trajetória de cada evento, enquanto as demais escalas identificaram os eventos mais intensos e prolongados. Os resultados obtidos indicaram que os períodos de secas apresentaram maior duração e intensidade, sendo o mês mais seco em Itaíba -4.416 (SPI-3) em agosto de 2018, porém os períodos de chuvas tiveram maior ocorrência nas estações, o mês mais úmido ocorreu em Palmares 2.928 (SPI-3) em setembro de 2000.

Palavras-chave: Índice de Precipitação Padronizado (SPI); Variabilidade climática; Estações; Pernambuco.

Abstract

The determination and classification of regions prone to critical weather events, both intense rainfall and drought periods, are of utmost importance in the context of climate variability. In the Brazilian Northeast, a semi-arid region, drought is a recurring problem, while intense weather events such as heavy rains and landslides affect metropolitan areas and cause disasters. The state of Pernambuco shows a trend of extreme weather events, with long periods of drought and intense rainfall, which is responsible for numerous natural disasters in the state. The

objective of this study was to analyze and classify, in an objective manner, the climate variability between 1991 and 2019 in the five stations of Pernambuco represented by Recife, Palmares, Itaíba, Salgueiro, and Petrolina, based on different time scales (1, 3, 6, 9, 12, 24, and 36 months). For this purpose, the Standardized Precipitation Index (SPI) was used, developed to classify dry and wet conditions according to severity. Through the analysis, it was observed that the smaller scales SPI-1 and SPI-3 revealed the onset and trajectory of each event, while the other scales identified the most intense and prolonged events. The results obtained indicated that drought periods had longer duration and intensity, with the driest month in Itaíba being -4.416 (SPI-3) in August 2018. However, rainy periods occurred more frequently in the stations, with the wettest month being in Palmares with 2.928 (SPI-3) in September 2000.

Keywords: Standardized Precipitation Index (SPI); Climate variability; Stations; Pernambuco.

Resumen

La determinación y clasificación de regiones propensas a eventos climáticos críticos, tanto de lluvias intensas como de períodos de sequía, es de suma importancia en el ámbito de la variabilidad climática. En el noreste de Brasil, una región semiárida, la sequía es un problema recurrente, mientras que eventos climáticos intensos, como fuertes lluvias y deslizamientos de tierra, afectan a las regiones metropolitanas y causan desastres. El estado de Pernambuco presenta una tendencia a eventos climáticos extremos, con largos períodos de sequía y lluvias intensas, lo que es responsable de numerosos desastres naturales en el estado. El objetivo del trabajo fue analizar y clasificar de manera objetiva la variabilidad climática entre 1991 y 2019 en las cinco estaciones de Pernambuco representadas por: Recife, Palmares, Itaíba, Salgueiro y Petrolina, basándose en diferentes escalas temporales (1, 3, 6, 9, 12, 24 y 36 meses). Para ello, se utilizó el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) desarrollado para clasificar condiciones secas y húmedas según su severidad. A través del análisis, se observó que las escalas más pequeñas, SPI-1 y SPI-3, revelaron el inicio y la trayectoria de cada evento, mientras que las demás escalas identificaron los eventos más intensos y prolongados. Los resultados obtenidos indicaron que los períodos de sequía tuvieron una mayor duración e intensidad, siendo el mes más seco en Itaíba -4.416 (SPI-3) en agosto de 2018, pero los períodos de lluvias fueron más frecuentes en las estaciones, siendo el mes más húmedo en Palmares 2.928 (SPI-3) en septiembre de 2000.

Palabras clave: Índice de Precipitación Estandarizado (SPI); Variabilidad climática; Estaciones; Pernambuco.

1. Introdução

As consequências das alterações climáticas já são perceptíveis em várias partes do mundo, sobretudo nos países subdesenvolvidos os quais são os mais vulneráveis a estas alterações climáticas, mesmo sem serem responsáveis pelas maiores emissões de gases do efeito estufa (Wang, et al., 2022). Essas modificações resultam em um desequilíbrio nos ecossistemas, assim como na configuração do clima e nos padrões hidrológicos (Alcântara, et al., 2020). Estes países geralmente são localizados em regiões mais suscetíveis a ocorrências extremas, com grande variação pluviométrica.

O Nordeste brasileiro, considerado como uma região semiárida, tem sido caracterizada, desde o início de sua história, pelo estigma da seca, decorrência da interação entre o meio físico e as estruturas socioeconômicas nele instaladas (Silva, 2019). Situada na zona intertropical do globo terrestre, a área sofre intensa irradiação solar, ocasionando temperaturas elevadas durante todo o ano. A ocorrência de eventos extremos, como períodos de seca prolongada, enchentes e deslizamentos, tem gerado consequências socioambientais significativas nas extensas regiões urbanas (Barros, et al., 2021).

O estado de Pernambuco, situado nessa localidade, é vulnerável a eventos climáticos intensos, principalmente nas regiões metropolitanas de Recife, Zona da Mata e Agreste Pernambucano, e por ciclos de secas recorrentes (Lacerda, 2015). Nos últimos 20 anos, enchentes, inundações e deslizamentos de terra foram os desastres que mais desalojaram pessoas e causaram a morte da população pernambucana (Banco Mundial, 2010). No ano de 2022, ocorreram chuvas intensas na Região Metropolitana do Recife, ocasionando deslizamentos de terra devido à ausência de planejamento urbano adequado. O evento resultou na perda de centenas de vidas e no desalojamento de milhares de pessoas, ocasionando um grande desastre no estado de Pernambuco (METSUL Meteorologia, 2022). No que diz respeito a seca, é importante destacar que esse acontecimento se intensifica e pode ter uma extensão breve, moderada ou prolongada, de leste a oeste conforme os municípios se distanciam do Oceano Atlântico, sendo que o litoral e a Zona da Mata são as áreas menos impactadas.

A compreensão da variabilidade da precipitação em diversas escalas temporais e geográficas é fundamental para a elaboração de estratégias imediatas e de longo prazo que visem reduzir os perigos associados à água, tais como enchentes e

escassez, que podem prejudicar setores econômicos e o progresso social e financeiro sustentável (Silva et al., 2021). A finalidade deste trabalho foi examinar a variabilidade temporal das precipitações no estado de Pernambuco e a presença de eventos extremos durante o período de 1991 a 2019.

Existem diversos tipos de índices que podem avaliar os impactos do déficit de precipitação em uma região, mas nem todos são facilmente aplicáveis devido à falta de informações históricas e de outras variáveis além da precipitação (Guedes, 2016). O Índice de Precipitação Padronizada (*SPI - Standardized Precipitation Index*) é um dos mais utilizados devido a sua metodologia que simplifica sua aplicação, por depender apenas da precipitação pluviométrica e pode ser usado em mais pontos devido à sua maior facilidade e base de comparação histórica do que outras variáveis (Guedes, 2016). Além disso, possibilita a classificação precisa da situação hídrica de uma área e também sua avaliação em diferentes escalas temporais, permitindo a categorização de situações de eventos extremos, severos e moderados (McKee, et al., 1993).

2. Metodologia

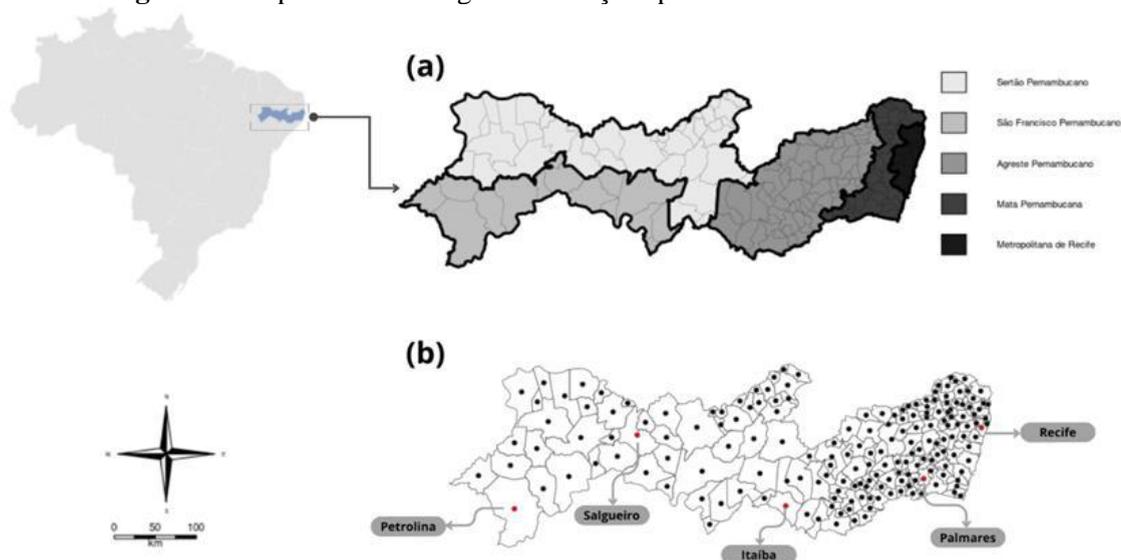
O método empregado para realizar o estudo se apoia na avaliação quantitativa, a abordagem estatística frequentemente adquire relevância ao permitir a antecipação dos eventos (Pereira, et al., 2018). O estudo analisa o comportamento da série temporal de interesse com base no Índice de Precipitação Padronizado (SPI). Essas abordagens serão detalhadas posteriormente.

2.1 Dados utilizados

O objeto de análise é a região de Pernambuco situada no nordeste do Brasil, a qual abrange uma superfície de 98.067,877 km². O clima predominante em Pernambuco é tropical, caracterizado por temperaturas elevadas ao longo de todo o ano e chuvas concentradas durante o período de inverno.

Os dados foram adquiridos por meio do Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), que é um dos conjuntos mais empregados em pesquisas climáticas, bem como da vasta base de dados da NOAA que contém séries temporais de diversos indicadores climáticos, realizou-se uma avaliação mensal no período de 1991 a 2019. Foi examinado o desempenho da série temporal por meio do uso do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) (McKee, et al., 1993) em escalas de tempo (1, 3, 6, 9, 12, 24 e 36) nas cinco mesorregiões de Pernambuco, representadas pelas cinco estações: Recife (Região Metropolitana do Recife); Palmares (Mata Pernambucana); Itaíba (Agreste Pernambucano); Salgueiro (São Francisco Pernambucano) e Petrolina (Sertão Pernambucano).

Figura 1 - Mapa das Mesorregiões e Estações pluviométricas de Pernambuco.



(a) Mesorregiões do Estado de Pernambuco; (b) Estações estudadas (cor vermelha). Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

2.2 Clima

O Nordeste brasileiro sofre a influência de três tipos de climas distintos, sendo eles o semiárido, o tropical úmido e o equatorial. Essa região demonstra considerável variação de ano para ano, especialmente com relação ao volume de chuvas e disponibilidade de recursos hídricos, apresentando períodos de extrema seca e outros de grande pluviosidade (Marengo, et al., 2011). De acordo com (Kayano & Andreoli, 2009), essa região se destaca como uma das principais na América do Sul onde as flutuações climáticas sazonais são mais perceptíveis.

Além disso, a área é afetada pelo agravamento de eventos climáticos extremos, como períodos de estiagem prolongados e precipitações intensas, os quais afetam de maneira direta o cotidiano da população que habita na região (Silva, et al., 2022).

As mesorregiões de Pernambuco apresentam uma grande variedade climática, desde o clima semiárido até o clima tropical úmido, as temperaturas médias anuais variam de 25°C a 30°C. Essa diversidade de climas influencia diretamente a flora, fauna e atividades econômicas das regiões, sendo importante para o desenvolvimento socioeconômico do estado (Guedes, 2016).

Nas mesorregiões da Metropolitana do Recife e Mata Pernambucana localizadas na litorânea do estado, apresentam um clima tropical úmido com chuvas bem distribuídas ao longo do ano e temperaturas elevadas. Durante o inverno, as temperaturas são mais amenas e as chuvas são mais intensas com uma média climática de 24°C. Já no Agreste Pernambucano localizada na porção central do estado, possui um clima semiárido com chuvas irregulares, com alguns locais de maior umidade, no entanto, durante o inverno a temperatura média é 20°C. Localizadas no interior do estado, São Francisco Pernambucano e o Sertão Pernambucano apresenta um clima semiárido com chuvas concentradas em poucos meses do ano e longos períodos de seca. A temperatura média é alta durante todo o ano, com valores que podem chegar a mais de 40°C (APAC Meteorologia, 2023).

2.3 Índice de Precipitação Padronizado (SPI)

O Índice de Precipitação Padronizado (SPI) é uma medida estatística amplamente utilizada para avaliar a seca ou excesso de chuvas em uma determinada região. Ele é baseado na distribuição da precipitação ao longo do tempo e no desvio padrão da precipitação histórica, e é capaz de medir a intensidade, duração e frequência de eventos de seca ou excesso de chuvas. Desenvolvido pela primeira vez por (McKee, et al., 1993) com o objetivo de mensurar o déficit ou excesso de precipitação em várias escalas temporais (1, 3, 6, 12, 24 e 48 meses) a utilização desse método é amplamente aconselhada pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM). O SPI é expresso como desvios padrão que a precipitação observada se desviaria da média de

longo prazo, para uma distribuição normal e distribuição de probabilidade ajustada para o registro de precipitação real. Como a precipitação não é normalmente distribuída, uma transformação é aplicada primeiro, seguida de ajuste a uma distribuição normal.

Devido à normalização do SPI, climas mais secos ou mais úmidos são retratados de forma equivalente, o que possibilita a monitoração de períodos úmidos além de períodos secos (Fernandes, et al., 2009). Esse cálculo é baseado nas características estatísticas das séries históricas de precipitação em diferentes intervalos de tempo, utilizando a densidade de probabilidade. A fim de ajustar a distribuição de frequência do total de precipitação em uma série pluviométrica específica, foram consideradas as distribuições estatísticas (Normal e Gama).

A distribuição de probabilidade Gama é expressa pela seguinte função:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \delta(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

em que $\alpha > 0$ é o parâmetro de forma; $b > 0$ é o parâmetro de escala e $x > 0$ é a quantidade de chuva precipitada. A função Gama é dada por:

$$\delta(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2)$$

Na equação em questão, y é uma variável temporária que pode variar de 0 a ∞ . Os coeficientes de formato são calculados usando o método de máxima verossimilhança, conforme descrito por (THOM, 1966), de acordo com as seguintes equações:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3)$$

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

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (5)$$

Onde o número de observações da amostra é representado por n , enquanto que o valor médio dos dados de precipitação é indicado por \bar{x} . A função de probabilidade acumulada da distribuição Gama é definida por:

$$G(x) = \frac{1}{\delta(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad (6)$$

A função de densidade de probabilidade Gama $g(\alpha)$ não é válida para $x = 0$. No entanto, como a amostra de dados de precipitação pode conter valores iguais a zero, a probabilidade acumulada é dada da seguinte forma:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (7)$$

Nessa equação, q é a probabilidade de ocorrer um zero, que é calculada como $q = m/n$, onde m representa o número de eventos cuja precipitação foi igual a zero e n é o número de observações. Ao converter a probabilidade cumulativa $H(x)$ em uma variável aleatória padronizada (Z) com média igual a zero e desvio padrão igual a 1, podemos simplificar a análise estatística, a variável (Z) corresponderá ao valor do SPI. De acordo com Abramowitz e Stegun (1965), a relação entre as distribuições de probabilidade Gama e Normal é expressa por:

$$Z = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (8)$$

$$Z = +\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad 0,5 < H(x) \leq 1 \quad (9)$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \quad 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (10)$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad 0,5 < H(x) \leq 1 \quad (11)$$

Para os valores de coeficiente iguais a: $c_0 = 2,515517$; $c_1 = 0,802853$; $c_2 = 0,010328$; $d_1 = 1,432788$; $d_2 = 0,189269$; $d_3 = 0,001308$.

Para iniciar o cálculo do SPI, é necessário fazer o ajuste da função densidade de probabilidade Gama às séries de totais mensais de precipitação. Em seguida, estima-se a probabilidade cumulativa de ocorrência de cada total mensal e, então, aplica-se a função Normal e inversa Gaussiana a essa probabilidade para se obter o valor do SPI. O evento de seca tem início quando o valor do SPI se torna negativo e atinge o valor de -1, e termina quando este retorna a valores positivos (McKee, et al., 1993). Dentro de sua escala, os valores menores ou iguais a -2 são indicativos de "seca extrema", enquanto que os valores maiores ou iguais a +2 indicam "umidade extrema".

Tabela 1 - Classificação do Índice de Precipitação Padronizada.

Valores de SPI	Classificação
SPI ≥ 2,00	Extremamente úmido
1,00 ≥ SPI > 2,00	Muito úmido
0,50 ≥ SPI > 1,00	Moderadamente úmido
-0,50 > SPI > 0,50	Próximo ao normal
-1,00 > SPI ≥ -0,50	Moderadamente seco
-2,00 > SPI ≥ -1,00	Muito seco
SPI ≤ -2,00	Extremamente seco

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

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise descritiva

As observações na Tabela 2, correspondem a uma análise anual desde janeiro de 1991 a dezembro de 2019 das 5 estações de Pernambuco, incluindo dados estatísticos e geográficos.

Tabela 2 - Estatística descritiva para estações.

	Latitude	Longitude	\bar{x}	sd	p25	p75	p100	CV	AI
Recife	-8.05428	-34.8813	150	120	51	210	580	0.800	159
Palmares	-8.68875	-35.5912	110	89	41	160	460	0.809	119
Itaíba	-8.9484	-37.4269	52	50	13	74	310	0.961	61
Salgueiro	-8.06755	-39.1242	43	58	2.7	63	460	1.348	60.3
Petrolina	-9.39416	-40.5096	32	51	1.5	46	410	1.593	44.5

\bar{x} = Média; **sd** = Desvio padrão; **p25**= Primeiro quartil (25° percentil); **p75**= Terceiro quartil (75° percentil); **CV**= Coeficiente de variação; **AI**= Intervalo interquartil. Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Na Tabela 2 observa-se que a médias das estações variam conforme sua localização geográfica, de maneira que em Petrolina, localizada no interior do estado, apresenta a menor média (32 milímetros) em relação as demais, e Recife apresenta a

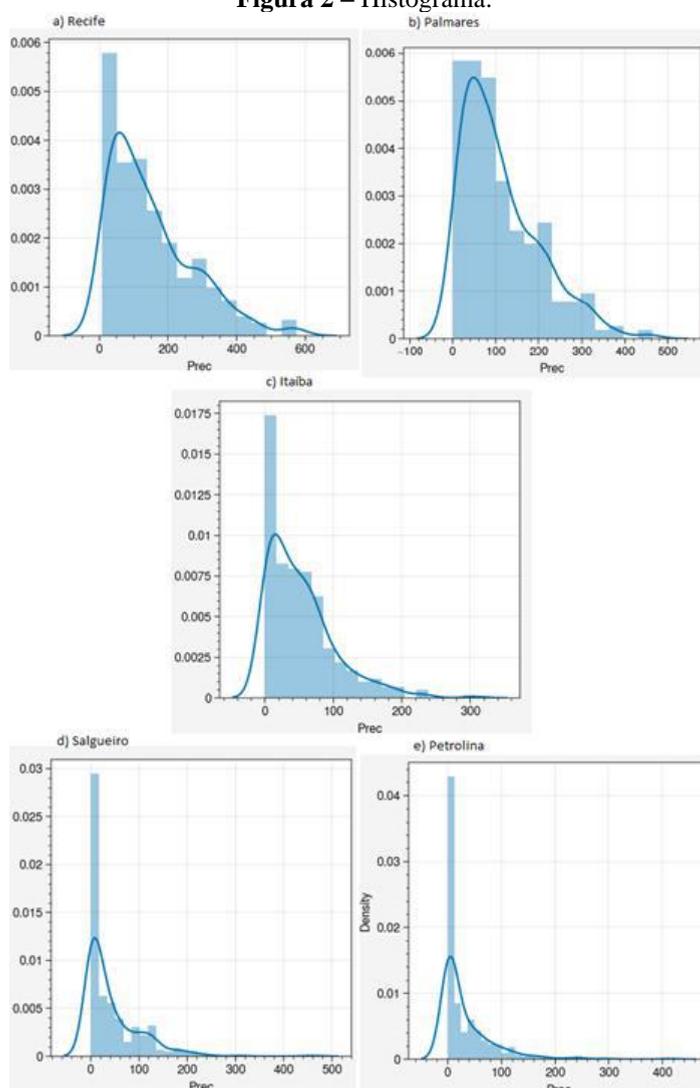
maior média (150 milímetros). Itaíba e Petrolina apresentam desvios padrão menores, sendo assim tem-se um índice de precipitação em torno da média. Recife e Palmares apresentam maiores desvios padrão, indicando que a uma variação mais significativa nas precipitações.

Referindo-se ao coeficiente de variação, tem-se que Salgueiro e Petrolina apresentam a maior variabilidade da precipitação em relação à sua média, indica que essas estações tem uma maior probabilidade de ocorrência de eventos extremos, como chuvas intensas ou secas prolongadas, diferentemente de Recife e Palmares com um valor menor de CV, indica que essas estações a precipitação são mais homogêneas ao longo do tempo.

O intervalo interquartil indica a variabilidade dos valores de precipitação em um determinado período de tempo. Petrolina apresenta uma menor variabilidade, indica que os valores de precipitação estão próximos da média, de outro modo, Recife apresenta o maior valor, indicando uma grande diferença entre os valores de precipitação.

Na Figura 2 tem-se um histograma dos eventos pluviométricos com assimetria a esquerda, Recife e Palmares localizadas no litoral do estado, apresentam eventos de chuvas bem distribuídas ao longo dos anos, assim como no Agreste pernambucano representado por Itaíba. Já nas estações localizadas no interior do estado de Pernambuco, em Salgueiro e Petrolina observa-se uma menor concentração de chuva ao longo do ano.

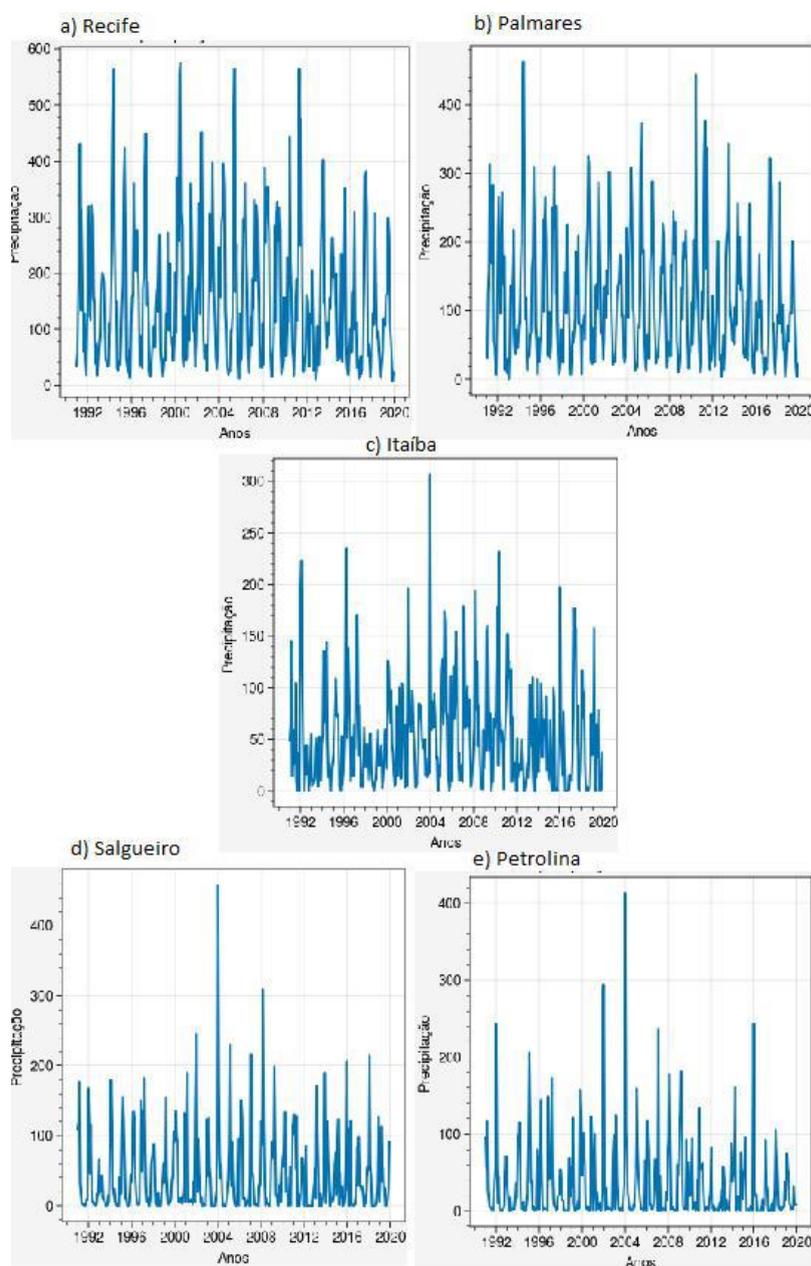
Figura 2 – Histograma.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A seguir na Figura 3 observa-se o índice de precipitação de chuva anual, representado por uma série temporal que indica os anos de maiores precipitações, Recife e Palmares apresentaram um índice de chuva bem distribuída ao longo dos anos, sendo que em alguns anos específicos podemos observar alguns picos como em 1994 e 2011. Localizada no Agreste Pernambucano, caracterizada por tendência de chuvas intensas durante o inverno, Itaíba apresenta um comportamento constante ao longo dos anos, com uma alta em 2004. Já nas regiões de Salgueiro e Petrolina é possível observar um índice de chuva baixo, por conta da sua localização geográfica e seu clima semiárido.

Figura 1 - Índice de precipitação de chuva entre 1991 a 2019.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

3.2 Standardized Precipitation Index (SPI)

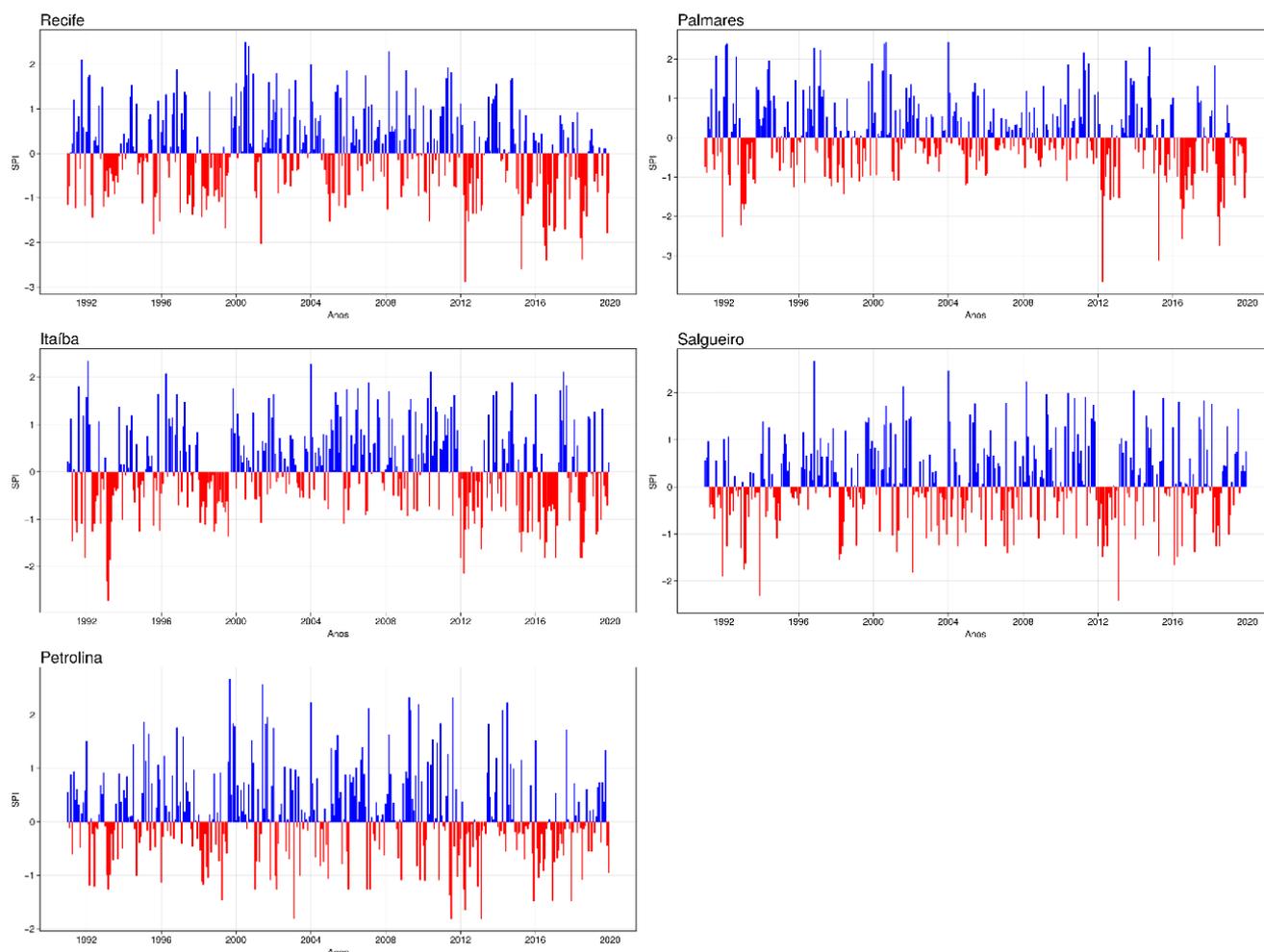
Foram identificados, por meio do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) eventos de chuvas e secas em escalas temporais de 1 mês, 3 meses, 6 meses, 9 meses, 12 meses, 24 meses e 36 meses. Cada estação de medição de precipitação

pluviométrica possui suas próprias características e variações sazonais em termos de períodos chuvosos ou secos, bem como a intensidade e a duração desses períodos. No entanto, quando ocorre um evento climático intenso, ele tende a afetar uma área maior e, se for de natureza climática, pode ser observado em toda a região e em qualquer escala temporal.

A Figura 4 refere-se ao comportamento da média do SPI – 1 a escala de um único mês, na qual é possível observar uma grande variação mensal, com diversos picos positivos e negativos de curta duração, além de alguns de maior duração, mesmo considerando esse período de escala temporal. É possível identificar nas estações que ao final de alguns anos houve uma sequência de valores positivos, o que indica a ocorrência de eventos chuvosos que só serão percebidos em escalas temporais maiores, tendo seus efeitos sentidos mais tarde e variando de acordo com a duração nas outras escalas. Da mesma forma, no lado negativo observamos diversas secas de curta duração.

Na Tabela 3 tem-se os valores máximos e mínimos com mês e ano de referência, observa-se que para o SPI-1, Salgueiro e Petrolina apresentam os maiores valores para os eventos positivos, em relação aos eventos negativos, Palmares apresentou o menor valor em relação as demais estações.

Figura 4 - SPI-1.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Tabela 3 - SPI-1.

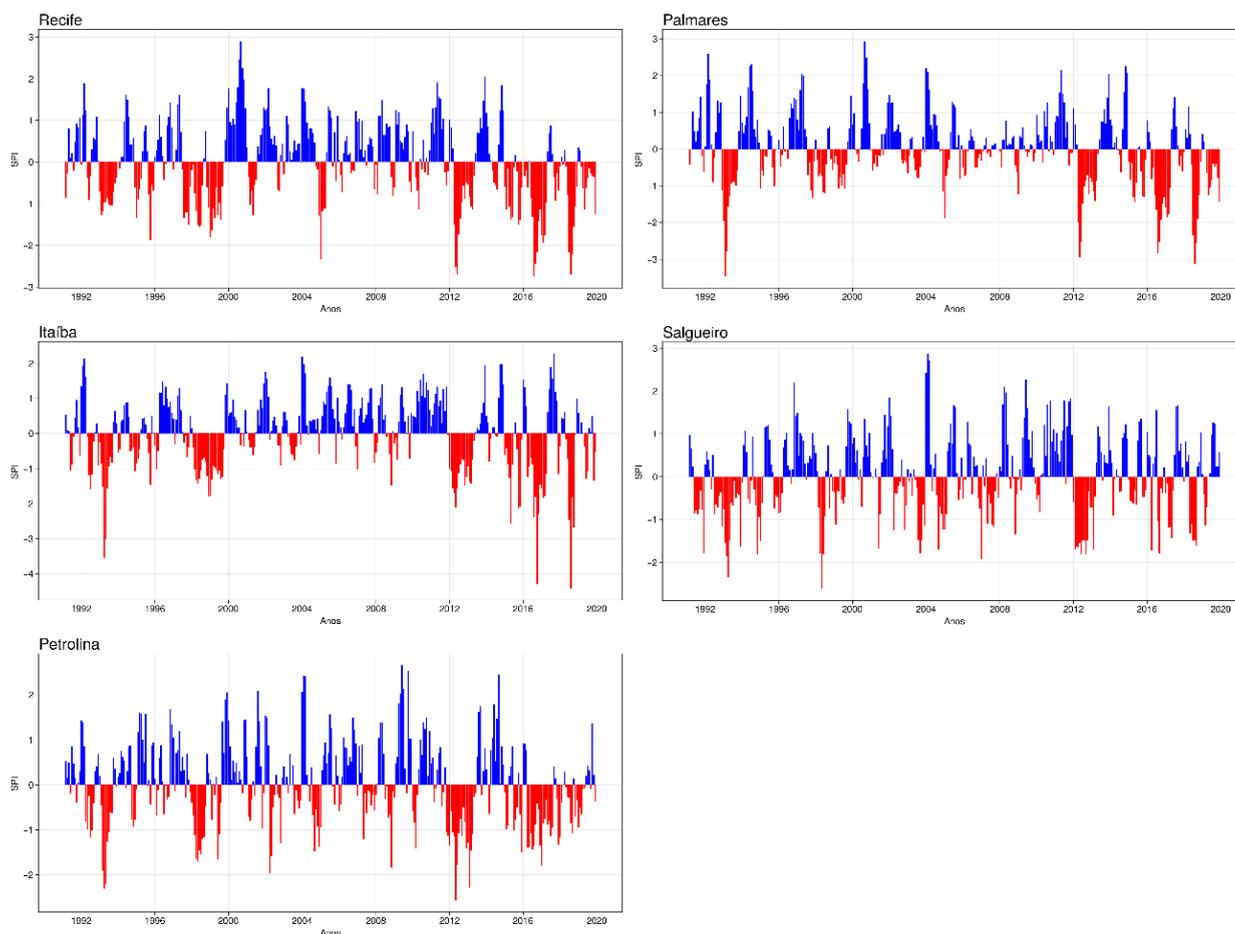
SPI-1	Máximo	Mínimo
Recife	2.500 (07-2000)	-2.889 (04-2012)
Palmares	2.432 (09-2000)	-3.669 (04-2012)
Itaíba	2.349 (02-1992)	-2.719 (03-1993)
Salgueiro	2.672 (11-1996)	-2.422 (02-2013)
Petrolina	2.666 (09-1999)	-1.818 (07-2011)

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

No SPI-3 na Figura 5 é possível uma visualização mais nítida das observações realizadas na escala mensal (SPI-1), foi constatada a persistência dos eventos mencionados anteriormente, enquanto a aleatoriedade na escala menor foi reduzida. Um ponto a ser destacado nessa escala de 3 meses é que ela evidenciou de forma mais precisa a intensidade dos eventos, uma vez que acumulou valores consecutivos de mesmo sinal. Isso fez com que os picos desses eventos mais relevantes fossem ampliados.

Referente a Tabela 4, o valor máximo para o SPI-3, foi registrado em Palmares em 2000. Em relação aos eventos negativos, Itaíba apresentou o menor valor em 2018.

Figura 5 - SPI-3.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Tabela 4 - SPI-3.

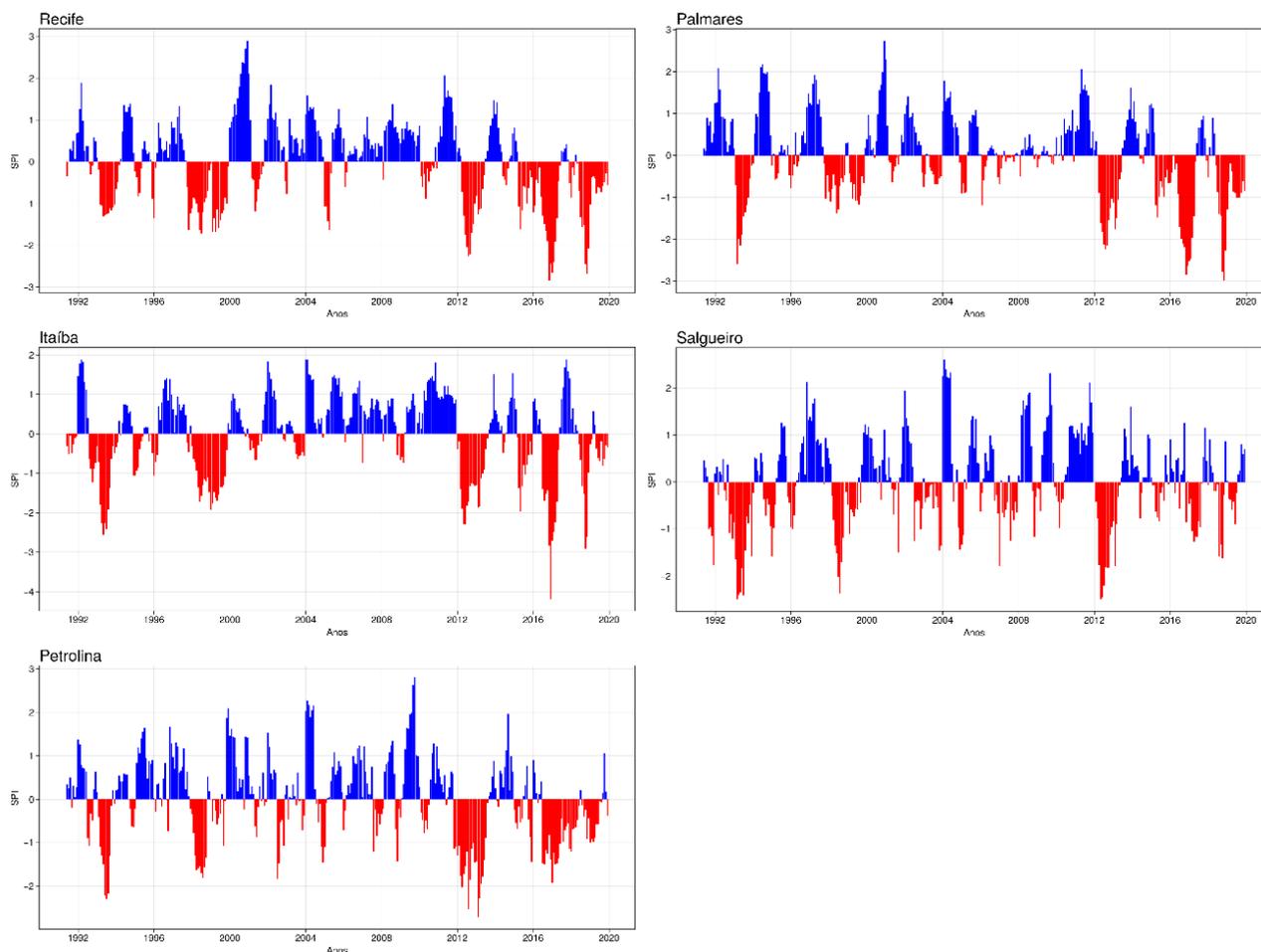
SPI-3	Máximo	Mínimo
Recife	2.895 (09-2000)	-2.742 (08-2016)
Palmares	2.928 (09-2000)	-3.466 (02-1993)
Itaíba	2.281 (09-2017)	-4.416 (08-2018)
Salgueiro	2.866 (02-2004)	-2.616 (05-1998)
Petrolina	2.649 (06-2009)	-2.569 (05-2012)

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A partir do uso do SPI-6 na Figura 6 identificamos a época de transição entre a época chuvosa e o período de seca. Em Itaíba observa-se um período de chuva que segue em torno de uma média sem grandes picos, diferentemente do período de seca, que apresentam grandes picos que passam a ser predominantes em 2010. Nas estações como Recife e Palmares observa-se longos períodos chuvosos, mais que nas estações de Salgueiro e Petrolina. Da mesma forma no período de seca, onde as estações Salgueiro e Petrolina apresentam maior destaque nesta escala do que as demais, por conta da sua localização geográfica.

Na Tabela 5, percebe-se que para o SPI-6 houve eventos de chuva e secas extremas para todas as estações em estudo. Tem-se o maior registro de seca extrema em Itaíba -4.182 em dezembro de 2016. Já o mês mais úmido ocorreu em dezembro de 2000 em Recife (2.888).

Figura 6 - SPI-6.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Tabela 5 - SPI-6.

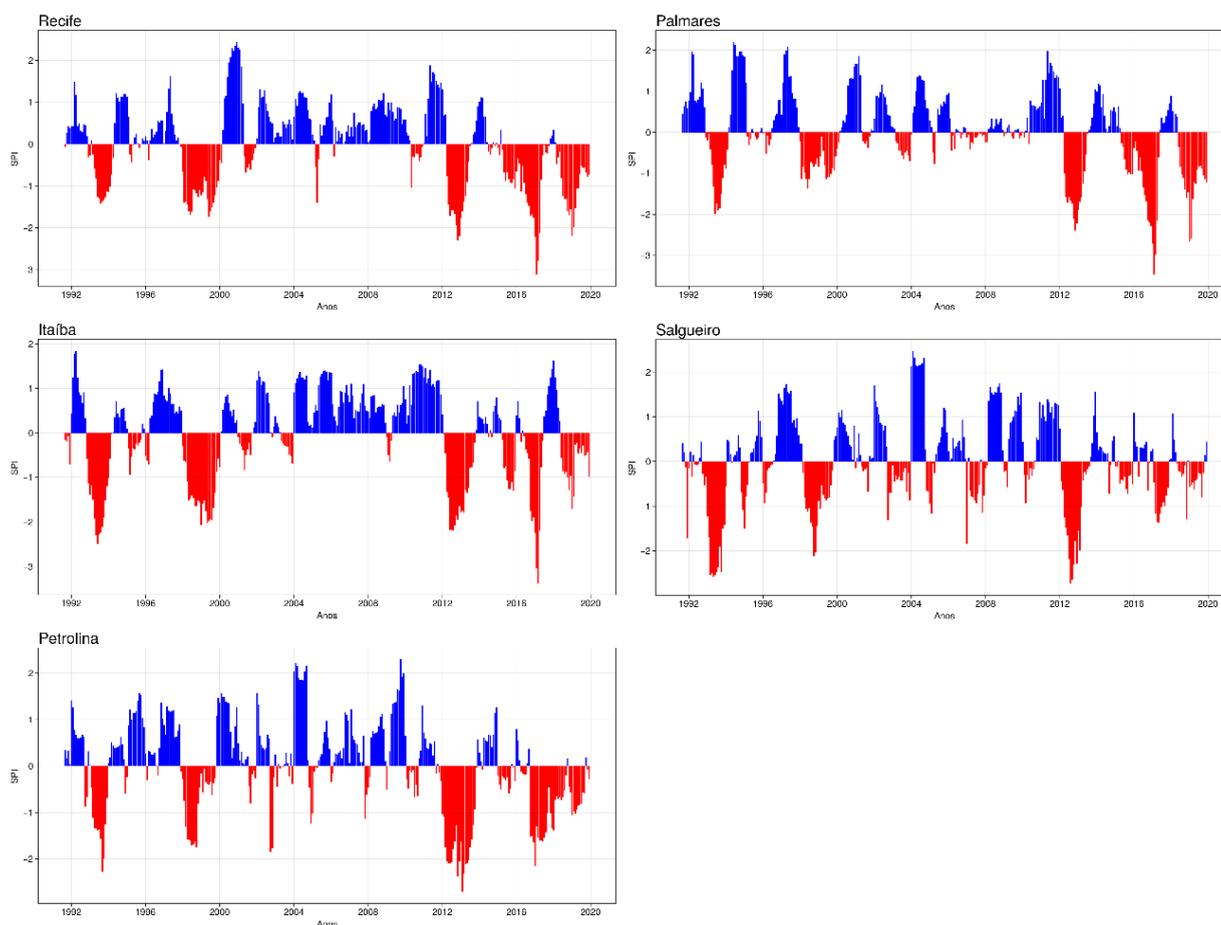
SPI-6	Máximo	Mínimo
Recife	2.888 (12-2000)	-2.843 (11-2016)
Palmares	2.732 (12-2000)	-2.843 (11-2018)
Itaíba	1.889 (10-2017)	-4.182 (12-2016)
Salgueiro	2.603 (02-2004)	-2.498 (05-2012)
Petrolina	2.802 (10-2009)	-2.718 (02-2013)

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

No SPI-9 na Figura 7 observa-se os períodos de transição das regiões, essa escala não apresentou diferenças significativas em relação à escala de 6 meses (SPI-6). No entanto, ela proporcionou uma melhor definição da oscilação entre períodos positivos e negativos, mantendo os eventos mais críticos mencionados anteriormente.

Para os registros de eventos críticos no SPI-9 na Tabela 6, Salgueiro obteve o maior valor de precipitação, diferentemente de Itaíba que apresentou o menor evento positivo. O menor valor, no caso o maior pico de seca registrado foi em Palmares no ano de 2017.

Figura 7 - SPI-9.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Tabela 6 - SPI-9.

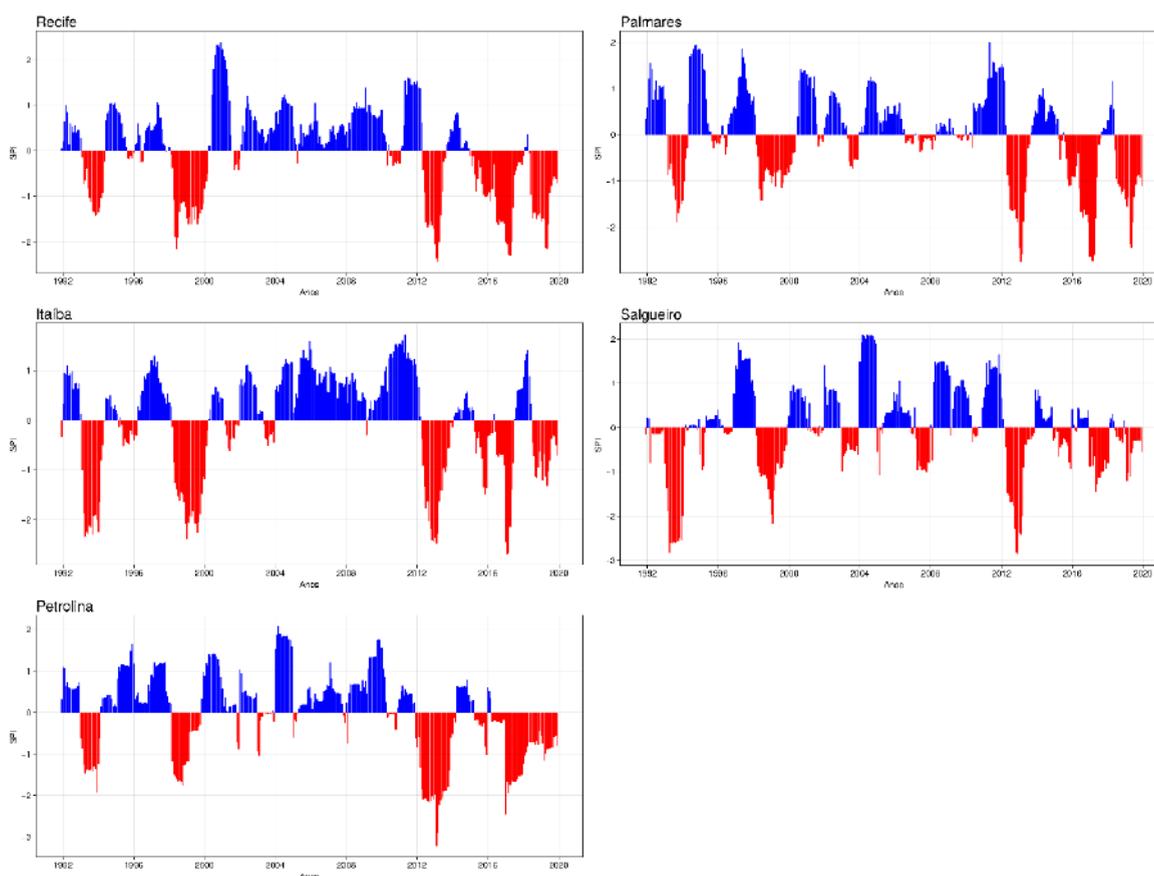
SPI-9	Máximo	Mínimo
Recife	2.437 (12-2000)	-3.118 (02-2017)
Palmares	2.195 (06-1994)	-3.465 (02-2017)
Itaíba	1.844 (04-1992)	-3.375 (03-2017)
Salgueiro	2.466 (02-2004)	-2.733 (08-2012)
Petrolina	2.291 (10-2009)	-2.710 (02-2013)

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Analisando a escala anual registrada pelo SPI-12 na Figura 8 para cada uma das estações do estado, em Recife houve longos períodos de chuvas em 2000, com exceção do período seco mais significativo que atingiu esta estação com grande intensidade ocorreu entre 2013, 2017 e 2019. Palmares apresentou uma grande variabilidade com diversos picos positivos e negativos, porém, a partir da década de 2010, as secas passaram a ser predominantes. No Agreste Pernambucano representado por Itaíba, destaca-se os longos períodos chuvosos entre 2005 a 2011, quanto aos eventos de seca destacam-se as ocorridas entre 1993 e 1999, prevaleceu no período de 2013 e 2017. Localizadas no interior do estado, Salgueiro e Petrolina apresentam uma variação nos períodos de chuvas, destacando alguns períodos de seca em Salgueiro de 1993 e 2012, já em Petrolina observamos que o período de seca passa a ser predominante na década de 2010.

Na Tabela 7 observa-se os maiores e menores valores registrados para cada estação no SPI-12, localizado no litoral do estado, Recife apresentou o maior evento positivo registrado em 2004, sendo Itaíba o menor em relação as demais estações. Em relação aos eventos negativos, referindo-se ao evento seca, o menor valor foi registrado em Petrolina no ano de 2013.

Figura 8 - SPI-12.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Tabela 7 - SPI – 12.

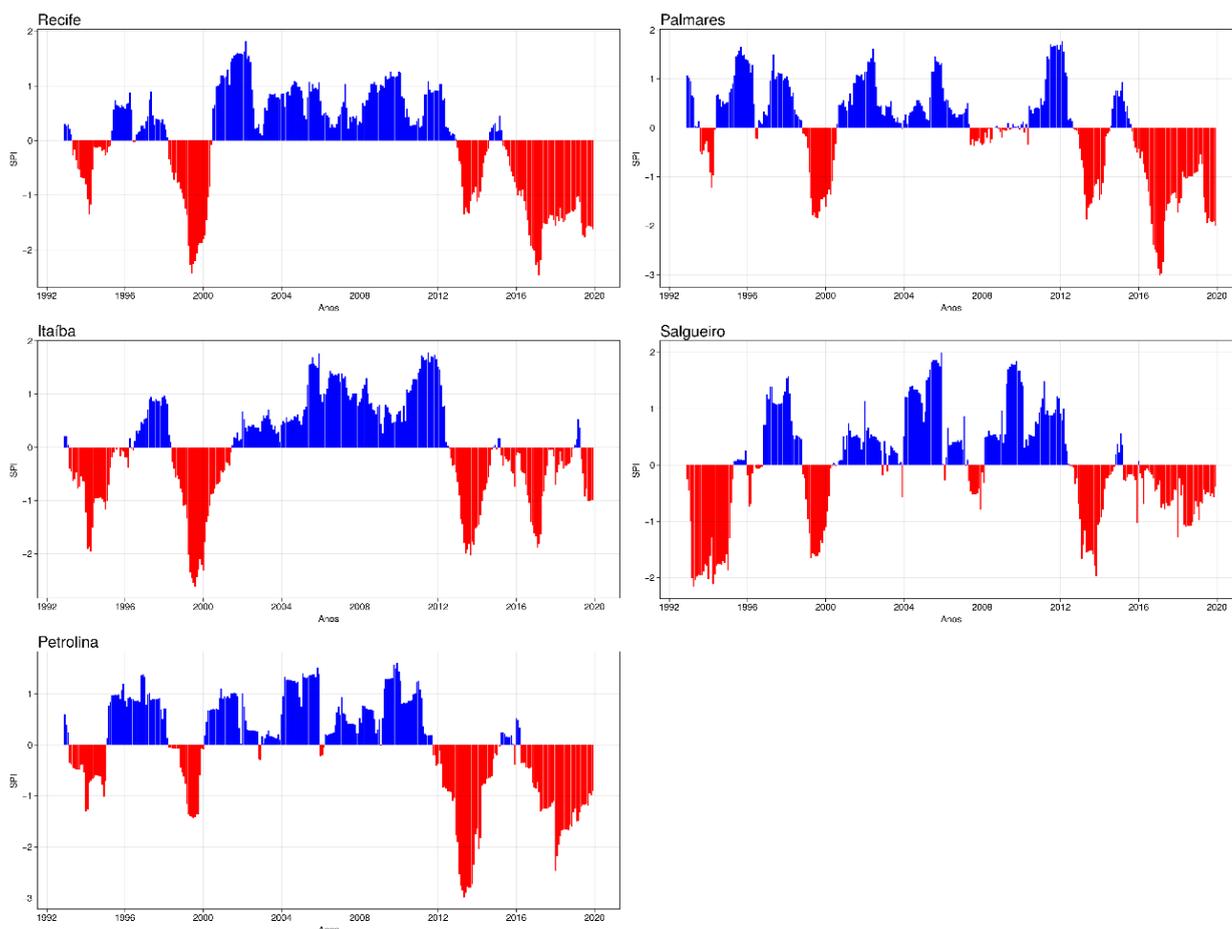
SPI-12	Máximo	Mínimo
Recife	2.387 (12-2000)	-2.441 (03-2013)
Palmares	2.002 (05-2011)	-2.751 (02-2013)
Itaíba	1.729 (05-2011)	-2.684 (02-2017)
Salgueiro	2.106 (06-2004)	-2.865 (12-2012)
Petrolina	2.075 (03-2004)	-3.221 (02-2013)

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A Figura 9 tem-se a escala de dois representada pelo SPI-24 identifica períodos prolongados de deficiência ou excesso, sua referência abrange duas épocas chuvosas e duas épocas secas. Os eventos de seca extrema está presente em todas as estações que passam a ser predominantes na década de 2010. Em relação as épocas chuvas as estações apresentaram eventos considerados muito úmido entre 2002-2010.

Na Tabela 8 o maior registro para o evento positivo foi em Salgueiro 1.993 em 2005, em relação aos eventos negativos observa-se que todas as estações registraram secas extremas, tem-se o maior registro de seca extrema em Palmares -3.012 em 2017.

Figura 9 - SPI-24.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Tabela 8 - SPI-24.

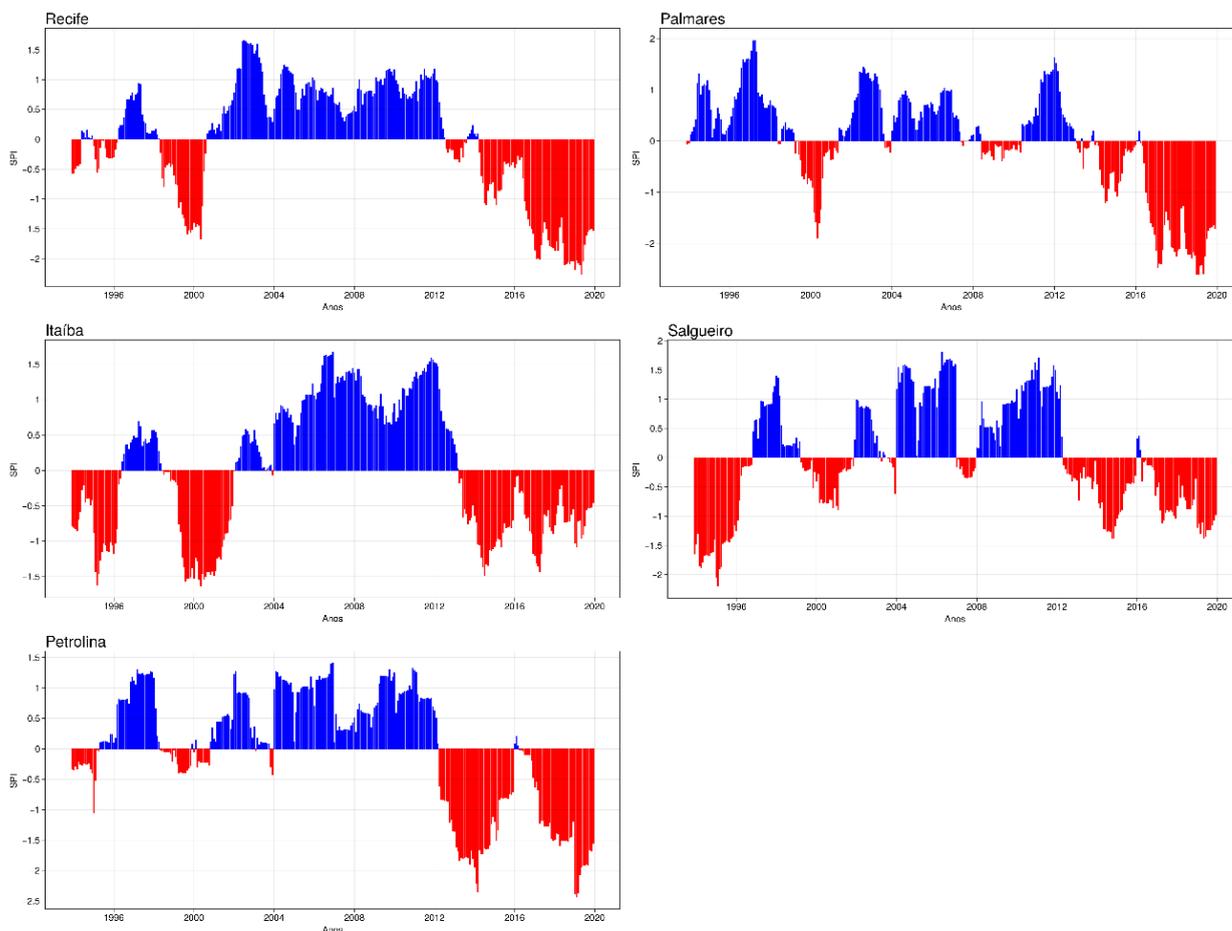
SPI-24	Máximo	Mínimo
Recife	1.820(03-2002)	-2.468 (03-2017)
Palmares	1.768 (02-2012)	-3.012 (02-2017)
Itaíba	1.787 (07-2011)	-2.611 (08-1999)
Salgueiro	1.993 (12-2005)	-2.160 (04-1993)
Petrolina	1.601 (12-2009)	-2.989 (05-2013)

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

À medida que se leva em conta uma escala maior do SPI, os eventos sucessivos de ocorrências positivas ou negativas passam a se unir e configurar um único episódio de maior duração, o que torna mais evidentes os períodos de abundância ou escassez dos recursos hídricos em uma área específica. Na Figura 10 a escala do SPI-36, revela de maneira ainda mais acentuada do que a escala de 24 meses que o evento de seca iniciado na década de 2010 tem se prolongado por um período maior e se agravado com o aumento da escala do SPI. Observa-se que os eventos de chuvas foram prolongados e intensificados nas estações.

Para os registros de eventos críticos no SPI-36 na Tabela 9, tem-se o maior registro de seca extrema em Palmares em 2019, o valor máximo para o SPI-36, foi registrado também Palmares 1.966 em 1997.

Figura 10 - SPI-36.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Tabela 9 - SPI-36.

SPI-36	Máximo	Mínimo
Recife	1.658 (07-2002)	2.267 (05-2019)
Palmares	1.966 (04-1997)	-2.610 (01-2019)
Itaíba	1.678 (12-2006)	-1.632 (05-2000)
Salgueiro	1.805 (04-2006)	-2.202 (02-1995)
Petrolina	1.411 (12-2006)	-2.441 (02-2019)

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

4. Conclusão

Compreender e analisar o índice de precipitação em uma determinada região é crucial para a sociedade, pois eventos climáticos extremos, como secas e inundações, podem afetar diversos aspectos socioeconômicos, políticos e ambientais. As variações das escalas de tempo do SPI contribuíram para identificar o início dos eventos em escalas menores, bem como sua intensidade e duração em escalas maiores. Portanto, é necessário um conhecimento aprofundado do comportamento histórico da precipitação para estabelecer medidas preventivas e adaptações aos impactos causados por esse fenômeno.

O SPI demonstrou ser apropriado para detectar secas extremas em termos de gravidade, uma vez que a maioria dos resultados concordou com as informações presentes em diversos artigos, dissertações e teses. Através do histograma observamos que os eventos foram classificados como normais em todas as estações. Conforme os dados apresentados do SPI, tem-se que a ocorrência de chuvas foi maior do que os eventos de seca. Mesmo assim, as secas apresentaram maior intensidade e duração, alcançando a categoria seca extrema por vários meses consecutivos em algumas estações. A intensidade dos eventos fica ainda mais nítidas quando consideramos as escalas maiores como SPI-24 e SPI-36. No Agreste Pernambucano representado por Itaíba tem-se que é a estação com menor valor de meses úmidos em todas as escalas de SPI, característica da região Agreste que apresenta chuvas irregulares e, por vezes escassas. Ademais, a década de 1990 foi marcada por eventos de seca de maior abrangência espacial, principalmente nas categorias de secas severas e extremas, em quase todas as estações, com exceção do São Francisco Pernambucano, onde predominaram na década de 2010.

Trabalhos futuros podem incluir outras localizações do estado de Pernambuco e utilizar o aprendizado de máquina e modelos de predições para prever as tendências e identificar as áreas que experimentarão alterações expressivas ao longo do tempo.

Referências

- Abramowitz, M. & Stegun, I. A. (1965). *Handbook of Mathematical Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover Publications, Inc., New York, USA.
- Alcântara, L. R. P., Silva, M. E. R., Santos Neto, S. M., Lafayette, F. B., Coutinho, A. P., Montenegro, S. M. G. L., & Antonino, A. C. D. (2020). Mudanças climáticas e tendências do regime pluviométrico do Recife. *Research, Society and Development*, 9(3), e178932583-e178932583.
- APAC. (2023). APAC Meteorologia. Agência Pernambucana de águas e Clima (APAC). <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/estacoes-do-ano.php?estacao=primavera#:~:text=As%20temperaturas%20m%C3%A9dias%20s%C3%A3o%20de,Zona%20da%20Mata%20e%20Litoral>
- Banco Mundial. (2010). Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Pernambuco; Banco Mundial: Davos, Switzerland.
- Barros, V. da S., Gomes, V. K. I., Silva Júnior, I. B., Silva, A. S. V., Silva, A. S. A., Bejan, L. B., & Stosic, T. (2021). Análise de tendência do índice de precipitação padronizado em Recife-PE. *Research, Society and Development*, 10(8), e52310817458-e52310817458.
- Carmo, M. V. N. S. (2018). *Análise e previsão estatística do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) para o Nordeste do Brasil*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-206/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Correia, F. W. L. F. (2014). *Modelos de Dispersão Para Extremos de Precipitação, Estudo de Caso: O Nordeste do Brasil*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brazil, Ph.D. Thesis.
- Espinoza, N. S., Santos, C. A. C., Silva, M. T., Gomes, H. B., Ferreira, R. R., Silva, M. L., Santos & Silva, C. M., Oliveira, C. P., Medeiros, J. & Giovannettone, J. (2021). Deslizamentos de terra desencadeados pelo evento de precipitação extrema de maio de 2017 na costa leste do nordeste do Brasil. *Atmosfera* 2021. 12, 1261.

- Fernandes, D., Heinemann, A. B., Paz, R. L., Amorim, A. O., & Cardoso, A. P. (2009). *Índices para a Quantificação da Seca. Embrapa Arroz e Feijão*. Santo Antônio de Goiás, doc. 244, p. 48.
- GPCC.(2022).Global Precipitation Climatology Centre.<https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.gpcc.html>
- Guedes, R. V. S. (2016). *Análise e previsão de eventos críticos de precipitação com base no SPI e em redes neurais artificiais para o estado de Pernambuco*.
- Inocêncio, T. D. M. (2019). *Avaliação de eventos extremos de Seca no Estado de Pernambuco* (Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco).
- Kayano, M. T., & Andreoli, R. V. (2009). Variabilidade decenal e multidecenal. *Cavacanti, I.; Ferreira, N.; Silva, MGJ da*, 375-383.
- Lacerda, F. F. (2015). Tendências de temperatura e precipitação e cenários de mudanças climáticas de longo prazo no nordeste do Brasil e em ilhas oceânicas. *Ph.D. Thesis*.
- Marengo, J. A., Alves, L. M., Beserra, E. A., & Lacerda, F. F. (2011). Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*. 1, 385-422.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. 17(22), 179-183.
- METSUL.(2022). METSUL Meteorologia. O Desastre de Pernambuco em Imagens. <https://metsul.com/o-desastre-da-chuva-em-pernambuco-em-imagens/>
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*.
- Silva, A. S. A., Menezes, R. S. C., & Stosic, T. (2021). Análise multifractal do índice de precipitação padronizado. *Research, Society and Development*, 10(7), e24710716535-e24710716535.
- Thom, H. C. S. (1966). *Some methods of climatological analysis*. 81, 53. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization.
- Silva, T. R. B. F., Santos, C. A. C. D., Silva, D. J. F., Santos, C. A. G., da Silva, R. M., & de Brito, J. I. B. (2022). Climate indices-based analysis of rainfall spatiotemporal variability in Pernambuco State, Brazil. *Water*. 14(14), 2190.
- Silva, I. A. S. (2019). Conexões entre clima e desertificação: trajetórias e suscetibilidade no nordeste brasileiro. *Revista Equador*. 8(2), 468-488.
- Wang, W. T., Guo, W. Y., Jarvie, S., Serra-Diaz, J. M., & Svenning, J. C. (2022). Anthropogenic climate change increases vulnerability of Magnolia species more in Asia than in the Americas. *Biological Conservation*. 265, 109425.