

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO DE BACHARELADO EM METEOROLOGIA**

WILLIAM MAX DE OLIVEIRA ROMÃO

**ÍNDICES SPI E RDI VIA PRODUTO TERRACLIMATE APLICADO AS
CAPITAIS DO NORDESTE BRASILEIRO**

**MACEIÓ, AL
MAIO, 2023**

William Max de Oliveira Romão

Índices SPI e RDI via produto TerraClimate aplicado as capitais do Nordeste brasileiro

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Alagoas, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. José Francisco de Oliveira

Maceió, AL

Maio, 2023

**Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecária Responsável: Livia Silva dos Santos - CRB 1670

- R756i Romão, William Max de Oliveira.
Índices SPI e RDI via produto terraclimate aplicado as capitais do nordeste brasileiro /William Max de Oliveira Romão. – 2023.
56 f. : il.
- Orientador: José Francisco de Oliveira Júnior.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2023.
- Bibliografia: f. 64-75
1. Seca - Nordeste - Brasil. 2. Mudanças climáticas. 3. Recursos hídricos. I. Título.
- CDU: 551.58 (81)

*Dedico a minha mãe que é a primeira
pessoa que acredita nas minhas
previsões.
Amo ser seu filho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente aos meus pais e irmãs. Agradeço em especial a minha mãe, Mércia Gilvânia por ter me dado todo apoio e suporte ao longo da vida, por ter segurado as pontas em casa para que eu pudesse ter uma excelente educação, só nós sabemos a nossa história e essa graduação é sua também. Ao meu pai, Irineudes por ativar minha curiosidade e incentivado a entrar de cabeça na área da meteorologia,

Agradeço aos professores do ICAT por compartilhar seus conhecimentos dentro e fora das salas de aulas. Agradeço ao professor Heliofabio, o diretor do ICAT (na minha época) por ser uma inspiração e por acreditar nos seus alunos, ao professor Glauber que me falou a frase que mudou minha vida e especialmente ao meu orientador professor José Francisco de Oliveira Júnior, que é abençoado com a paciência, leveza e conhecimento dos Deuses para orientar seus alunos, por incentivar, confiar, ouvir minhas ideias e as bobagens que falo e pelo excelente gosto musical que compõe a playlist do laboratório. (Em outra vida seríamos uma banda de rock).

Agradeço aos membros da banca examinadora, o excelente professor Ricardo Amorim, o Dr. Dimas Santiago, cria do mesmo laboratório que eu, sucesso sempre.

A todos meus amigos que tive a honra de conhecer, essencialmente ao Rodrigo que com sua sugestão “bicho, por que você não tenta meteorologia?” me fez entrar para o curso que me faz sentir completo. Aos amigos que fiz no curso em especial os amigos do LAMMA que ajudaram a ressignificar o curso pós-pandemia, Luís Felipe, Thiago, Ittalo e amigos da turma, como o Welison, que foi esperto suficiente para mudar de curso antes que a bomba explodisse. Também gostaria de agradecer a Beatriz por iluminar minha visão para a meteorologia quando tudo estava escuro para mim. E também minha amiga, Bruna pelas longas conversas noturnas e inspiradoras.

E como sempre fui musical, agradeço ao Titãs, Engenheiros do hawaii, Blink-182, Silverchair, RHCP, Weezer entre outras bandas por fazerem músicas que me acompanharam nas madrugadas de escrita deste TCC e também ao Dead Fish por cantar músicas que me fazem sentir vivo.

Deus é nove sempre!

RESUMO

Este estudo avaliou a seca e os extremos de chuvas nas capitais do Nordeste do Brasil (NEB) com base nos índices Standardized Precipitation Index (SPI) e Reconnaissance Drought Index (RDI) a partir dos dados de precipitação e evapotranspiração potencial (PET) TerraClimate, via software DrinC. Neste estudo foram usados os dados pluviométricos de estações meteorológicas convencionais (EMC) do INMET referentes às nove capitais do NEB, no período de 1980 a 2021. Os dados do INMET foram usados na validação dos dados do TerraClimate via indicadores estatísticos. No estudo foi utilizada a análise de agrupamento (AA) com base no método de ligação completa na identificação de regiões homogêneas de chuva e evapotranspiração (PET). O dendrograma utilizando o método de ligação completa foi validado via coeficiente de correlação cofonético (CCC), desta maneira, para os dados de precipitação foi obtido $CCC = 0,79$, para os dados de evapotranspiração o $CCC = 0,65$. Tais dados climáticos são usados como dados de entrada dos índices SPI e RDI. A técnica de AA identificou três regiões homogêneas de PET e duas regiões de precipitação e Salvador (Não se agrupou – NA) para as capitais do NEB. Os resultados obtidos indicaram que os valores de precipitação mensal do TerraClimate apresentaram correlações classificadas como muito alta (0,7 - 0,9) e quase perfeita (0,9 - 1,0), como também as estatísticas de erros (EPE e RSME, mm) foram satisfatórios. O software DrinC é satisfatório no desempenho do SPI e RDI em todas as escalas adotadas, pois conseguem identificar a intensidade e frequência da seca e chuva nas capitais do NEB. O SPI é útil na identificação de déficits de chuvas e eventos extremos. O RDI é eficiente na identificação de secas agrícolas e hidrológicas na escala trimestral e semestral. Recomenda-se a aplicação de ambos os índices para toda a região do Nordeste.

Palavras-Chave: Seca; NEB; gestão de recursos hídricos; mudanças climáticas.

ABSTRACT

This study evaluated drought and extreme rainfall events in the capitals of Northeast Brazil (NEB) based on the Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI), using precipitation and potential evapotranspiration (PET) data from TerraClimate through the DrinC software. The research used rainfall data from conventional meteorological stations (CMS) provided by INMET for the nine NEB capitals, spanning from 1980 to 2021. The INMET data were used to validate the TerraClimate data through statistical indicators. Cluster analysis (CA) with the complete linkage method was applied to identify homogeneous regions for rainfall and evapotranspiration (PET). The dendrogram generated using the complete linkage method was validated using the cophenetic correlation coefficient (CCC), resulting in $CCC = 0.79$ for precipitation data and $CCC = 0.65$ for evapotranspiration data. These climatic data were used as input for the SPI and RDI indices. The CA technique identified three homogeneous PET regions and two precipitation regions, with Salvador remaining ungrouped (Not Aggregated - NA) among the NEB capitals. The obtained results indicated that monthly precipitation values from TerraClimate showed strong correlations, ranging from very high (0.7 - 0.9) to nearly perfect (0.9 - 1.0), and the error statistics (SEE and RSME, mm) were satisfactory. The DrinC software demonstrated satisfactory performance in SPI and RDI at all adopted scales, successfully identifying the intensity and frequency of drought and rainfall events in the NEB capitals. The SPI was useful in identifying rainfall deficits and extreme events, while the RDI efficiently identified agricultural and hydrological droughts at quarterly and semi-annual scales. The application of both indices is recommended for the entire Northeast region.

Keywords: drought; NEB; water resource management; climate change.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Nordeste Brasileiro (NEB) e seus nove estados e suas capitais, seguido da topografia, respectivamente.	22
Figura 2 - Exemplo da determinação e caracterização do ano hidrológico para a capital de Maceió, para o ano de 2018.	26
Figura 3 - Diagrama de dispersão 1:1 para as capitais do NEB entre os dados de precipitação do INMET e do TerraClimate no período de 1980 a 2021.	35
Figura 4 - Distribuição mensal do EPE (mm) para as capitais do NEB no período de 1980 a 2021.	39
Figura 5 - Distribuição mensal da RMSE (mm) para as capitais do NEB. no período de 1980 a 2021.	40
Figura 6 - Dendrograma da precipitação e o valor de coeficiente cofenético entre as capitais do NEB.	41
Figura 7 - Distribuição temporal do SPI-12 (anual) baseado no TerraClimate dos grupos homogêneos pluviométricos no período de 1980 a 2021.	44
Figura 8 - Distribuição temporal do SPI-6 (semestral) baseado no TerraClimate dos grupos homogêneos pluviométricos no período de 1980 a 2021.	47
Figura 9 - Distribuição temporal do SPI-3 (trimestral) baseado no TerraClimate dos grupos homogêneos pluviométricos no período de 1980 a 2021.	50
Figura 10 - Dendrograma do PET e o valor de coeficiente cofenético entre as capitais do NEB.	53
Figura 11 - Distribuição temporal do RDI-12 (anual) baseado no TerraClimate dos grupos homogêneos de PET no período de 1980 a 2021.	54
Figura 12 - Distribuição temporal do RDI-6 (semestral) baseado no TerraClimate dos grupos homogêneos de PET no período de 1980 a 2021.	57
Figura 13 - Distribuição temporal do RDI-3 (trimestral) baseado no TerraClimate dos grupos homogêneos de PET no período de 1980 a. 2021.	59
Figura 14 - Diagrama de pizza dos eventos extremos e de neutralidade via SPI para as três escalas adotadas no estudo.	61
Figura 15 - Diagrama de pizza dos eventos extremos e de neutralidade via RDI para as três escalas adotadas no estudo.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização geográfica (latitude e longitude, °), altitude (m), período e percentual de falhas (%) das estações convencionais do INMET para cada capital do NEB.....	23
Tabela 2 - Escala de tempo de seca e seus impactos para interpretação do índice SPI.	28
Tabela 3 - Classificação dos períodos secos e chuvosos do SPI e RDI.....	29
Tabela 4 - Coeficiente de correlação de Pearson (r) e sua classificação (HOPKINS, 2009).....	33
Tabela 5 - Anos registrados de ocorrências de ENOS – pelo índice ONI (Oceanic Niño index). Adaptada do ggweather.	34
Tabela 6 - Valores do EPE e RMSE (mm) para cada cidade do NEB.	38

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA - Análise de Agrupamento
AL - Alagoas
ANA - Agência Nacional de Águas
AS - América do Sul
aSPI - Agricultural Standardized Precipitation Index
BA - Bahia
BHC - Balanço Hídrico Climático
CA - Analise Combinatoria
CCC - Coeficiente de Correlação Cofenética
CE - Ceará
CPC - Climate Prediction Center
CWD - Deficiência Hídrica Climática
DOL - Distúrbios Ondulatorios de Leste
DrinC - Drought Indices Calculator
e - Pressão de Vapor
EMC - Estações Meteorológicas Convencionais
ENEB - Leste Norte do Nordeste Brasileiro
ENSO - El Niño-Oscilação Sul
EPE - Erro Padrão de Estimativa
Eq - Equação
eRDI - Effective Reconnaissance Drought Index
ET - Evapotranspiração
ET0 - Evapotranspiração de Referência
ETr - Evapotranspiração Real
FDP - Função de Densidade de Probabilidade
G1 - Grupo 1
G2 - Grupo 2
G3 - Grupo 3
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
Km - quilômetros
LI - Linhas de Instabilidade
MA – Maranhão mm - milímetros

NEB - Nordeste Brasileiro
NNEB - Norte do Nordeste Brasileiro
OMJ - Oscilação Madden-Julian
ONI - Oceanic Niño Index
P - Precipitação PB - Paraíba
PD - Precipitation Deciles
PDSI - Palmer Drought Severity Index
PE - Pernambuco
PET - Evapotranspiração
PI - Piauí
r - Pearson
R² - Coeficientes De Determinação
RDI - Reconnaissance Drought Index
RDIst - Reconnaissance Drought Index Padronizada
RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático
RML – Regressão Múltipla Linear
RN - Rio Grande do Norte
SE - Sergipe
SNEB - Sul do Nordeste Brasileiro
SPI - Standardized Precipitation Index
SPIE - Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração
SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
Tmax - Temperatura Máxima
Tmin - Temperatura Mínima
U - Velocidade do Vento
us - Umidade do Solo
VCAN - Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
VPD - Déficit de Pressão de Vapor
ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	GERAL	15
2.2	ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	A SECA NO MUNDO.....	16
3.2	A SECA NO NORDESTE BRASILEIRO	16
3.3	SISTEMAS METEOROLÓGICOS QUE ATUAM NO NEB	17
3.4	METODOLOGIAS APLICADAS NA AVALIAÇÃO E MONITORAMENTO DA SECA	18
3.5	ESTUDOS APLICADOS UTILIZANDO O SPI E RDI	19
4	MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	21
4.2	SÉRIE TEMPORAL PLUVIOMÉTRICA (1980 - 2021).....	22
4.3	PREENCHIMENTO DE FALHAS NOS DADOS OBSERVADOS.....	23
4.4	PRODUTO	25
4.5	MODELO DRINC.....	26
4.6	STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX (SPI)	27
4.7	RECONNAISSANCE DROUGHT INDEX (RDI).....	29
4.8	EVAPOTRANSPIRAÇÃO PELO MÉTODO DE PENMAM–MONTEITH.....	30
4.9	ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (AA).....	31
4.10	ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO	32
4.11	EL NIÑO-SOUTHERN OSCILLATION (ENOS)	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	VALIDAÇÃO DO PRODUTO TERRACLIMATE.....	35
5.2	SPI APLICADO AS CAPITAIS DO NEB	40
5.2.1	Análise de Agrupamento da Precipitação.....	40
5.3	ANÁLISE DO SPI	42
5.3.1	Anual.....	44
5.3.2	Semestral	47
5.3.3	trimestral	49
5.4	RDI APLICADO AS CAPITAIS DO NEB.....	52

5.4.1	Análise de Agrupamento da PET.....	52
5.4.2	Anual.....	54
5.4.3	Semestral.....	57
5.4.4	Trimestral.....	59
5.5	Porcentagem dos Eventos	61
6	CONCLUSÕES.....	63
7	LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES.....	63
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

A região do Nordeste Brasileiro (NEB) é conhecida por enfrentar uma série de desafios relacionados à disponibilidade hídrica, tornando-se uma das áreas mais problemáticas do país. Neste sentido, sua variabilidade climática natural é um fator relevante para essa situação. A região é caracterizada por ciclos de longa seca e chuvas intensas e irregulares, influenciada por fatores como circulação atmosférica, temperatura do mar, topografia e vegetação. A falta de água na região tem impactos significativos na população, na agricultura e na economia, tornando-se uma questão prioritária para o desenvolvimento sustentável (HASTENRATH, 1984; MAGALHÃES; GLANTZ, 1992; FERREIRA et al., 2018).

Diversos eventos meteorológicos exercem influência sobre a região do Nordeste brasileiro. O fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e suas fases quentes (El Niño), fria (La Niña) e neutra, bem como a Oscilação Madden-Julian (OMJ), desempenham um papel importante na precipitação e temperatura na América do Sul, incluindo o NEB (HASTENRATH, 1984; ALVAREZ, 2016; LYRA; ARRAUT, 2023). Além desses eventos, outros estudos têm se concentrado na análise de fenômenos atmosféricos que afetam a região, tais como o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) (MOTA; GANDÚ, 1996; REBOITA; SANTOS, 2015; ALVAREZ et al., 2016; REBOITA, 2017).

A identificação e o monitoramento da seca são desafios fundamentais para compreender e lidar com essa problemática na região. Para tanto, é necessário utilizar uma metodologia adequada. Uma das abordagens utilizadas é a comparação de índices de seca, sendo o software DrinC (Drought Indices Calculator) uma ferramenta frequentemente empregada nesse contexto. O DrinC permite comparar diferentes índices de seca, utilizando séries históricas de dados pluviométricos, de temperatura do ar e de evapotranspiração (ET). Estudos como o de Tigkas et al. (2015) têm utilizado o software DrinC para esse fim, assim como Ansarifard e Shamsnia (2018) discutem o uso do software DrinC para o monitoramento da seca por meio do Reconnaissance Drought Index (RDI) e do Standardized Precipitation Index (SPI).

Diante das secas no NEB, a gestão dos recursos hídricos torna-se uma preocupação constante, exigindo a busca por alternativas para mitigar os impactos

negativos causados pela falta de água (CANTELLE et al., 2018). É importante também avaliar os riscos associados às chuvas extremas, especialmente nas capitais do NEB (DE SOUSA et al., 2016).

Outro ponto é a relevância social deste estudo se destaca pelo potencial de suas descobertas para aprimorar o entendimento dos padrões climáticos na região do Nordeste do Brasil.

Em suma, o estudo tem como objetivo compreender a seca nas capitais do NEB, considerando a utilização de índices de seca, e investigar os padrões de teleconexão e sua influência na dinâmica da seca e suas consequências. O conhecimento adquirido é fundamental para orientar ações de mitigação e adaptação, visando minimizar os impactos socioeconômicos e promover um desenvolvimento mais sustentável na região.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

- I. **AVALIAR** a seca via Standardized Precipitation Index (SPI) e o Reconnaissance Drought Index (RDI) a partir dos produtos de precipitação e evapotranspiração do TERRACLIMATE nas Capitais do NEB baseado no software DrinC.

2.2 ESPECÍFICOS

- I. **VALIDAR** o produto TERRACLIMATE para as Capitais do NEB;
- II. **IDENTIFICAR** a intensidade e a frequência da seca em multiescala nas Capitais do NEB;
- III. **RELACIONAR** os eventos de seca com as fases do ENOS nas Capitais do NEB.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A SECA NO MUNDO

A seca é um fenômeno recorrente em diversas partes do mundo, causando impactos significativos na agricultura, na economia e na vida das pessoas. Estudos indicam que a variabilidade climática e as mudanças no clima global têm contribuído para o aumento da frequência e intensidade de eventos de seca em diferentes regiões do planeta (MARENGO et al., 2011; RAHMAT et al., 2015).

Desta forma, a seca é um problema que afeta não apenas regiões áridas e semiáridas, mas também áreas urbanas e de alta pluviosidade. Na Austrália, por exemplo, estudos têm sido desenvolvidos para avaliar a seca em áreas com alta precipitação, utilizando índices meteorológicos para avaliar a intensidade e a duração da seca (RAHMAT et al., 2015). Além disso, na Europa, a gestão da seca tem sido uma preocupação constante, com a implementação de planos de gerenciamento de seca em diferentes países, como na Espanha (ESTRELA; VARGAS, 2012).

Em suma, a seca é um problema complexo que afeta diversas partes do mundo, exigindo uma abordagem multidisciplinar para sua avaliação, monitoramento e gestão. O desenvolvimento de ferramentas e índices para quantificar a seca é uma ferramenta importante para identificar áreas afetadas e avaliar a intensidade e a duração do fenômeno. Além disso, a implementação de planos de gerenciamento de seca é essencial para minimizar os impactos negativos na agricultura, economia e na vida das pessoas.

3.2 A SECA NO NORDESTE BRASILEIRO

A seca no NEB é um fenômeno recorrente que impacta na economia e na vida das populações locais. Estudos têm apontado que a variabilidade e mudanças climáticas têm contribuído para a intensificação da seca na região (MARENGO et al., 2011). Marengo (2016) analisou a relação entre a seca no NEB e as fases do ENOS (El Niño e La Niña). Além disso, Silva e Nobre (2016) analisaram as secas no NEB nos últimos 30 anos, sendo considerado os aspectos climáticos e socioeconômicos da região. Já o estudo realizado por Silva (2018) investigou a relação entre secas e

uso do solo na região, com objetivo de identificar práticas de manejo que possam contribuir para a adaptação à seca.

O estudo realizado por Cantelle (2018) avaliou os impactos da seca na produção de energia hidrelétrica no NEB. Já Sotto (2019), discutiu a relação entre secas e a disponibilidade de água para consumo humano, e assim propôs estratégias para a gestão integrada dos recursos hídricos. Todos os estudos listados anteriormente contribuem para um maior entendimento das secas no NEB e fornecem subsídios importantes para o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias de adaptação aos impactos da seca na região.

3.3 SISTEMAS METEOROLÓGICOS QUE ATUAM NO NEB

O NEB tem uma alta variabilidade interanual e intrazonal da chuva, com destaque a influência térmica dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical, os quais controlam e modulam anos de seca e enchentes na região (ALVES et al., 2017; LYRA et al., 2017).

O NEB é uma região que é afetada por sistemas meteorológicos em multiescala ao longo do ano. De acordo com Marengo (2016), os principais sistemas que influenciam o clima no NEB são: i) a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), ii) as Frentes Frias (FF) e iii) os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN).

A ZCIT é um sistema de baixa pressão que se forma na faixa equatorial, e tem grande influência no clima do NEB durante a estação chuvosa, sendo responsável pelas chuvas intensas e generalizadas (MARENGO et al., 2012). Outra definição da ZCIT consiste numa faixa de nuvens que se desloca em torno do Equador, sendo responsável pela maior parte das chuvas no NEB (REBOITA; SANTOS, 2015). Os sistemas frontais são responsáveis pela ocorrência de chuvas, ventos e mudanças na temperatura. Durante o inverno, a região recebe a atuação de frentes frias, que podem trazer umidade e chuvas intensas, e durante o verão, a região é afetada por sistemas frontais que geram chuvas mais isoladas (LEMOS; CALBETE, 1996).

Os VCANs são sistemas de baixa pressão que se formam em altitudes elevadas, e são responsáveis pela ocorrência de chuvas intensas e localizadas, especialmente na região litorânea (REBOITA et al., 2017). No NEB podemos destacar a influência da Oscilação Madden-Julian (OMJ) (ALVAREZ). A OMJ é um sistema que

se desloca pelos Oceanos Índico e Pacífico, com influência direta no clima do NEB (ALVES, 2018).

Em conclusão, o NEB é uma região caracterizada por uma alta variabilidade climática e pela influência de diversos sistemas meteorológicos em diferentes escalas ao longo do ano.

3.4 METODOLOGIAS APLICADAS NA AVALIAÇÃO E MONITORAMENTO DA SECA

A avaliação e monitoramento da seca têm sido objeto de estudo de diversas áreas, como a meteorologia, hidrologia e gestão de recursos hídricos. Por exemplo, o estudo realizado por (HERRERA-ESTRADA, SATOH, SHEFFIELD, 2017) onde eles apresentaram uma nova metodologia de análise de secas meteorológicas baseada na intensidade e duração do evento.

Em relação aos estudos e pesquisas sobre secas foi alcançado um marco significativo por meio do desenvolvimento de índices de seca. Esses índices possibilitam a avaliação dos impactos das secas em setores diversos, como agricultura e abastecimento de água. Esses avanços foram resultado do trabalho de diferentes pesquisadores, tais como McKee et al. (1993) e Vicente-Serrano (2010), que desenvolveram índices de seca, como o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI).

Além disso, o uso de modelos climáticos e sensoriamento remoto tem permitido aprimorar a previsão de secas meteorológicas, como destacado por Mera (2018) em seu estudo sobre a previsão de secas em regiões tropicais. Outra área de avanço significativo é o estudo dos impactos das secas na saúde humana. Van Loon et al. (2016) discutiram a relação entre secas meteorológicas e a incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares. Esses estudos têm sido fundamentais para implementação de políticas públicas e estratégias de adaptação aos impactos das mudanças climáticas, visando minimizar os efeitos negativos das secas na sociedade e no meio ambiente.

Diversos estudos têm aplicado o SPI em diferentes escalas de tempo, desde mensal até anual, para analisar a ocorrência de secas e caracterizar o seu comportamento espaço-temporal em diferentes áreas do país. Um exemplo de aplicação do SPI em escala trimestral é o estudo de Suassuna e Maia (2017), que

utilizaram o índice para identificar períodos de seca agrícola no Rio Grande do Norte. Já Carmo e Lima (2020) caracterizaram a ocorrência de secas no Nordeste em diferentes escalas de tempo, incluindo trimestral e semestral, e analisaram a sua variação espaço-temporal ao longo dos anos.

Em outra região do país, Gois et al. (2015) aplicaram modelos teóricos transitivos na interpolação espacial do SPI para analisar a ocorrência de secas durante episódios de El Niño forte no Estado do Tocantins. Por sua vez, Gois et al. (2007) avaliaram a seca em alguns municípios do Sertão Alagoano através do SPI, mostrando a sua utilidade em regiões com diferentes características climáticas.

Por fim, Terassi et al. (2020) aplicaram o SPI na identificação do padrão das chuvas na vertente paranaense da bacia hidrográfica do Rio Itararé, em escala anual, demonstrando a importância desse índice para o monitoramento de secas em diferentes regiões do país. Em todos esses estudos, o SPI se mostrou uma ferramenta eficaz para a identificação e caracterização de períodos de seca em diferentes escalas de tempo e regiões do Brasil.

Em resumo, o desenvolvimento de índices de seca, avanços na previsão de secas meteorológicas e o estudo dos impactos das secas na saúde humana têm contribuído para uma melhor compreensão e enfrentamento desse fenômeno, sendo essenciais para a adoção de medidas de mitigação e adaptação aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

3.5 ESTUDOS APLICADOS UTILIZANDO O SPI E RDI

Nos últimos anos, houve um avanço significativo no estudo de secas em todo o mundo, no intuito de entender as suas causas e impactos diversas ferramentas têm sido desenvolvidas para quantificar e monitorar a seca, como o Índice de Severidade da Seca (PDSI), Índice de Precipitação Padronizado (SPI) e o Índice de Reconhecimento de Seca (RDI). Esses índices permitem a identificação e quantificação da seca em diferentes escalas espaciais e temporais, possibilitando a avaliação de seus impactos na região afetada (ESTRELA; VARGAS, 2012; TIGKAS et al., 2015;).

Sendo assim, o DrinC calcula os índices de seca considerando todos os fatores através da interface flexível e fornece uma saída simples (SURENDRAN, 2019).

Segundo Tigkas (2015), o modelo DrinC pode ser usado em uma variedade de aplicações, incluindo caracterização de secas, monitoramento de secas, delimitação da extensão espacial da seca, investigação de tendências climáticas e avaliação da severidade da seca para uma série de possíveis cenários climáticos de seca ou futuros. O software permite o monitoramento da seca, juntamente com a avaliação da distribuição espacial e a investigação das condições climáticas e de seca (SURENDRAN et al., 2019).

Além disso, o DrinC tem sido utilizado em vários estudos para análise de seca, incluindo Ansarifard e Shamsnia (2018) e Sobral et al. (2018). Esses estudos mostraram que o modelo é efetivo para análise de seca em diferentes escalas de tempo, desde curtos períodos de tempo até longas séries históricas. Além disso, o DrinC também pode ser aplicado em diferentes regiões do mundo, com resultados precisos e confiáveis.

Embora o DrinC seja um modelo efetivo para análise de seca, ele apresenta algumas limitações. Uma dessas limitações é a dependência de dados de entrada precisos, como dados de precipitação e evapotranspiração. Se esses dados não estiverem disponíveis ou forem imprecisos, os resultados obtidos pelo modelo podem não ser confiáveis (TIGKAS et al., 2015;). Essas variáveis também podem afetar a ocorrência e a intensidade da seca em diferentes regiões do mundo. Por fim, o endereço eletrônico, para download do software se encontra em: DrinC software - Drought Indices Calculator (drought-software.com).

Em relação aos estudos sobre seca, o ano hidrológico é frequentemente utilizado para calcular índices de seca, como o RDI. Esses índices são úteis para a identificação e monitoramento de situações de escassez de água, e a definição do ano hidrológico é fundamental para o cálculo correto desses índices. Dessa forma, a definição do ano hidrológico é uma questão relevante para a gestão de recursos hídricos e para a análise de eventos de seca. É importante ressaltar que a escolha do período de referência deve ser adequada às características climáticas e hidrológicas da região estudada, levando em consideração fatores como as variações sazonais de precipitação e vazão dos rios. (Zarch et al., 2015; Vangelis et al., 2018; Zarei, 2018; Moghimi et al., 2020).

Em suma, a seca é um problema complexo que afeta diversas partes do mundo, exigindo uma abordagem multidisciplinar para sua avaliação, monitoramento e gestão. O desenvolvimento de ferramentas e índices para quantificar a seca é uma ferramenta

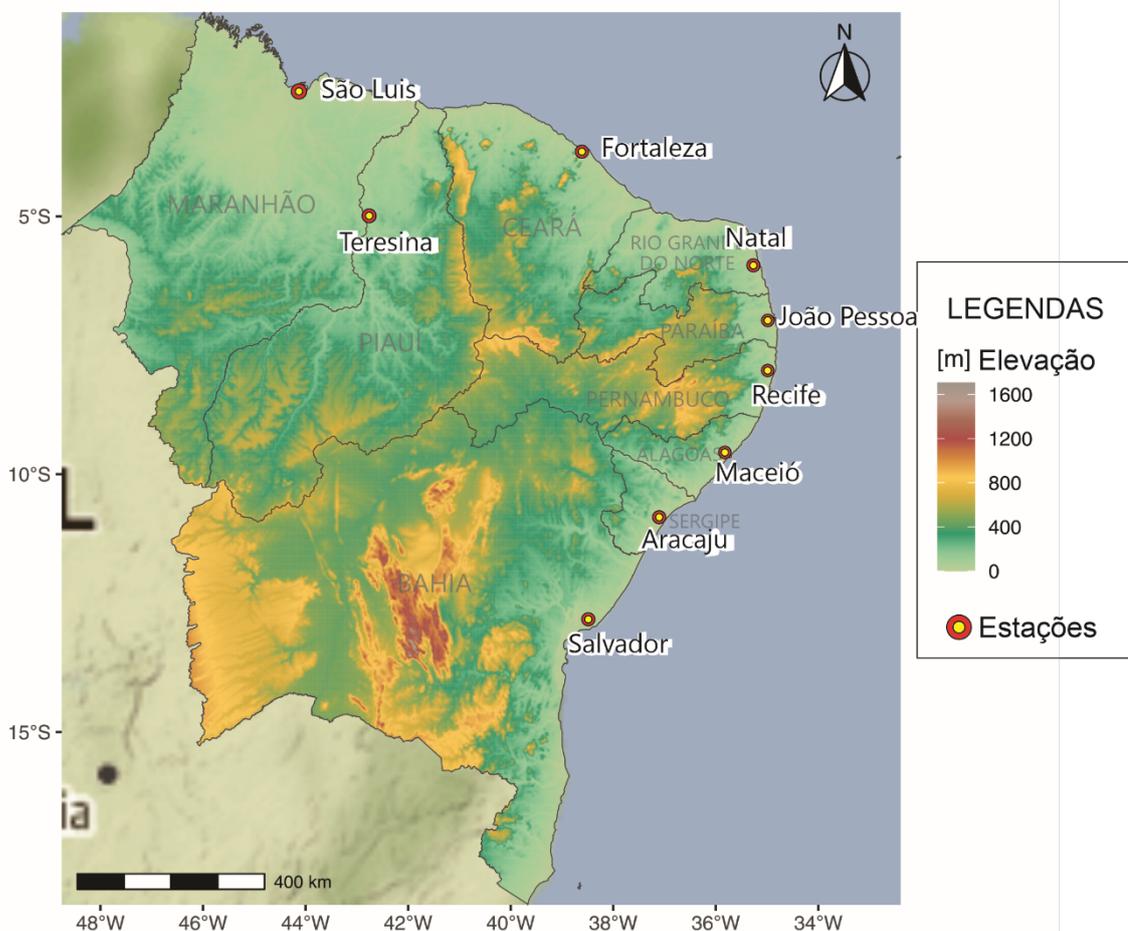
importante para identificar áreas afetadas e avaliar a intensidade e a duração do fenômeno. Além disso, a implementação de planos de gerenciamento de seca é essencial para minimizar os impactos negativos na agricultura, economia e na vida das pessoas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O NEB (Figura 1) situa-se em uma região equatorial entre os paralelos 1-21°S e os meridianos 32-49°W. A região possui uma área de aproximadamente 1,800,55 km², correspondente a 20% do território do Brasil (DA ROCHA JÚNIOR, 2020). O NEB é composto por nove estados, sendo eles: Piauí (PI) – Teresina; Maranhão (MA) – São Luís; Ceará (CE) – Fortaleza; Rio Grande do Norte (RN) – Natal; Paraíba (PB) – João Pessoa; Pernambuco (PE) – Recife; Alagoas (AL) – Maceió; Sergipe (SE) - Aracaju e Bahia (BA) – Salvador.

Figura 1 - Nordeste Brasileiro (NEB) e seus nove estados e suas capitais, seguido da topografia, respectivamente.



Fonte: Autor, 2023.

4.2 SÉRIE TEMPORAL PLUVIOMÉTRICA (1980 - 2021)

Observado

Neste estudo foram utilizados os dados pluviométricos mensais de estações meteorológicas convencionais (EMC) do INMET referentes às nove capitais do NEB, conforme a Figura 1 e a Tabela 1. O período de estudo compreende 1980 a 2021.

Tabela 1 - Localização geográfica (latitude e longitude, °), altitude (m), período e percentual de falhas (%) das estações convencionais do INMET para cada capital do NEB.

CIDADE	LAT. (°)	LON. (°)	ALT. (m)	PERÍODO	PERCENTUAL (%)
SÃO LUÍS	-2,52	-44,21	54,8	1980 - 2021	0%
FORTALEZA	-3,81	-38,53	29,55	1980 - 2021	20%
TERESINA	-5,03	-42,80	75,23	1980 - 2021	7,3%
NATAL	-5,83	-35,20	47,46	1980 - 2021	15%
JOÃO PESSOA	-7,16	-34,81	33,5	1980 - 2021	1,3%
RECIFE	-8,05	-34,95	11,3	1980 - 2021	5,2%
MACEIÓ	-9,55	-35,77	84,12	1980 - 2021	11,2%
ARACAJU	-10,95	-37,05	3,72	1980 - 2021	1%
SALVADOR	-13,00	-38,50	47,56	1980 - 2021	0,3%

Fonte: Adaptado do INMET (2023).

4.3 PREENCHIMENTO DE FALHAS NOS DADOS OBSERVADOS

A serie histórica do INMET, apresentou algumas percentagens de falhas (tabela 1), devido a isto foi necessário aplicar técnicas de preenchimento de falhas.

O preenchimento de falhas em séries históricas pluviométricas é uma etapa crucial na análise climatológica, uma vez que a ausência de dados pode comprometer a precisão e a representatividade das informações. Diversos métodos têm sido desenvolvidos para lidar com essa questão, visando a obtenção de séries contínuas e confiáveis. Dentre esses métodos, destaca-se a regressão linear múltipla, que utiliza variáveis independentes, como a localização geográfica, altitude, proximidade de outras estações e outras características do ambiente, para estimar os valores faltantes de precipitação pluviométrica.

O estudo de Mello, Kohls e Oliveira (2017) aborda a aplicação de diferentes métodos para o preenchimento de falhas em estações pluviométricas, incluindo a regressão linear múltipla. Os resultados são apresentados e comparados,

evidenciando a eficácia e a importância desse método na obtenção de séries históricas completas e consistentes.

Além disso, Junqueira, Amorim e Oliveira (2018) realizaram uma comparação entre diferentes metodologias de preenchimento de falhas em dados pluviométricos, incluindo a abordagem de regressão linear múltipla. Nessa investigação, a técnica demonstrou-se promissora, destacando-se pelos resultados obtidos em termos de precisão e coerência dos dados imputados.

Outra perspectiva interessante é abordada por Brubacher, Oliveira e Guasselli (2020), que discutem os desafios e as perspectivas do preenchimento de falhas e espacialização de dados pluviométricos. A regressão linear múltipla é mencionada como uma alternativa a ser considerada nesse contexto, apresentando-se como uma ferramenta útil para estimar valores em locais onde não há estações pluviométricas, possibilitando uma melhor compreensão dos padrões pluviométricos em áreas mais remotas e carentes de informações.

Em síntese, o método do preenchimento de falhas utilizando regressão linear múltipla em séries históricas pluviométricas revela-se como uma abordagem promissora e relevante para o avanço da climatologia, permitindo a obtenção de dados mais completos e representativos para análises e tomadas de decisão em diversas áreas, como agricultura, gestão de recursos hídricos e planejamento urbano. As referências citadas fornecem suporte teórico e embasamento empírico para a aplicação desse método, contribuindo para o aprimoramento das técnicas de preenchimento de falhas em séries pluviométricas.

Para resolução das falhas nas series, foi utilizado a técnica apresentada, regressão linear múltipla. Sendo este método muito validado na literatura. Para melhor estruturar a serie histórica de dados pluviométricos das estações das capitais do NEB, o método de preenchimento de falhas utilizado foi a RLM.

Na regressão múltipla as informações pluviométricas dos postos Y são correlacionadas com as correspondentes observações de outras estações vizinhas, por meio da seguinte equação:

$$y_c = x_{1i} + a_1 x_{2i} + \dots + a_{n-1} x_{ni} + \quad (1)$$

Onde n = o número de postos considerados, a_0, a_1, \dots, a_n = os coeficientes a serem estimados e $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}$ = as observações correspondentes registradas nos postos vizinhos. Uma outra alternativa pode ser a relação potencial do tipo:

$$y_{ci} = a_0 \cdot x_{1i}^{a_1} \cdot x_{2i}^{a_2} \cdot x_{3i}^{a_3} \dots x_{ni}^{a_n} \quad (2)$$

4.4 PRODUTO

O TerraClimate fornece um conjunto de dados global, abrangente, de alta resolução e em grade de variáveis de clima mensal e balanço hídrico climático (BHC) que abrange o período de 1958 a 2021. Esse conjunto de dados permite análises em escala de alta resolução das interações complexas entre o clima e os ecossistemas, com resolução espacial de aproximadamente 4 km ($1/24^\circ$) (ABATZOGLOU et al., 2018). O conjunto de dados TerraClimate é dividido em variáveis climáticas primárias e secundárias. As variáveis climáticas primárias são temperatura máxima (T_{max} , °C), temperatura mínima (T_{min} , °C), pressão de vapor (e , hPa), precipitação total (P , mm), radiação de ondas curtas de superfície descendente (R_s , $W \cdot m^{-2}$) e velocidade do vento (U , $m \cdot s^{-1}$).

Já as variáveis climáticas secundárias são a evapotranspiração de referência (ET_0) (modelo padronizado ASCE Penman-Monteith), escoamento, evapotranspiração real (ET_r), deficiência hídrica climática (CWD , mm), umidade do solo (us , cm), neve equivalente à água, índice de severidade da seca de Palmer (PDSI) e déficit de pressão de vapor (VPD , hPa). O site para acesso a plataforma de dados é no seguinte endereço eletrônico: <https://climatetoolbox.org/tool/Data-Download>. Os dados do TerraClimate e os dados observados do INMET foram selecionados o mesmo período para efeito de validação.

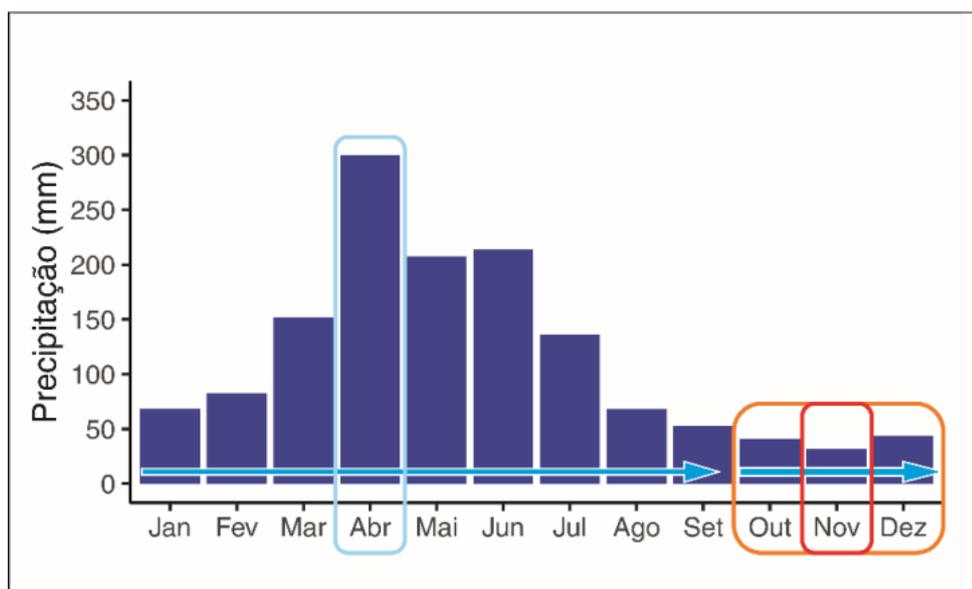
4.5 MODELO DRINC

O DrinC é um software utilizado para análise de seca baseado em índices de seca existentes na literatura. O modelo foi desenvolvido por Tigkas et al. (2015), com objetivo de monitorar e analisar a seca em diferentes regiões do mundo. O DrinC utiliza os seguintes índices de seca: i) Reconnaissance Drought Index (RDI),

ii) Standardized Precipitation Index (SPI), iii) Precipitation Deciles (PD), iv) Agricultural Standardized Precipitation Index (aSPI) e o v) Effective Reconnaissance Drought Index (eRDI).

No estudo foram usados apenas o SPI e RDI. O RDI é um índice baseado na evapotranspiração (PET) juntamente com a precipitação, enquanto o SPI é um índice baseado apenas na precipitação. O DrinC se baseia no ano hidrológico para avaliar a seca. No Brasil, o ano hidrológico (figura 2) começa em outubro de um ano e termina em setembro do ano seguinte. Essa definição é importante para a gestão de recursos hídricos, pois permite o planejamento e o monitoramento das atividades relacionadas à água.

Figura 2 - Exemplo da determinação e caracterização do ano hidrológico para a capital de Maceió, para o ano de 2018.



Fonte: Autor, 2023.

4.6 STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX (SPI)

O SPI descreve uma função de densidade de probabilidade (FDP) que descreve as séries temporais, quantificando o déficit ou o excesso de precipitação em diferentes escalas de tempo. Tal característica torna o SPI uma valiosa ferramenta nos diversos estudos de disponibilidade hídrica seja de curta ou de longa duração (HAYES et al., 1999).

A função gama é dada por:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (3)$$

Em que: $\alpha > 0$ é o parâmetro de forma (adimensional) ; $\beta > 0$ é o parâmetro de escala (mm); $x > 0$ e a quantidade de precipitação (mm).

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad \rightarrow \text{função gama (4)}$$

Os parâmetros de α e β da função densidade de probabilidade gama incompleta ajusta os dados que são estimados para cada estação para escala de tempo que interessam estudar e para cada mês do ano.

O SPI foi criado com a finalidade de ser um indicador de seca, que leva em consideração a importância das diferentes escalas de tempo que afetam a disponibilidade de água. Dessa forma, seu cálculo é baseado em séries e períodos médios selecionados para determinar séries de escalas de tempo de i meses, $i = 1, 2, 3, \dots, 12$, e além. A escolha dos valores de i é arbitrária, porém são escolhidos

valores que representam escalas de tempo de déficits de precipitação significativos. (DOMINGOS, 2006).

Tabela 2 - Escala de tempo de seca e seus impactos para interpretação do índice SPI.

Escala do tempo (Meses)	Denominação da Seca	Impactos
1	Meteorológica	Qualidade do ar, Saúde humana, stress agrícola
3	Agrícola	Condição de umidade do solo
6	Agrícola (estações seca/chuvosa)	Condições de umidade do solo em reservas mais profundas
12	Hidrológica	Vazão de rios; níveis de corpos de água e reservatórios; condições de aquíferos
24,48....	Socioeconômica	Disponibilidade e acessibilidade de produtos e serviços

Fonte: adaptado de (SVOBODA et al., 2012) pelo autor.

Com o uso da tabela 3 é possível classificar os períodos de seca em termos de intensidade (leve, moderada, severa e extrema). Seu uso pode auxiliar na tomada de decisões por parte de gestores de recursos hídricos e agricultores, bem como contribuir para o planejamento de ações de adaptação às mudanças climáticas.

Tabela 3 - Classificação dos períodos secos e chuvosos do SPI e RDI.

SPI	Categorias
< -2,0	Seca Extrema
-1,99 a -1,50	Seca Severa
-1,49 a -1,0	Seca Moderada
-0,99 a -0,49	Seca Leve
-0,49 a 0,49	Quase Normal
0,49 a 0,99	Chuva Leve
0,99 a 1,49	Chuva Moderada
1,49 a 1,99	Chuva Severa
> 2,0	Chuva Extrema

Fonte: Adaptado de McKee et al. (1993).

4.7 RECONNAISSANCE DROUGHT INDEX (RDI)

O RDI é um índice utilizado para monitorar a seca em regiões áridas e semiáridas, tendo sido desenvolvido para superar algumas das limitações do SPI. O RDI leva em consideração não apenas a precipitação, mas também a ET, uma vez que a água evaporada é uma perda para o sistema hidrológico. Dessa forma, o RDI é capaz de capturar a intensidade, a duração e a frequência das secas com maior precisão.

Sendo assim, o RDI é expresso na forma inicial (α) e na forma padronizada (RDIST). O valor inicial ($\alpha(i)$) de RDI é normalmente calculado para o i -ésimo ano em uma base de tempo de k meses consecutivos da seguinte forma:

$$\alpha_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}}, i = 1(1) e j = 1(1)k \quad (4)$$

em que, P_{ij} e PET_{ij} são a precipitação e a evapotranspiração potencial do j -ésimo mês do i -ésimo ano e N é o número total de anos dos dados disponíveis. Agora assumindo que a distribuição lognormal é aplicada, a seguinte equação pode ser usada para o cálculo de RDIST:

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y^{(i)} - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y} \quad (5)$$

Em que $y^{(i)}$ é $\ln(\alpha_k^{(i)})$, \bar{y} é a média aritmética e $\hat{\sigma}_y$ é o desvio padrão.

Para este estudo foi usado a função de densidade gama (Eq. 5), pois aplicando esta função ao cálculo do RDI é possível obter resposta de escala de tempo menor, como mensalmente, e que podem incluir valor de precipitação igual a zero, para o quais a Eq. (4) não pode ser aplicado (TSAKIRIS, 2008). A classificação da seca através do RDI acontece da mesma maneira que o SPI, através da tabela 2 é possível mensurar o impacta da seca.

4.8 EVAPOTRANSPIRAÇÃO PELO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

O cálculo da evapotranspiração (ET) é um indicador importante para avaliar a disponibilidade de água e a demanda hídrica de um determinado local. O método Penman-Monteith é um dos mais utilizados para estimar a evapotranspiração potencial (PET), que é a ET que ocorreria em um ambiente com cobertura vegetal completa, solo úmido e sem limitações de água e nutrientes. O método leva em consideração variáveis meteorológicas como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar. (TURCO, 2008; DE SOUZA, 2019; ROCHA,2020).

O produto TerraClimate utiliza dados de precipitação e temperatura do ar para estimar a PET usando o método Penman-Monteith (Eq. 6). O TerraClimate é uma base de dados global de alta resolução que contém informações de clima e balanço hídrico mensais de 1958 a 2015 (ABATZOGLOU, 2018). Para a obtenção dos dados de evapotranspiração potencial calculado pelo TerraClimate proposto por Abatzoglou (2018) encontra-se no endereço eletrônico: <https://climatetoolbox.org/tool/Data-Download>.

Equação de Penman-Monteith:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (6)$$

Onde:

ETo - Evapotranspiração de referência [mm dia-1],

Rn - Radiação líquida na superfície da cultura [MJ m-2 dia-1],

G - Densidade do fluxo de calor do solo [MJ m-2 dia-1],

T - Temperatura média diária do ar a 2 m de altura [°C],

u2 - Velocidade do vento a 2 m de altura [m s-1],

es - Pressão de vapor de saturação [kPa],

ea - Pressão de vapor real [kPa],

es-ea - Déficit de pressão de vapor de saturação es-ea [kPa],

Δ - Inclinação curva de pressão de vapor [kPa °C-1],

Y - Constante psicrométrica [kPa °C-1].

4.9 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (AA)

Atualmente, a literatura científica apresenta diversos métodos de agrupamento, sendo associados às funções que resultam em diferentes configurações de grupos, sendo listados por Wilks (1995) são: Método da Ligação Simples, Método da Ligação Completa, Método do Centróide e Método de Ward.

Neste estudo, foi utilizado o método de ligação Completa (Máxima distancia, ou vizinho mais distante), ou seja, dados três grupos (i, j), (j,k) e (k,i) a distância entre eles será a maior das distâncias entre os seus elementos, (Eq. 6):

$$d_{(i,j,k)} = \max\{d_{ij}, d_{jk}, d_{ki}\} \quad (7)$$

É importante ressaltar que a união ainda é feita com os grupos mais parecidos, ou seja, a menor distância. Para a classificação dos grupos, o método Euclidiano foi utilizado como medida de distância. Para a validação do método e verificação da qualidade do agrupamento foi aplicado o Coeficiente de Correlação Cofenética (CCC), dado pela Eq. 8.

$$CCC = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (c_{ij}-cm)(d_{ij}-dm)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (c_{ij}-cm)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (d_{ij}-dm)^2}} \quad (8)$$

Em que, c_{ij} é o valor de dissimilaridade entre as amostras obtidas via matriz cofenética; d_{ij} é o valor de dissimilaridade entre amostras obtidas a partir da matriz de dissimilaridade. O cm e o dm são obtidos por meio das Eqs. (9) e (10), respectivamente.

$$cm = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} \quad (9)$$

$$dm = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} \quad (10)$$

Conforme Carvalho (2018), o CCC equivale à correlação de Pearson entre a matriz de dissimilaridade original e a gerada após a construção do dendrograma. Desse modo, quanto mais próximo de 1 maior será a homogeneidade do grupo e, conseqüentemente, melhor será a qualidade do agrupamento.

4.10 ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO

Para a avaliação do produto TerraClimate foram utilizados os seguintes métodos estatísticos: i) Regressão Linear (r-quad), ii) Correlação Linear de Pearson (r), iii), cujo a categorização do coeficiente r é listado na tabela 4 o Erro Padrão de Estimativa (EPE, mm) e a iv) raiz do erro médio quadrático (RMSE, mm), conforme as equações a seguir:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (11)$$

$$r = \frac{\sum O_i P_i}{\sqrt{\sum O_i^2} \sqrt{\sum P_i^2}} \quad (12)$$

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (O_i - p_i)^2}{n-1}} \quad (13)$$

Em que:

- p_i = o iésimo valor estimado de precipitação (mm)
- O_i = o iésimo valor observado de precipitação (mm)
- O = valor médio observado de precipitação (mm)
- y_p = valor previsto pelo modelo (mm)
- y_R = valor real das observações (mm)
- N = número de dados analisados.

Tabela 4 - Coeficiente de correlação de Pearson (r) e sua classificação (HOPKINS, 2009).

Coeficiente de Correlação de Pearson (r)	Classificação
0 - 0,1	Muito baixa
0,1 - 0,3	Baixa
0,3 - 0,5	Moderada
0,5 - 0,7	Alta
0,7 - 0,9	Muito alta
0,9 - 1,0	Quase perfeita

Fonte: Adaptada pelo Autor, 2023.

Todos os cálculos neste estudo foram realizados no software Rstudio 2023.03.0 Build 386, ambiente R na versão 4.22 (R CORE TEAM, 2023).

4.11 EL NIÑO-SOUTHERN OSCILLATION (ENOS)

Com o objetivo de compreender a variabilidade da precipitação nas capitais do NEB, considerou-se a influência do modo de variabilidade interanual ENOS, o qual é caracterizado por apresentar três fases distintas, sendo elas a fase positiva (El Niño), a fase negativa (La Niña) e a fase neutra. A classificação das fases do ENOS é

estabelecida com base nas anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) da região Equatorial do Pacífico, definidas a partir da região El Niño 3.4 através do Oceanic Niño Index (ONI) - (NOAA/CPC, 2021). Os dados das ocorrências do ENOS, em suas fases El Niño, La Niña e Neutra, são fundamentadas pelo National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), disponíveis no endereço eletrônico: (ggweather.com).

Tabela 5 - Anos registrados de ocorrências de ENOS – pelo índice ONI (Oceanic Niño index). Adaptada do ggweather.

El Niño				La Niña		
Fraco	Moderado	Forte	Muito Forte	Fraco	Moderado	Forte
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83	1954-55	1955-56	1973-74
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98	1964-65	1970-71	1975-76
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16	1971-72	1995-96	1988-89
1969-70	1986-87	1987-88		1974-75	2011-12	1998-99
1976-77	1994-95	1991-92		1983-84	2020-21	1999-00
1977-78	2002-03			1984-85	2021-22	2007-08
1979-80	2009-10			2000-01		2010-11
2004-05				2005-06		
2006-07				2008-09		
2014-15				2016-17		
2018-19				2017-18		
				2022-23		

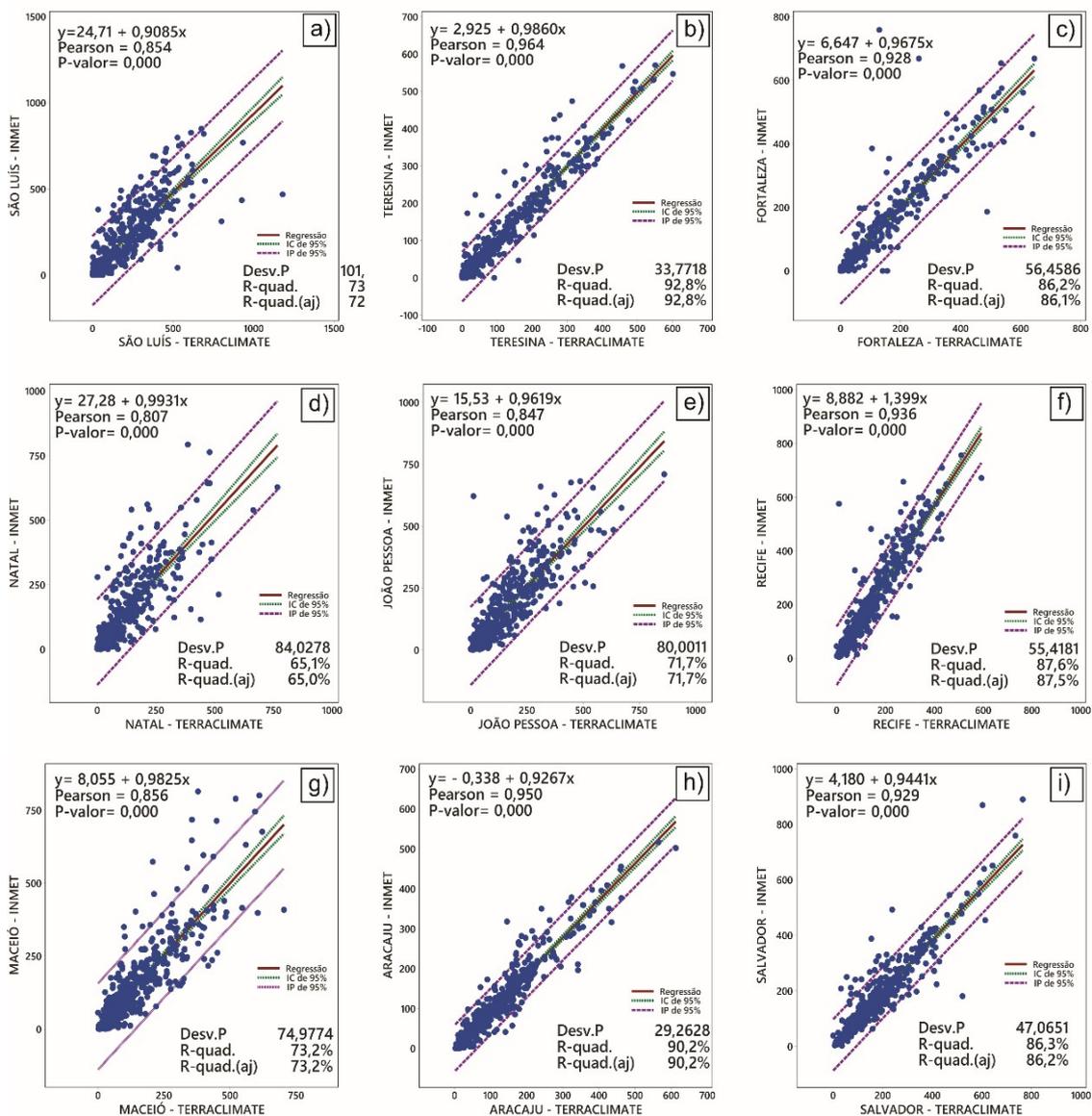
Fonte: (ggweather.com)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 VALIDAÇÃO DO PRODUTO TERRACLIMATE

A Figura 3 apresenta o diagrama de espalhamento (1:1) entre os valores de precipitação mensal do INMET (Observado) e o produto TerraClimate. A avaliação se baseou nos valores dos coeficientes de determinação (R^2), Pearson (r), desvio padrão e p-valor para cada capital do NEB.

Figura 3 - Diagrama de dispersão 1:1 para as capitais do NEB entre os dados de precipitação do INMET e do TerraClimate no período de 1980 a 2021.



Fonte: Autor, 2023.

Os resultados obtidos indicaram que os valores de precipitação mensal do TerraClimate apresentaram correlação classificadas como muito alta e quase perfeita (tabela 4) com os valores oriundos do INMET nas nove capitais do NEB. Para São Luís (Figura 3a), Teresina (Figura 3c) e Fortaleza (Figura 3b), os valores de R^2 foram de 73%, 86,2% e 92,8%, seguido dos coeficientes r , com altos valores (0,85, 0,93 e 0,96), respectivamente. Os desvios padrões para essas capitais foram de 101,1 mm, 56,4 mm e 33,7 mm, respectivamente. Para as outras capitais, a correlação também foi muito alta (tabela 4), onde os valores de r variaram entre 0,81 e 0,95, seguido dos valores de R^2 entre 65,1% e 90,2% e desvio padrão entre 29,2 mm e 84 mm.

Vale destacar que nem todas as cidades tiveram a mesma porcentagem de dados disponíveis, que por sua vez influenciou nos resultados (Tabela 1). Por exemplo, São Luís apresentou 0% de dados faltantes, ao contrário, de Fortaleza (20%) e Maceió (11,2%). As outras cidades tiveram porcentagens de falhas que variou entre 0,3% e 15%. Essa análise foi realizada com base na série temporal mensal de 42 anos.

Além disso, algumas capitais apresentaram subestimativa ou superestimativa dos dados mensais pluviométricos. As capitais que apresentaram subestimativa foram: Natal, com desvio padrão de 84 mm, e São Luís, com desvio padrão de 101,1mm. Já as capitais que apresentaram superestimativa foram: João Pessoa, com desvio padrão de 80 mm, Maceió, com desvio padrão de 74,9 mm. As demais capitais, Fortaleza, Teresina, Recife, Aracaju e Salvador, não apresentaram subestimativa ou superestimativa significativa na comparação entre os dados observados e o produto TerraClimate, mesmo o produto tendo uma resolução espacial de 4 km (ABATZOGLOU et al., 2018) e as técnicas de amostragem realizadas para confecção da base de dados serem totalmente diferentes (COSTA et al., 2019; OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2021).

É importante ressaltar que a subestimativa ou superestimativa dos dados pode influenciar na análise dos resultados e nas tomadas de decisão, e por isso deve ser considerada na interpretação dos resultados das correlações. Destaque que todas as capitais, o p -valor $< 0,05$, isso indicou alta significância estatística, ou seja, a evidência estatística das correlações foi satisfatória e não resultado do acaso e, assim as correlações observadas são confiáveis (OLIVEIRA; CUNHA, 2014, p. 271).

Os resultados obtidos no estudo são consistentes com estudos anteriores realizados no Brasil que compararam diferentes fontes de dados de precipitação. Por exemplo, no estudo realizado por Gomes (2020) comparou dados de precipitação de diferentes fontes para a região Norte do Brasil e encontrou alta correlação dentro do intervalo de 0,6 a 0,9 entre os dados do INMET e o TerraClimate, no período de 1986 a 2018. Além disso, o estudo comparativo entre os dados de precipitação do INMET, da Agência Nacional de Águas (ANA), da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) e do Climate Prediction Center (CPC) para a região NEB, foram observados alta correlação entre as fontes, com valor de $r = 0,94$, no período de 1988 a 2017 (DOS SANTOS, DO AMARAL CUNHA, RIBEIRO-NETO, 2019).

Para complementar a validação do produto TerraClimate foi elaborado as Figuras 4, 5 e a Tabela 6. Na Figura 4 exibe o EPE mensal. O EPE foi maior nos meses de setembro e outubro em todas as capitais estudadas. Observa-se que em São Luís os valores de EPE são particularmente altos, essa variabilidade nos meses corresponde ao período de transição entre a estação seca e a estação chuvosa na região, que ocorre durante os meses de outubro a abril. Conforme Da Silva et al. (2011), apresentam uma análise da variabilidade temporal da precipitação para São Luís, indicando que os meses de maior registro de chuva ocorrem entre janeiro e junho, com pico em março e abril.

Desta forma, Reboita e Santos (2015) destacam que São Luís apresenta uma maior variabilidade interanual de precipitação em relação às outras cidades do NEB. Além disso, São Luís é influenciado pela ZCIT sendo responsável pela variabilidade da precipitação e, portanto, para os altos valores de EPE observados nos meses de setembro e outubro em São Luís. Os maiores valores de EPE foram em São Luís, Fortaleza e Maceió. Isso se deve as diferenças na fisiografia de cada capital e no regime de chuva, por exemplo, a altitude, o relevo, a proximidade com o ambiente costeiro, a vegetação, entre outros.

Esses fatores podem influenciar a quantidade e a distribuição das chuvas em cada localidade, o que pode levar a maiores variações na estimativa da precipitação e conseqüentemente maiores valores de EPE, seguido de o processo de urbanização ser totalmente diferente em cada localidade e, assim influenciar na dinâmica da chuva (OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2022; MONTEIRO et al., 2022). Além disso, outro fator é a qualidade de dados, pois neste estudo a estação de São Luís não possui falhas, enquanto Fortaleza e Maceió possuem falhas, 20% e 11,2% (Tabela 1),

respectivamente. Este resultado é consistente com estudos anteriores que mostram a influência de fatores como a altitude, a latitude e a topografia na variabilidade do EPE em diferentes regiões do Brasil (SILVA et al., 2018; NASCIMENTO et al., 2020).

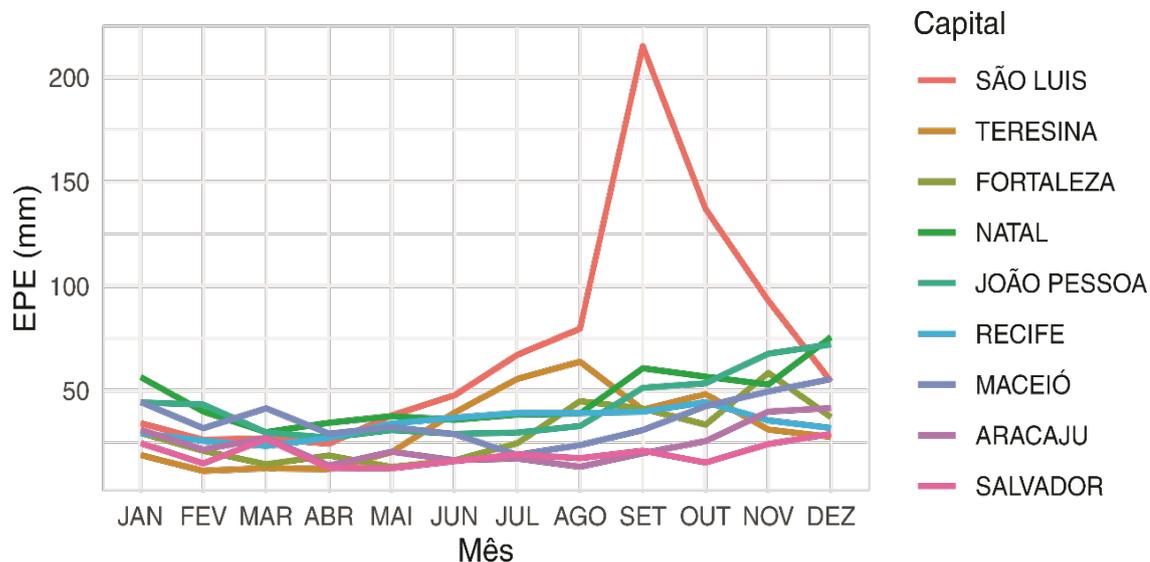
A tabela 6 indica o EPE para cada cidade. Como discutido anteriormente São Luís apresentou o maior EPE, com maior variabilidade dos dados de precipitação mensal. Em contrapartida, Recife apresentou a menor EPE, isso indicou uma menor dispersão em relação à média amostral. Teresina, Fortaleza, Natal, João Pessoa, Maceió e Aracaju apresentaram valores intermediários de EPE. Já Salvador apresentou uma EPE próxima à de Recife.

Tabela 6 - Valores do EPE e RMSE (mm) para cada cidade do NEB.

Cidade	EPE (mm)	RMSE (mm)
São Luís	62,53	46,98
Teresina	18,83	16,25
Fortaleza	11,40	37,93
Natal	14,45	43,72
João Pessoa	14,45	43,23
Recife	6,76	46,27
Maceió	9,95	33,24
Aracaju	8,93	12,5
Salvador	7,99	26,31

Fonte: Autor ,2023.

Figura 4 - Distribuição mensal do EPE (mm) para as capitais do NEB no período de 1980 a 2021.



Fonte: Autor ,2023.

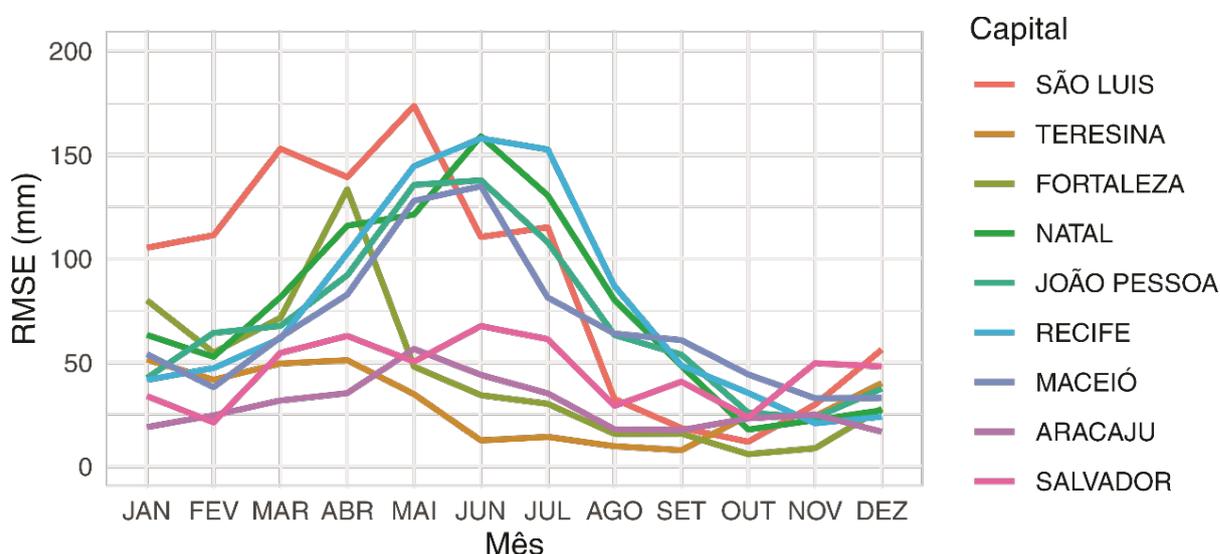
Os valores mensais do RMSE (Figura 5) para cada capital do NEB mostraram que, em geral, a precisão das previsões de precipitação é maior nas capitais do NEB durante os meses de menor registro de chuva, entre julho e outubro, do que nos meses com alto registro de chuva, entre janeiro e maio, pela mesma razão o software DrinC utiliza o ano hidrológico, pois desta forma é possível acompanhar todos o histórico hídrico do período estudado (DA SILVA et al. 2011; TIGKAS, 2015; SOBRAL et al., 2019). Segundo Nascimento (2017), o ano hidrológico é utilizado para avaliar as condições climáticas e hidrológicas em uma determinada região. Ele destacou que a definição do ano hidrológico pode influenciar a interpretação dos dados de precipitação e vazão dos rios, uma vez que o início e o fim do período considerado podem alterar significativamente os resultados.

Tal fato se deve que durante os meses com maior registro de precipitação é irregular, com fortes chuvas intercaladas com longos períodos de estiagem. Contudo, nos meses de menor registro, a ocorrência de chuvas é constante e padronizada, o que proporciona maior precisão nas previsões. Estudos anteriores realizados no NEB corroboram com os resultados obtidos (SCHMIDT, D. M.; LIMA, K. C.; JESUS, E. S.. 2018; AMORIM et al., 2019;).

Vale ressaltar que algumas capitais apresentaram um melhor desempenho do que outras. Em particular, São Luís, Fortaleza e Maceió se destacaram como as

capitais com os menores valores de RMSE. Esse resultado pode estar relacionado às características locais da chuva. A precipitação em São Luís é influenciada pela ZCIT, circulação de brisas e as Linhas de Instabilidade (LI), que é responsável por períodos de intensa precipitação na região. Em Fortaleza, a precipitação é influenciada pelos ventos alísios, circulação de brisas e pela presença da ZCIT, enquanto em Maceió, a precipitação é influenciada pela presença da POA, DOL e circulação das brisas e pela posição geográfica da cidade (MARENGO et al., 2011; NÓBREGA; SANTIGADO, 2014; LACERDA, 2016; OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2021).

Figura 5 - Distribuição mensal da RMSE (mm) para as capitais do NEB. no período de 1980 a 2021.



Fonte: Autor, 2023.

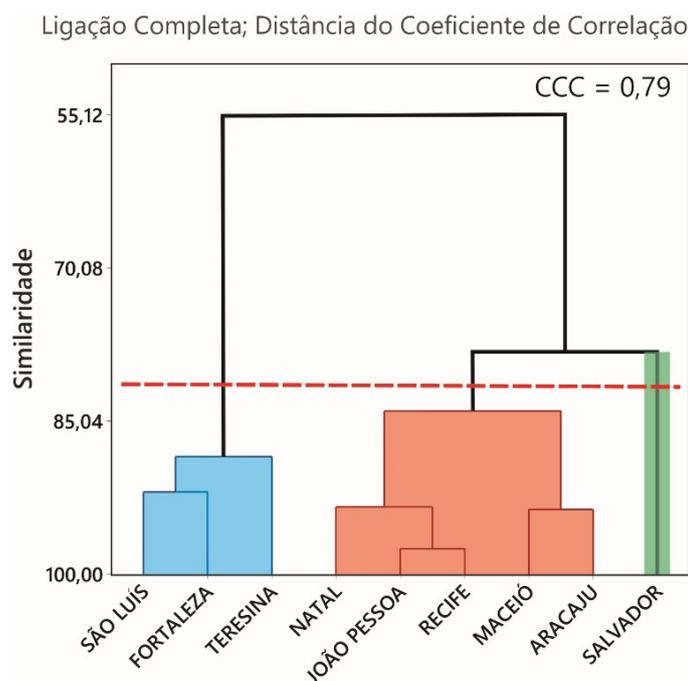
5.2 SPI APLICADO AS CAPITAIS DO NEB

5.2.1 Análise de Agrupamento da Precipitação

A análise de agrupamento (AA) (Figura 6) identificou três grupos homogêneos de precipitação nas capitais do NEB. O grupo 1 (G1) foi formado por São Luís, Teresina e Fortaleza, sendo todas as capitais no Norte do Nordeste (NNEB), seguido do grupo 2 (G2) que incluiu Natal, João Pessoa, Maceió, Recife e Aracaju (maior grupo homogêneo), sendo todas as capitais parte do NNEB e Leste do NEB (ENE) e ainda próximas do ambiente costeiro e, por fim o grupo 3 (G3) é composto apenas por Salvador, correspondente ao Sul do NEB (SNEB). De acordo com o coeficiente correlação cofenético (CCC) obtido (CCC = 0,79) e a ligação usada (completa)

mostrou-se robusta e confiável, assim como no estudo feito por Freitas et.al. (2013) que usou a ligação completa para agrupar regiões com similaridades para o modelo hidrológico.

Figura 6 - Dendrograma da precipitação e o valor de coeficiente cofenético entre as capitais do NEB.



Fonte: Autor, 2023.

Portanto, os resultados encontrados corroboram com estudos anteriores, tais como, Fonseca (2022), no qual analisaram o regime de chuvas nas capitais do NEB através de correlação de similaridade e identificaram semelhanças entre as cidades de São Luís, Teresina e Fortaleza. O CCC é baseado no coeficiente de Pearson (r), sendo calculado entre a matriz de dissimilaridade e a matriz resultante do processo de agrupamento (SOKAL e ROHLF, 1962). Assim, quanto maior o valor de r , menor será a distorção. Rohlf (1970) mencionou que quanto maior o valor obtido para o CCC, menor a distorção causada por CA. Na prática, dendrogramas com $CCC < 0,7$ indicam a inadequação da técnica de CA.

5.3 ANÁLISE DO SPI

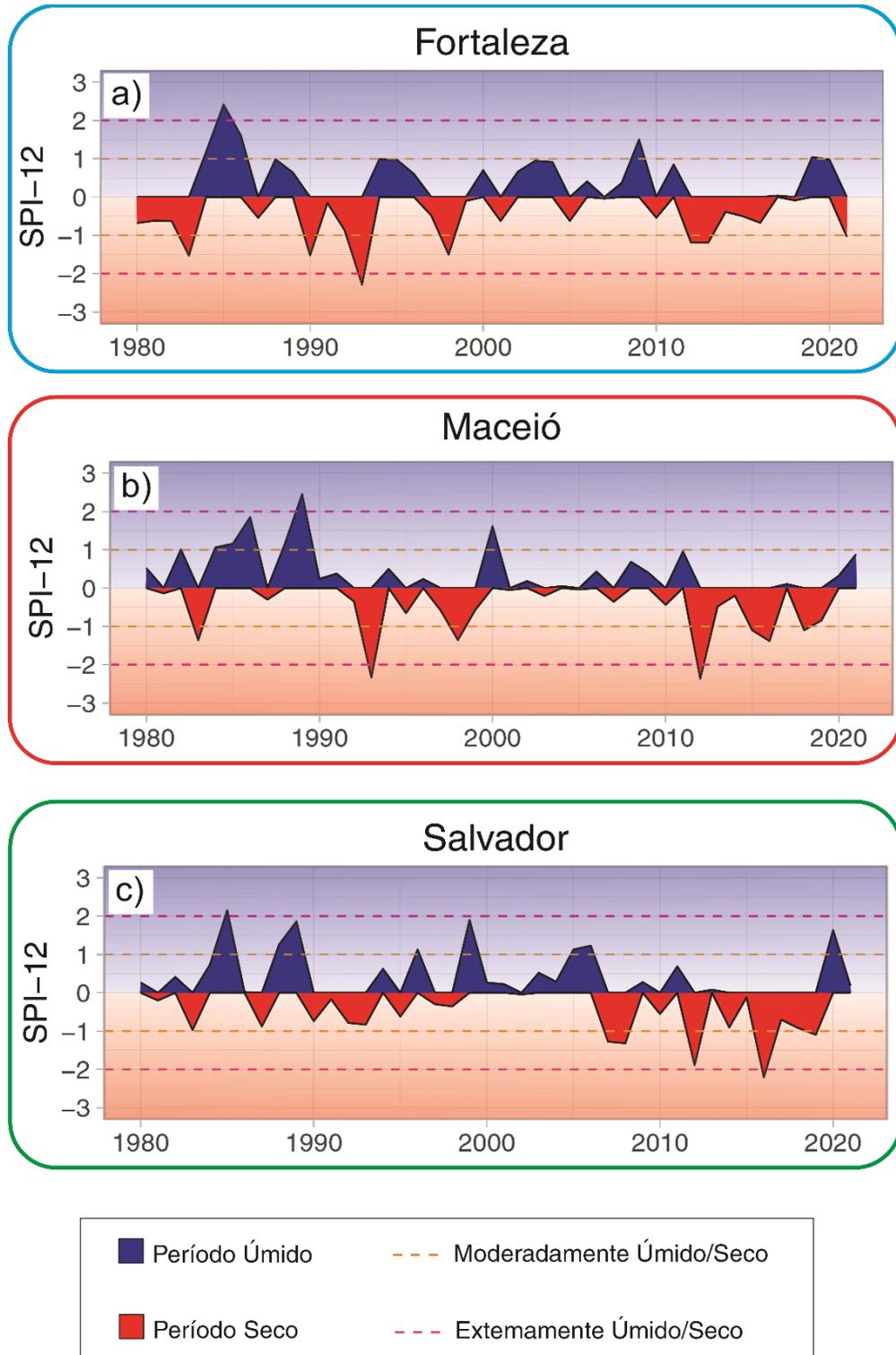
Com base na definição dos grupos homogêneos de precipitação foi avaliada os períodos de seca e úmido em multi-escala nas capitais do NEB em função dos grupos homogêneos de precipitação. O critério de escolha para cada capital de cada grupo, deriva-se de que i) Fortaleza sofre com a recorrência de eventos de seca (LEITE FECHINE, 2015); ii) Maceió foi uma das capitais selecionadas na análise, pois possui casos de secas no estado que afetaram diversos setores, sendo eles, agrícola, econômico, entre outros. (PEREIRA, 2022) é por fim, iii) Salvador, por sua alta variabilidade e a direta influência de diversos sistemas meteorológicos (ALVES, 2017). A princípio variabilidade anual da precipitação no NEB foi analisada por meio da identificação dos anos secos e chuvosos durante o período de estudo, estabelecendo-se associações com as fases do ENOS (El Niño, La Niña e Neutro), com base no Oceanic Niño Index (ONI) para a região 3.4 do ENOS. De acordo com Correia Filho et al. (2019), a identificação dos padrões de variabilidade da precipitação e sua relação com o ENOS são fundamentais para o entendimento e previsão do clima no NEB. Os autores ainda destacam que o estudo da variabilidade de precipitação em relação ao ENOS pode fornecer informações importantes sobre os impactos das mudanças climáticas na região

Na figura 7 os valores do SPI na escala de 12 meses para Fortaleza (grupo G1) - (Figura 7a) apresentou alta variabilidade ao longo da série temporal. No período de 1980 a 2021, foram observados 17 eventos de seca e 16 eventos de chuvas acima da média, 4 eventos a mais que Maceió e Salvador. Os anos de 1983, 1993 e 2012 se destacam como os mais secos em Fortaleza, com valores de SPI de -1,53, -2,29 e -1,19, respectivamente. De acordo com Tabela (5) esses anos correspondem aos eventos de El Niño Muito Forte e Forte. Vale destacar que 2012 foi considerado por Marengo (2016) o início da seca mais devastadora para o NEB. Por outro lado, o SPI-12 revelam que os anos de 1985, 1986 e 2009 apresentaram chuvas acima da média, com valores de SPI de 2,41; 1,61 e 1,50, respectivamente. É importante ressaltar que segunda a tabela (5) o ano de 1985 foi classificado como um ano de La Niña, juntamente com 1984, enquanto o ano de 1986 foi o início do El Niño de 1987, que se iniciou em agosto de 1986. Por outro lado, 2009 também foi classificado como fraco em termos de El Niño. Estes dados são relevantes para a compreensão das variações

interanuais da precipitação na região semiárida do NEB e para avaliar o impacto desses eventos no abastecimento de água.

5.3.1 ANUAL

Figura 7 - Distribuição temporal do SPI-12 (anual) baseado no TerraClimate dos grupos homogêneos pluviométricos no período de 1980 a 2021.



Fonte: Autor, 2023.

De acordo com Marengo (2011), o semiárido brasileiro, região em que se encontra Fortaleza, é vulnerável aos eventos climáticos extremos, especialmente as secas, que têm se intensificado nas últimas décadas. Segundo Svoboda et al. (2012), eventos de seca na escala anual afetam diretamente a disponibilidade hídrica, com impactos significativos na Agricultura, na Pecuária e no abastecimento de água para a população, neste caso é preocupante para populações urbanas. Silva e Nobre (2016) analisaram a seca e a crise hídrica no Cinturão das Águas do Ceará, região que engloba Fortaleza, e concluíram que o problema não é apenas climático, mas também político e social. A gestão inadequada dos recursos hídricos e a falta de planejamento foram apontadas como fatores que contribuem para a intensificação dos impactos da seca na região.

Em relação a Maceió, grupo G2, (Figura 7b) os valores do SPI-12 apontaram períodos de seca e chuvas acima da média ao longo das últimas décadas. Durante a década de 1980, na cidade de Maceió ocorreram variações positivas e negativas do SPI anual, com destaque para o ano de 1986, com SPI = 1,85. Na década de 1990, o SPI anual variou menos, mas ainda registrou alguns períodos de seca, destaque os anos de 1993 e 1998 (MARENGO, 2016).

Além disso, no início dos anos 2000, Maceió voltou a ocorrer chuvas acima da média, com destaque para 2000, quando o SPI = 1,61. A partir de 2010, no entanto, a cidade voltou a sofrer com períodos de seca, como em 2012 e 2016, quando o SPI atingiu valores abaixo de -1,3. Marengo et al. (2016), discutiu a seca ocorrida no semiárido do NEB no período de 2012 a 2015 de acordo com o estudo, a seca nessa região foi considerada a mais severa dos últimos 50 anos e afetou cerca de 11 milhões de pessoas. Apesar disso, a região registrou chuvas acima da média em oito ocasiões ao longo de todo o período analisado, o que pode ter impactos positivos na produção agrícola e no abastecimento de água.

No caso de Salvador, grupo G3, (Figura 7c), menor variação do SPI anual. É importante destacar que na escala anual, a chuva é muitas vezes influenciada pelo ENSO. Vale destacara que em ambas as capitais, o SPI identificou eventos extremos de chuvas nos anos de 1985, 1988 e 2000, seguidos de seca intensa que durou de 2012 a 2017. O SPI anual para Salvador foi possível identificar eventos de seca em 13 anos, chuvas acima da média em 12 anos e 15 eventos de neutralidade.

Os eventos ocorreram em anos em que houve ocorrência de El Niño ou La Niña, o que pode ter influenciado os padrões de precipitação na região, conforme Tabela 5.

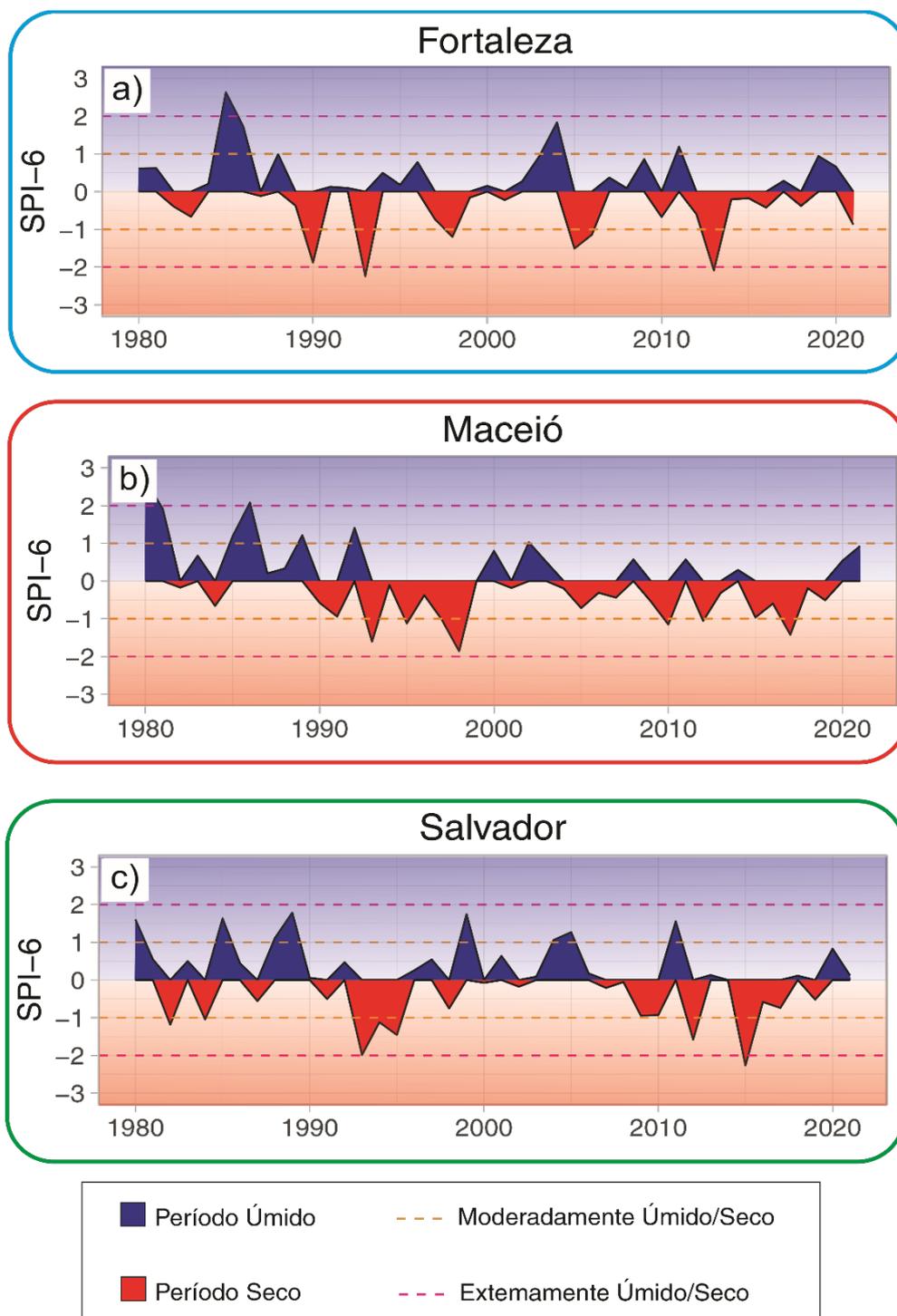
Vale destacar o evento de El Niño de 1982-83 e o de La Niña de 1988-89 podem ter contribuído para as condições de seca em Salvador nos anos seguintes, como pode ser observado na figura do SPI-12 (figura 9c) para 1983 e 1990. Além disso, a ocorrência de La Niña em 1998-99 pode ter contribuído para as chuvas acima da média em Salvador em 1999, como pode ser visto nos dados do SPI para aquele ano.

Em suma, os dados do SPI-12 mostram a variabilidade interanual das chuvas na região, com anos de seca e de chuvas acima da média. A seca anual afeta diretamente a disponibilidade hídrica, o que pode ter impactos significativos na agricultura, na pecuária e no abastecimento de água para a população. Desta forma, o DrinC oferece uma ótima ferramenta para a gestão inadequada dos recursos hídricos e a falta de planejamento são apontados como fatores que contribuem para a intensificação dos impactos da seca na região (MARENGO et al., 2011; GOIS et al., 2015; SVOBODA et al., 2012; SILVA; NOBRE, 2016).

5.3.2 SEMESTRAL

O SPI-6 é frequentemente usado para monitoramento de seca agrícola, pois corresponde à estação de crescimento típica em muitas regiões (Svoboda et al., 2012).

Figura 8 - Distribuição temporal do SPI-6 (semestral) baseado no TerraClimate dos grupos homogêneos pluviométricos no período de 1980 a 2021.



Fonte: Autor, 2023.

Já na escala semestral (SPI-6), foram observados resultados diferentes em comparação ao SPI anual, para as cidades de Fortaleza, Maceió e Salvador. Para Fortaleza (Figura 8a), foi observado um número maior de anos com chuvas acima da média do que com eventos de seca, com destaque para os anos de 1985 e 2004, com SPI de 2,63 e 1,84, respectivamente. Já em 2015, foi registrado um SPI de - 0,18, no qual indicou um evento de seca na cidade. Os anos de El Niño mais intensos, como 1982-1983, 1997-1998 e 2015-2016, foram associados a eventos de seca em Fortaleza.

Na figura 8b, apresentou a situação mais crítica em relação à seca, com um número maior de eventos de seca do que de chuvas acima da média. Destaca-se o ano de 1981, com SPI = 2,68, indicou um evento de chuva intensa. Já os anos de La Niña, como 1988-1989, 1998-2000 e 2010-2012, foram associados a eventos de seca em Maceió. Vale mencionar também o crescimento desordenado da cidade de acordo com Dos Santos et al. (2017) e Oliveira Júnior et al. (2021) também pode influenciar nos eventos de seca e extremos de chuva.

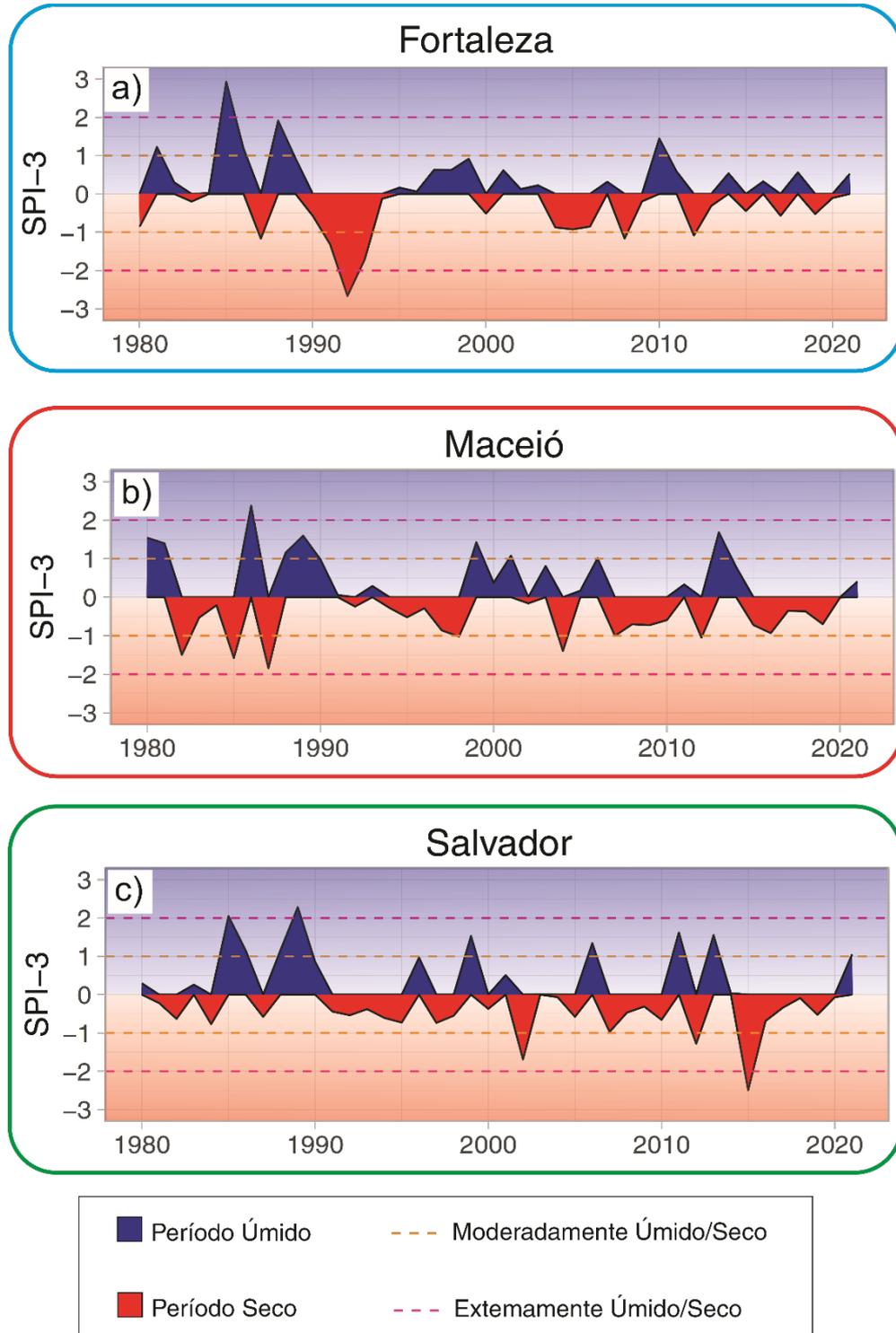
Por fim, a figura 8c foi observada resultados equilibrados entre os eventos de seca e as chuvas acima da média. Os anos de 1980 e 1985 apresentaram SPI > 1,5, indicou chuvas intensas na cidade. Já os anos de La Niña, como 1983-1984, 1998-2000 e 2011-2012, foram associados a eventos de seca em Salvador. Em relação aos anos de neutralidade, ou seja, sem La Niña ou El Niño, Fortaleza teve 18 anos, Maceió teve 13 anos e Salvador teve 14 anos. Em relação aos eventos de seca, Maceió e Salvador tiveram a mesma quantidade, 15 eventos cada, enquanto Fortaleza teve apenas 9 eventos. Já em relação a eventos de chuvas acima da média, Maceió teve 14 eventos, Salvador teve 13 eventos e Fortaleza teve 13 eventos também.

Portanto, pode-se perceber que as variações no SPI semestral em Fortaleza, Maceió e Salvador estão relacionadas com a atuação de sistemas meteorológicos que influenciam o regime de chuvas na região, tais como a ZCIT, VCAN e DOL (LYRA, JUNIOR e ZERI, 2014). O estudo de Silva (2022) também apontou que a variabilidade das chuvas na região NEB pode ser explicada pela atuação da região do El Niño 3.4. Além disso, a localização geográfica das cidades e a sua relação com a zona semiárida do sertão e a faixa litorânea também influenciam no clima local e nas variações no SPI ao longo dos anos.

5.3.3 TRIMESTRAL

A Figura 9 exibe o SPI-3 (trimestral) TerraClimate. Baseado no SPI-3 foi possível identificar variações significativas entre os períodos secos e úmidos nas capitais do NEB. Esta escala é frequentemente usada para monitoramento de seca hidrológica, pois corresponde ao período típico de armazenamento e fornecimento de água (Svoboda et al., 2012).

Figura 9 - Distribuição temporal do SPI-3 (trimestral) baseado no TerraClimate dos grupos homogêneos pluviométricos no período de 1980 a 2021.



Fonte: Autor, 2023.

De acordo com a figura 9, ocorreu uma variabilidade nos valores do SPI trimestral (SPI-3) nas cidades de cada grupo homogêneo (Figura 6). Em Fortaleza (Figura 9a), alguns anos apresentaram valores negativos de SPI-3, com seca extrema, principalmente em 1991, 1992 e 2012. Destaque para outros anos, com valores positivos de SPI-3, por exemplo, 1985, 1987 e 1988. Além disso, a variabilidade do SPI-3 ocorreu em anos consecutivos, tais como, em 2016 e 2017, com alternância entre valores positivos e negativos.

Em Maceió (Figura 9b), o SPI-3 exibiu no início da década de 1980 e na segunda metade da década de 1990, valores acima da média, com aumento da chuva. Por outro lado, a partir de meados da década de 2000 até o presente momento, os valores de SPI têm se mantido majoritariamente abaixo da média, o que evidencia um quadro severo de seca em Maceió, cidade que tem dependência de chuva para alimentar o lençol freático e que é base do abastecimento da cidade (CORREIA FILHO et al., 2019; OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2021). É importante destacar que as variações do SPI estão relacionadas às condições climáticas da região, principalmente pelas fases do ENOS (El Niño e, La Niña) e outros modos de variabilidade climática, por exemplo, Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) - (LYRA et al., 2017; COSTA et al., 2021) que por sua vez podem afetar a disponibilidade de água no solo, a produção agrícola e o abastecimento de água para a população (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2021; OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2021).

Por outro lado, em Salvador (Figura 9c) o SPI-3 apresentou valores abaixo da média, isto é, com seca entre moderado a extremo. No entanto, alguns anos o SPI-3 foi elevado, tais como, 1985 e 1986, com chuvas extremas. Por outro lado, em 2015, a cidade registrou SPI-3 = -2.50, sendo categorizada como seca extrema (Tabela 2). Portanto, embora a cidade apresente variações consideráveis no SPI-3, a maioria dos anos apresentou um cenário de seca moderada a extrema.

Essas diferenças na variabilidade do SPI-3 se devem aos sistemas meteorológicos em multiescala que afetam cada região. No NEB, os sistemas meteorológicos responsáveis pelas chuvas são influenciados principalmente pela ZCIT e pelo ENOS. Em Fortaleza, por exemplo, é possível observar uma relação direta entre o SPI-3 e a ocorrência de El Niño, que pode causar períodos de seca intensas na região (SILVA, et al. 2021). Já em Maceió, é influenciado por diversos sistemas meteorológicos, principalmente as circulações das brisas, VCAN, ASAS, POA e os DOL's são os principais sistemas meteorológicos responsáveis pelas chuvas na

região, e sua variabilidade pode explicar a variação no SPI trimestral (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2021).

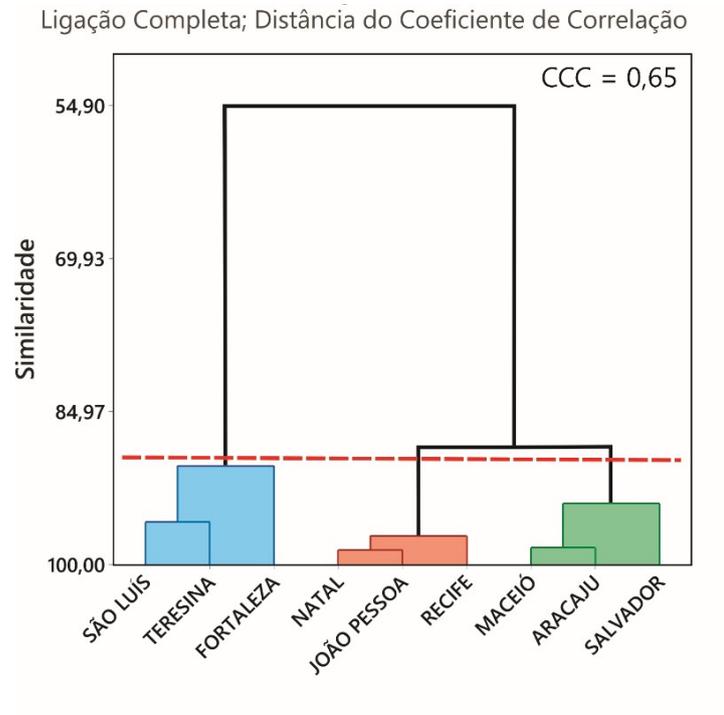
Em resumo, os resultados obtidos indicam uma variabilidade na ocorrência de períodos secos e úmidos nas capitais do NEB ao longo dos anos, relacionados a diferentes sistemas meteorológicos que afetam cada região. (MARENGO et al. 2017).

5.4 RDI APLICADO AS CAPITALS DO NEB

5.4.1 Análise de Agrupamento da PET

A técnica AA aplicada aos dados de PET identificou a formação de três grupos homogêneos. O grupo 1 é composto por São Luís, Teresina e Fortaleza, enquanto o grupo 2 é formado por Natal, João Pessoa e Recife, e o grupo 3 é composto por Maceió, Aracaju e Salvador, sendo o resultado totalmente contrário do dendrograma de chuva realizado anteriormente. O valor do CCC obtido foi de 0,6574, além disso, a análise de agrupamento para a evapotranspiração apresentou coeficiente de correlação cofenética baixo, porém o agrupamento com método completo foi o que mostrou o melhor coeficiente. Devido ao baixo valor do CCC, o dendrograma resultante desse agrupamento não apresenta validação estatística, tampouco agrupamento consistentes para os dados do produto. Contudo, de acordo com Rohlf (1970), valores de CCC > 0,7 são considerados satisfatórios, com concordância entre as matrizes. Valores < 0,7, por outro lado, indicam que o método usado é inadequado.

Figura 10 - Dendograma do PET e o valor de coeficiente cofenético entre as capitais do NEB.

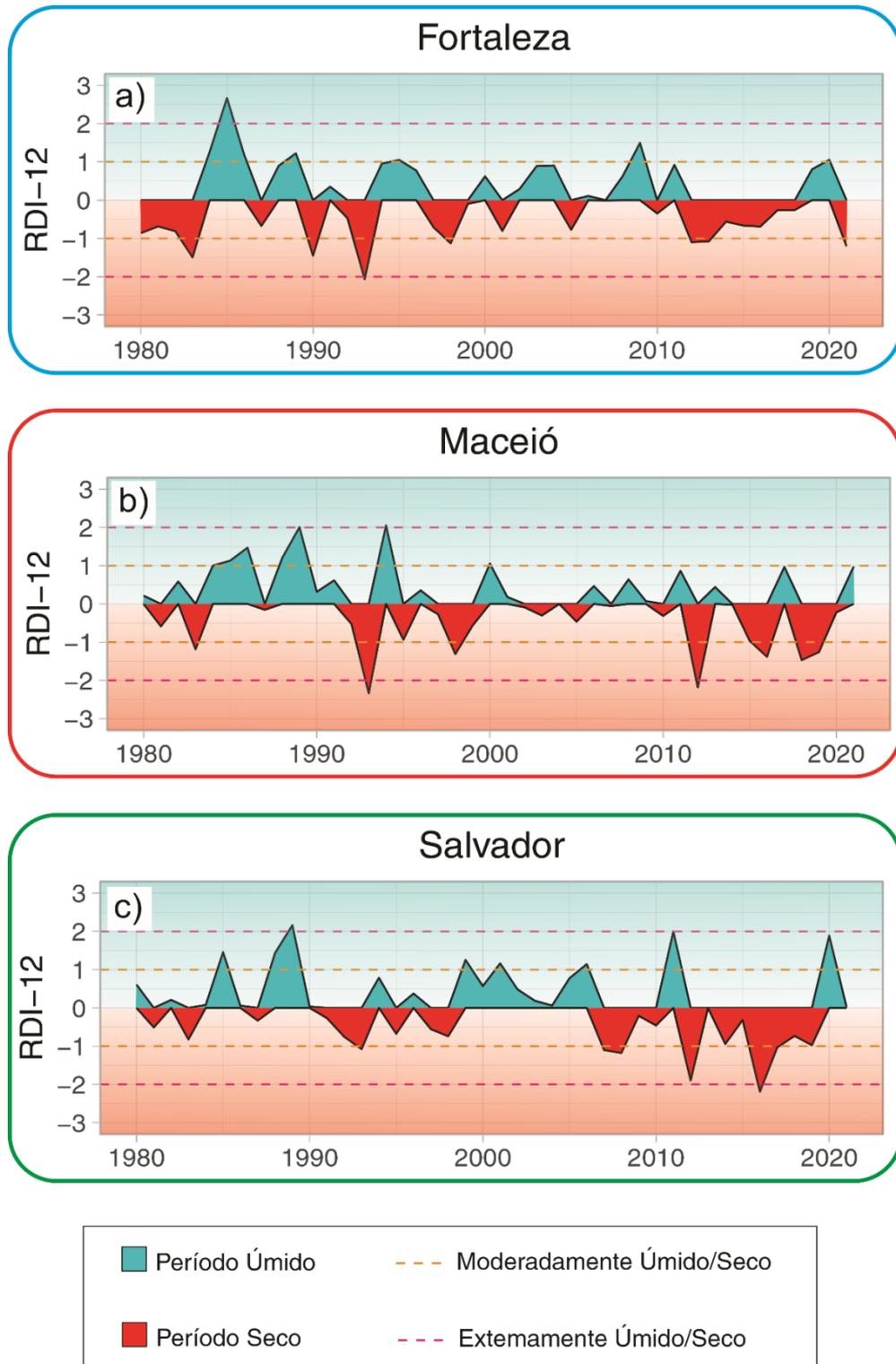


Fonte: Autor, 2023.

Contudo, os resultados são consistentes com estudos anteriores que também encontraram uma forte associação entre a variabilidade da PET e a localização geográfica das regiões analisadas (DE SOUZA et al., 2019; DA SILVA et al., 2020).

5.4.2 Anual

Figura 11 - Distribuição temporal do RDI-12 (anual) baseado no TerraClimate dos grupos homogêneos de PET no período de 1980 a 2021.



Fonte: Autor, 2023.

Os valores anuais do RDI (Figura 11) para Fortaleza (Figura 11a), Maceió (Figura 11b) e Salvador (Figura 11c) verifica-se que o RDI-12 variou ao longo dos anos, com períodos mais secos e outros mais úmidos. Para entender os resultados do RDI nessa escala é necessário entender que a PET é influenciada por diversos fatores, como a temperatura, a umidade do solo, a vegetação e a radiação solar. Segundo Correia Filho, Lucio e Spyrides (2016) em seu estudo sobre caracterização da precipitação no NEB apontaram que a precipitações do NEB se concentram nas regiões litorâneas, tais como, o norte do Maranhão, Ceará e costa ENEB, influenciadas pelos seguintes sistemas meteorológicos, ZCIT e DOL, enquanto que outras regiões são influenciadas pela topografia (Planalto da Borborema e Chapada do Araripe).

Em Fortaleza, os dados indicam uma alternância de períodos secos e úmidos, com 16 eventos de seca e 16 de chuvas acima da média no período de 1980 a 2021. O ano de 1990 foi o mais seco, com um RDI = -1,45, enquanto o ano de 1985 foi o mais úmido, com RDI = 2,67. Em relação aos eventos El Niño e La Niña, observar destaque para os anos de 1983 e 1997, onde RDI foi muito baixo, sendo associados ao El Niño. Já os anos de 1984 e 2016, com RDI muito elevado, foram associados a La Niña (Tabela 5).

Em Maceió houve equilíbrio entre períodos secos e úmidos. No entanto, a cidade apresentou 11 eventos de seca e 13 de chuvas acima da média. O ano de 2012 foi o mais seco corroborou com o estudo Marengo (2016) sobre a seca desse ano, RDI-12 apresentou um valor de -2,18, enquanto o ano de 1989 foi o mais úmido, com RDI = 2,01. Em relação aos eventos El Niño e La Niña, nos anos de 1984 e 1995, com RDI elevado, foram associados a La Niña. Já os anos de 1983 e 1997, com RDI baixo, foram associados ao El Niño.

Em Salvador (Figura 11c), a cidade apresentou 13 eventos de seca e 12 de chuvas acima da média. O ano de 2016 foi o mais seco, com RDI = -2,19, enquanto o ano de 2011 foi o mais úmido, com RDI = 2,00. Em relação aos eventos El Niño e La Niña, verifica-se que os anos de 1983 e 1997, com RDI baixo, foram associados ao El Niño. Já os anos de 1984 e 1995, com RDI elevado, foram associados a La Niña.

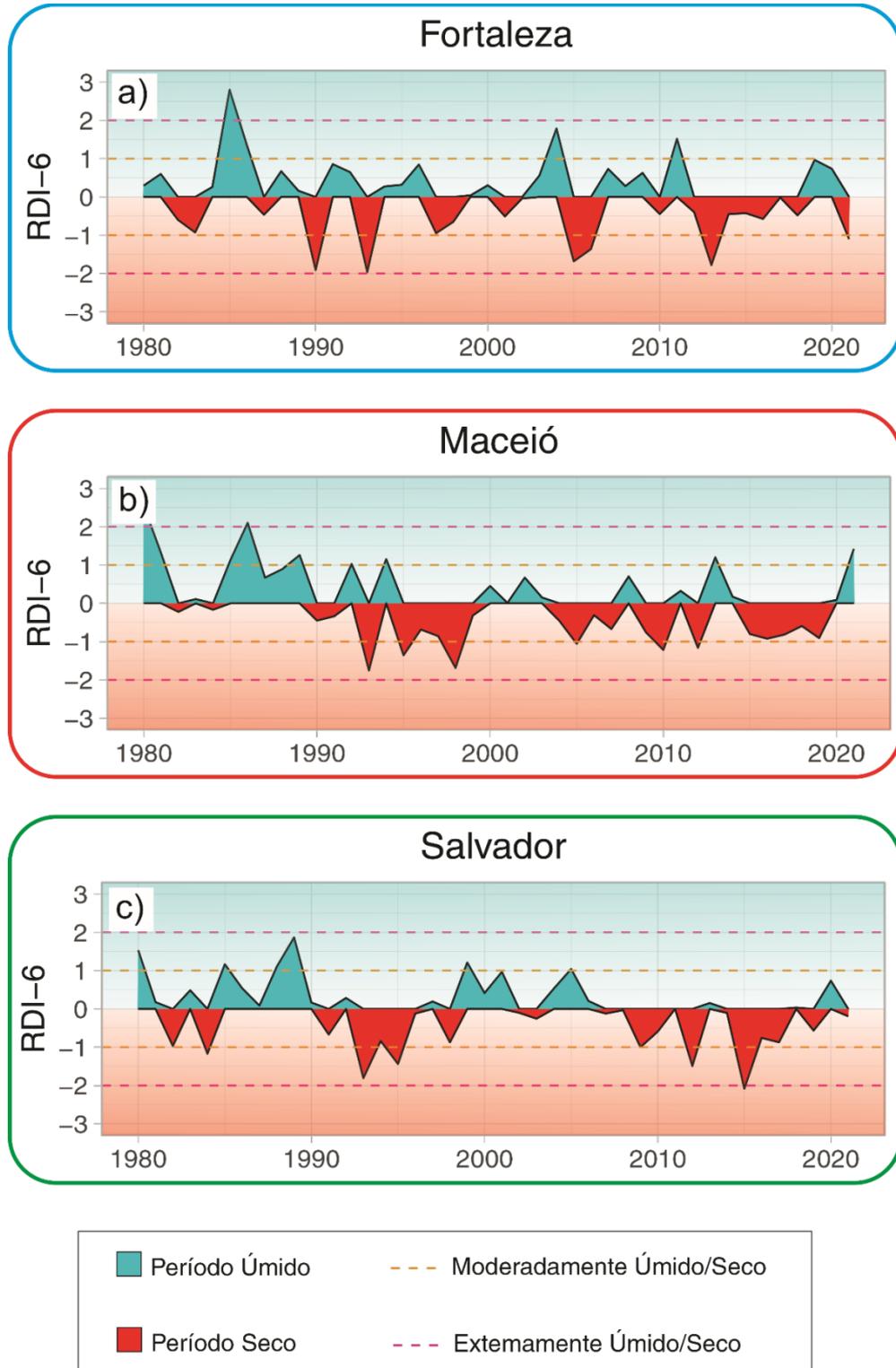
Comparativamente o SPI-12 (Figura 7) identificou maior quantidade de eventos extremos, uma possível justificativa é que o RDI leva em consideração outras variáveis além da precipitação, o índice também consideração a perda de água para o solo com a vegetação (PET). Segundo os resultados obtidos por Vangelis et al. (2013)

mostraram que as áreas costeiras tendem a ter uma PET maior, enquanto as áreas montanhosas tendem a ter uma PET menor. Os autores também observaram que as diferenças nos valores da PET entre as áreas costeiras e montanhosas foram mais significativas durante o período seco do ano.

Em resumo, a análise do RDI para as cidades de Fortaleza, Maceió e Salvador permite entender a dinâmica das condições climáticas dessas cidades ao longo dos anos. Além disso, a associação dos valores do RDI com os eventos El Niño e La Niña fornece informações valiosas para a previsão de secas e chuvas intensas nessas regiões homogêneas de PET.

5.4.3 Semestral

Figura 12 - Distribuição temporal do RDI-6 (semestral) baseado no TerraClimate dos grupos homogêneos de PET no período de 1980 a 2021.



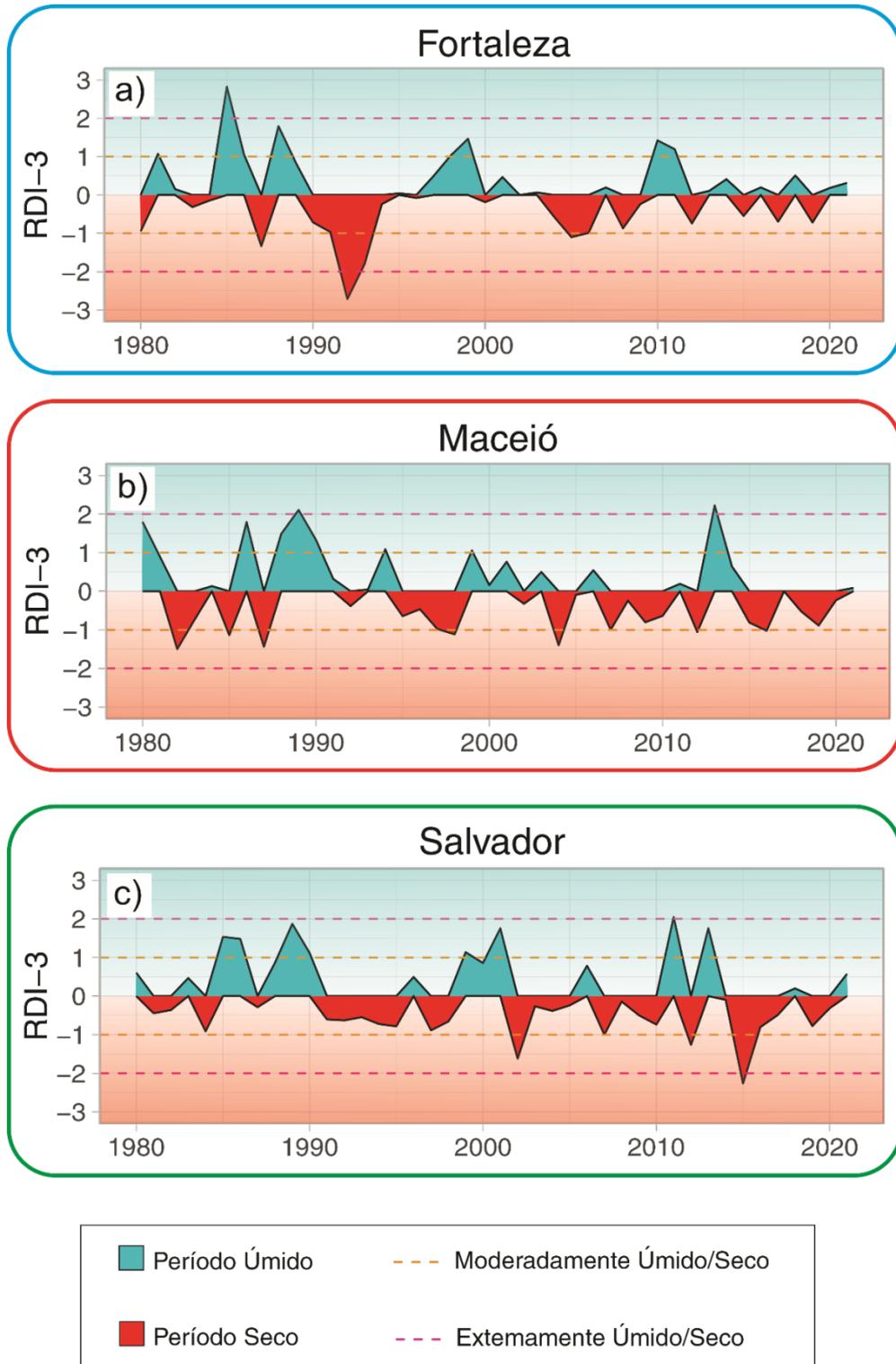
Fonte: Autor, 2023.

A análise dos resultados obtidos por meio do RDI na escala semestral (Figura 12) mostraram variações ao longo dos anos, com períodos secos e úmidos. Com o RDI-6, as cidades de Maceió (Figura. 12b) e Salvador (Figura. 12c) foram as mais afetadas pela seca, com 15 e 10 eventos de seca, nos últimos 41 anos. Em contrapartida, Fortaleza (Figura 12a) ocorreu apenas 10 eventos de seca no mesmo período. É importante destacar que, apesar das diferenças entre os grupos homogêneos, todas elas apresentaram anos de neutralidade, ou seja, com nenhuma ocorrência significativa de seca ou excesso de chuvas.

Ao analisar os valores do RDI, percebe-se que os grupos homogêneos apresentaram um padrão similar em relação aos eventos de seca e excesso de chuvas. No entanto, é importante ressaltar que a magnitude desses eventos pode variar significativamente entre os grupos homogêneos, devido à dinâmica dos sistemas meteorológicos e os modos de variabilidade de climática na região (Molina e Lima, 1999; Marengo, Cunha e Alves (2016)).

5.4.4 Trimestral

Figura 13 - Distribuição temporal do RDI-3 (trimestral) baseado no TerraClimate dos grupos homogêneos de PET no período de 1980 a. 2021.



Fonte: Autor, 2023.

O Fortaleza (Figura. 13a), apresentou valores negativos de RDI em diversos anos (1987, 1992 e 1993), isso indica que a região sofre com períodos de seca moderada a extrema. A PET elevada da região, aliada a fatores como a falta de chuvas e a elevada temperatura, podem contribuir para esse cenário. Além disso, a cidade teve um total de 14 eventos de seca ao longo do período analisado. Anteriormente, Zarei (2018) realizou um estudo em áreas áridas e semiáridas, sendo verificado que o RDI é altamente sensível à variabilidade climática, principalmente à PET e à precipitação.

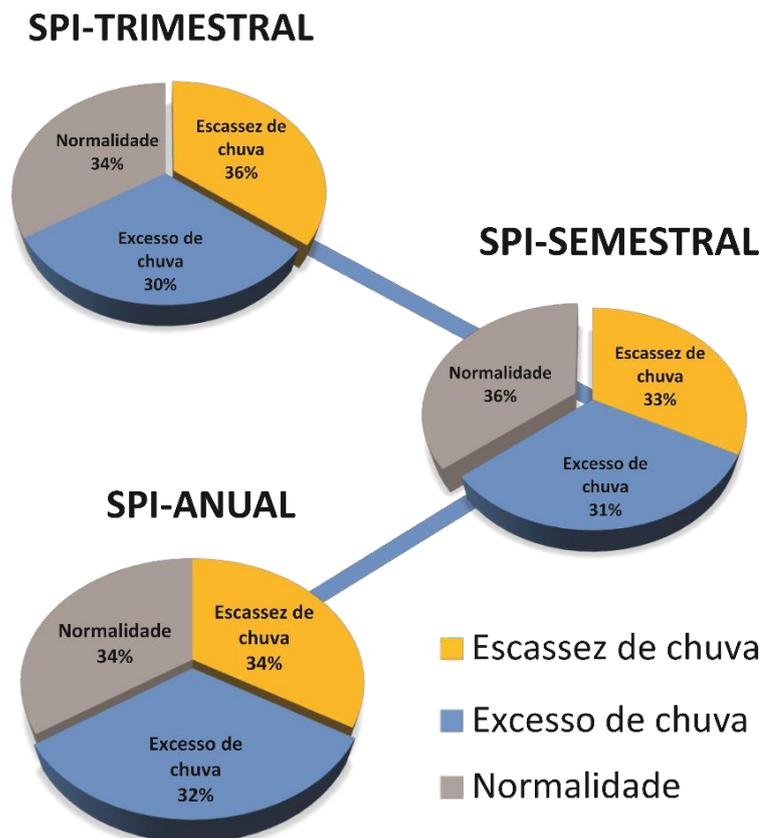
Em relação a Maceió (Figura 13b), observa-se um período seco entre os anos de 1982 e 1985, quando o $RDI < 0$. Já no ano de 1989, o RDI foi o mais alto da série temporal, com um período úmido na região. A variabilidade de períodos secos e úmidos em Maceió depende das condições meteorológicas. Alves et al. (2017) destacam que a região NEB é influenciada por sistemas meteorológicos, tais como a ZCIT e o VCANs, que influenciam a precipitação. A presença de VCANs podem favorecer a formação de áreas de instabilidade e trazer chuvas intensas para a região de Maceió, que apresentou um total de 15 eventos de seca durante o período analisado. Assim, é possível que fatores climáticos, como os VCANs, também tenham afetado a variabilidade do RDI-3 para a região. Em Salvador, por sua vez, os valores do RDI-3 foram variados ao longo dos anos, mas com um número equilibrado de eventos de seca e chuvas acima da média, o que pode estar relacionado à influência de VCANs, que favorecem chuvas intensas, e sistemas frontais, que trazem chuvas mais regulares para a região. Salvador teve um total de 14 eventos de seca, e a evapotranspiração potencial e a precipitação foram fatores importantes para a ocorrência de períodos secos ou úmidos em diferentes regiões. A análise de agrupamentos permitiu avaliar as semelhanças e diferenças entre as regiões e entender melhor a dinâmica climática em cada uma delas.

5.5 – Porcentagem dos Eventos

As figuras 14 e 15 apresentam as porcentagens de eventos extremos e normalidade dos índices SPI e RDI nas escalas de 3, 6 e 12 meses para os grupos homogêneos. Para o SPI, a normalidade obteve 34% em todas as escalas, enquanto a escassez de chuva apresentou uma variação de 34% (SPI-12) a 36% (SPI-6), ao

Figura 14 - Diagrama de pizza dos eventos extremos e de neutralidade via SPI para as três escalas adotadas no estudo.

contrário, do excesso de chuva entre 30% a 32%. Os resultados obtidos indicam que os eventos extremos de seca e chuvas em excesso foram altos nas capitais do NEB durante o período de estudo.

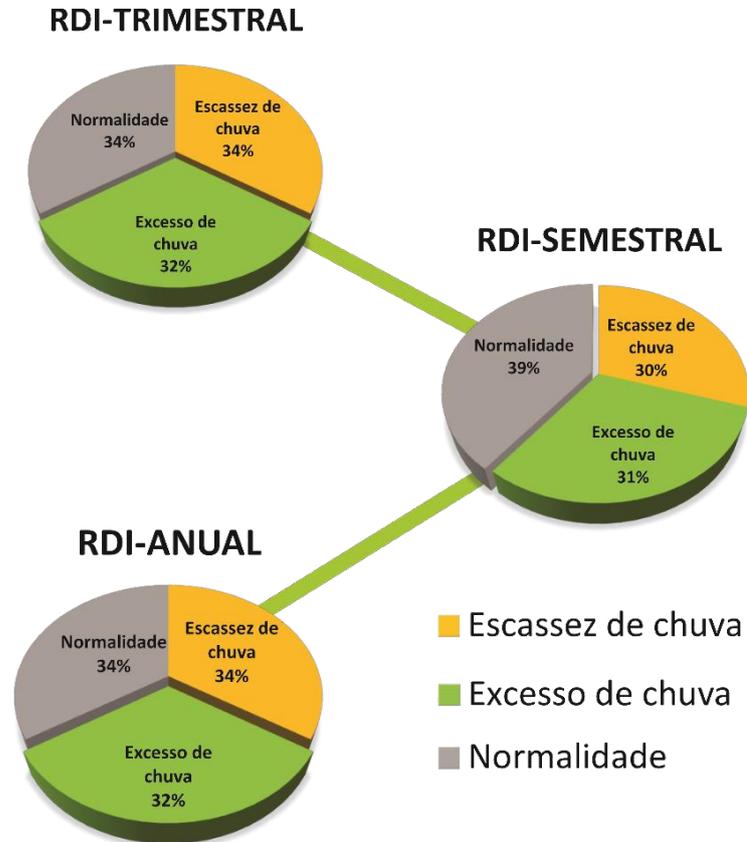


Fonte: Autor, 2023.

Em relação ao RDI (Figura 15), os resultados foram similares aos do SPI. A normalidade variou de 34% a 39% nas escalas de 3 a 6 meses, enquanto a escassez de chuva permaneceu em torno de 34% em todas as escalas. O excesso de chuva também variou de 31% a 32% em todas as escalas. Esses valores sugerem que a

frequência de eventos extremos de seca e excesso de chuvas foi similar para ambos os índices de seca nas escalas analisadas.

Figura 15 - Diagrama de pizza dos eventos extremos e de neutralidade via RDI para as três escalas adotadas no estudo.



Fonte: Autor, 2023.

Comparativamente, os resultados obtidos do SPI e RDI houve similaridade entre a normalidade, escassez e excesso de chuva em todas as escalas. No entanto, o RDI-6 foi maior na categoria normalidade em relação ao SPI-6.

6 CONCLUSÕES

Os dados do TerraClimate são perfeitamente aplicáveis e satisfatórios para as capitais do NEB, apesar das variações entre os indicadores estatísticos. Os dados do TerraClimate são confiáveis e podem ser utilizados como solução aos dados do INMET, que possuem falhas e lacunas temporais. Os dados do TerraClimate podem ser aplicados aos índices de seca, e assim na melhoria da avaliação dos extremos de chuva e seca na região.

Os resultados obtidos com o software DrinC são satisfatórios em relação ao desempenho dos índices de SPI e RDI em todas as escalas adotadas no estudo, bem como proporcionaram a identificação da intensidade e frequência de eventos de seca em multiescala nas capitais do NEB. Além disso, é possível estabelecer uma relação entre os resultados dos dois índices e as fases do ENOS. O SPI é uma ferramenta extremamente útil para identificação de déficits de chuvas e eventos extremos em cada capital, enquanto o RDI é eficiente na identificação de secas agrícolas e hidrológicas na escala trimestral e semestral, respectivamente.

Por fim, é importante destacar a necessidade de investimentos em tecnologias e estratégias para lidar com a seca na região. Além disso, políticas públicas que incentivem a adoção de práticas sustentáveis, como a agricultura de precisão e a gestão integrada de recursos hídricos, são essenciais para garantir a segurança hídrica e alimentar da população do NEB.

7 LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

Durante o decorrer deste estudo, algumas limitações foram encontradas, tais como, a dificuldade na obtenção de dados meteorológicos, visto que muitos estavam incompletos ou comprometidos, o que limita a análise com dados reais, assim obrigou a buscar soluções práticas, neste caso, a plataforma TerraClimate. Outra limitação encontrada foi relacionada ao software utilizado para o cálculo dos índices, o DrinC permite o cálculo apenas de uma estação por vez, o que pode atrasar a obtenção de resultados quando se trabalha com várias estações. Neste sentido, sugere-se a utilização de linguagens de programação, como R e Python, que permitem o cálculo desses índices de maneira prática para várias estações.

Recomenda-se a aplicação da metodologia desses índices em todo o NEB, bem como a exploração de outros cálculos da PET (Penman-Monteith, Thornthwaite, Hargreaves, Blaney-Criddle entre outros) para definir o melhor método para caracterizar a região. Tais recomendações podem contribuir para um melhor entendimento dos eventos de seca e chuvas extremas em ambientes urbanos no NEB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABATZOGLOU, J., DOBROWSKI, S., PARKS, S. et al. TerraClimate, a high- resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Sci Data** **5**,170191(2018). <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>

ALVAREZ, M.S., VERA, C.S., Kiladis, G.N. et al. Influence of the Madden Julian oscillation on precipitation and surface air temperature in South America. **Clim Dyn** **46**, 245–262 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00382-015- 2581-6>.

ALVES, J. M. B., BARBOSA, A. C. B., SILVA, E. M., VASCONCELOS JUNIOR, F. das C., SILVA, M. L. da ., SANTOS, A. C. S. dos ., LIRA, M. A. T., e SOMBRA, S. S.. (2018). Oscilações Intrassazonais Convectivas entre as regiões Indico-Pacífico e o Nordeste do Brasil: Algumas Características Observacionais e de Modelagem. **Revista Brasileira De Meteorologia**, 33(1), 193–206. <https://doi.org/10.1590/0102-7786331016>

ALVES, J. M. B., SILVA, E. M., SOMBRA, S. S., BARBOSA, A. C. B., SANTOS, A. C. S. et al. Eventos Extremos Diários de Chuva no Nordeste do Brasil e características Atmosféricas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 227-233, 2017.

AMORIM, A. C. B.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E.; MATOS, M. F. A.. Variabilidade dos Extremos de Precipitação Diária na Cidade de Natal, Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ** , v. 42, p. 284-295, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/31365>. Acesso em: 24 set. 2020. http://dx.doi.org/10.11137/2019_4_284_295

ANSARIFARD, S.; SHAMSNIA, S. A. Monitoring drought by reconnaissance drought index (RDI) and standardized precipitation index (SPI) using DrinC software. **Water Utility J**, v. 20, p. 29-35, 2018.

BRUBACHER, João Paulo; OLIVEIRA, Guilherme Garcia de; GUASSELLI, Laurindo Antonio. Preenchimento de falhas e espacialização de dados pluviométricos: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 615-629, 2020.

CANELLE, Tatiana Dias; DE CASTRO LIMA, Eudes; BORGES, Luís Antônio Coimbra. Panorama dos recursos hídricos no mundo e no Brasil. **Revista em agronegócio e meio ambiente**, v. 11, n. 4, p. 1259-1282, 2018.

CARMO, M. V. N. S. DO .; LIMA, C. H. R.. Caracterização Espaço-Temporal das Secas no Nordeste a partir da Análise do índice SPI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 2, p. 233–242, abr. 2020

CARMO, Maria Vitória Nava Silva do; LIMA, Carlos Henrique Ribeiro. Caracterização Espaço-Temporal das Secas no Nordeste a partir da Análise do índice SPI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 233-242, 2020.

CARVALHO, P.R. **Estudo comparativo dos algoritmos hierárquicos de análise de agrupamento em resultados experimentais**. 2018. 142 f. Dissertação (Mestre em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

CORREIA FILHO, W. L. F., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., SANTIAGO, D. B., TERASSI, P. M. B., Teodoro, P. E., Gois, G., Blanco, C. J. C., Souza, P. H. A., Costa, M., e Santos, P. J. (2019). Rainfall variability in the Brazilian northeast biomes and their interactions with meteorological systems and ENSO via CHELSA product. **Big Earth Data**, 3(4), 315-337

CORREIA FILHO, Washington Luiz Félix; LUCIO, Paulo Sérgio; SPYRIDES, Maria Helena Constantino. Caracterização dos extremos de precipitação diária no nordeste do Brasil. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 36, n. 3, p. 539-554, 2016.

COSTA, J. C., PEREIRA, G., SIQUEIRA, M. E., da SILVA CARDOZO, F., e DA SILVA, V. V. (2019). Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, 24.

COSTA, J. C., PEREIRA, G., SIQUEIRA, M. E., da SILVA CARDOZO, F., e DA SILVA, V. V. (2019). Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, 24.

DA ROCHA JÚNIOR, Rodrigo Lins et al. Bivariate assessment of drought return periods and frequency in brazilian northeast using joint distribution by copula method. **Geosciences**, v. 10, n. 4, p. 135, 2020.

DA SILVA, Vicente PR et al. Análise da pluviometria e dias chuvosos na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 131-138, 2011.

DE GOIS, Givanildo; DELGADO, Rafael Coll; DE OLIVEIRA JÚNIOR, José Francisco. Modelos teóricos transitivos aplicados na interpolação espacial do standardized precipitation index (SPI) para os episódios de El Niño Forte no Estado do Tocantins, Brasil. **Irriga**, v. 20, n. 2, p. 371-387, 2015.

DE MEDEIROS, Felipe Jeferson et al. Impacto da Variabilidade Interanual da Precipitação nos Reservatórios do Semiárido do Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 3, 2018.

DE MELLO, Yara Rúbia; KOHLS, Werner; DE OLIVEIRA, Therezinha Maria Novais. Uso de diferentes métodos para o preenchimento de falhas em estações pluviométricas. **Boletim de Geografia**, 2017.

DE SOUSA, Francisco de Assis Salviano et al. Estimativas dos riscos de chuvas extremas nas capitais do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 02, p. 430-439, 2016.

DE SOUZA, Tailan Santos; EICHENBERGER, Andréa Marina Rosário; DOS SANTOS NASCIMENTO, Patrícia. ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES METODOLOGIAS NA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM FEIRA DE SANTANA-BA. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

DOMINGOS, Sónia (2006) – **Análise do índice de seca Standardized Precipitation Index (SPI) em Portugal Continental. Palmer Drought Severity Index (PDSI) versus SPI.** Dissertação para a obtenção do grau de licenciatura em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica Interna – variante Meteorologia. Lisboa, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 51 p

DOS SANTOS, Aylmiliane Carla Claudino Sobreira et al. **Deslizamentos de Terra na Cidade de Maceió, Mapeamento de Zonas de Risco, Aplicando Ferramentas Computacionais.** Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS, v. 4, n. 1, p. 63-63, 2017

DOS SANTOS, Sérgio Rodrigo Quadros et al. Variabilidade da Precipitação no Estado do Pará por meio de Análise em Componentes Principais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 3, p. 615-627, 2014

DOS SANTOS, Sergio Rodrigo Quadros; DO AMARAL CUNHA, Ana Paula Martins; RIBEIRO-NETO, Germano Gondim. Avaliação de dados de precipitação para o monitoramento do padrão espaço-temporal da seca no nordeste do Brasil. **Revista brasileira de climatologia**, v. 25, 2019.

ESTRELA, Teodoro; VARGAS, Elisa. Drought management plans in the European Union. The case of Spain. **Water resources management**, v. 26, n. 6, p. 1537-1553, 2012.

FERREIRA, P. S. et al. Variabilidade Espaço-Temporal das Tendências de Precipitação na Mesorregião Sul Cearense e sua Relação com as Anomalias de TSM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 141-152, 2018.

FONSECA, Maria Helena Rocha. **Estimativa de precipitação por satélites: análise comparativa utilizando produtos imerg e dados in situ para as capitais nordestinas do Brasil.** 2022. 110 f. Monografia (Graduação em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022

FREITAS, J. C.; ANDRADE, A. R. S.; BRAGA, C. C., NETO, A. H. G., ALMEIDA, T. F. Análise de Agrupamentos na Identificação de Regiões Homogêneas de Índices Climáticos no Estado da Paraíba, PB – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.6, n.4, p.732 – 748, 2013.

GOIS, G. et al. Avaliação da Seca Através do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) em Alguns Municípios Do Sertão Alagoano. In: **XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Aracaju–SE. 2007.

GOMES, Rafaela dos Santos. **Influência da variabilidade climática nos volumes dos reservatórios do Nordeste do Brasil**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

HASTENRATH, S. Interannual variability and annual cycle: mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic. **Monthly Weather Review**. v.112, p.1097-1107, 1984.

HAYES, M. J.; SVOBODA, M.D.; WILHITE, D.A.; VANYARKHO, O.V, Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v. 80, n. 3, p.429-438, 1999.

HAYLOCK, Malcolm R. et al. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature. **Journal of climate**, v. 19, n. 8, p. 1490-1512, 2006.

HERRERA-ESTRADA, Julio E.;SATO, Yusuke;SHEFFIELD, Justin Spatio temporal dynamics of global drought. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 5, p. 2254-2263, 2017.

HOPKINS, W. G. A new view of statistics: Correlation coefficient. **New York: Internet Society for Sport Science**, 2009.

JUNQUEIRA, Rubens; DA SILVA AMORIM, Jhones; DE OLIVEIRA, Alisson Souza. Comparação entre diferentes metodologias para preenchimento de falhas em dados pluviométricos. **Sustentare**, v. 2, n. 1, p. 198-210, 2018.

LACERDA, F. F. (2016). **Tendências de temperatura e precipitação e cenários de mudanças climáticas de longo prazo no Nordeste do Brasil e em ilhas oceânicas** (Tese de doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife

LEITE FECHINE, José Alegnberto. IDENTIFICAÇÃO DE SECAS METEOROLÓGICAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA, USANDO O ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO PADRONIZADA (SPI). **Boletim de Geografia**, v. 33, n. 2, 2015.

LEMOS, Carlos Fernando; CALBETE, N. O. Sistemas frontais que atuaram no litoral do Brasil (período 1987-1995). **Boletim Climanalise**, Edição comemorativa, v. 10, p. 131-135, 1996.

LYRA, G. B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; GOIS, G.; CUNHA-ZERI, G.; ZERI, M. Rainfall variability over Alagoas under the influences of SST anomalies. **Meteorology and Atmospheric Physics** (Print), v. 129, n. 2, p. 157-171, 2017.

LYRA, G.B.; JUNIOR, O.J.F.; ZERI, M. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas State, Northeast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 13, p. 3546-3558, 2014.

LYRA, Matheus José Arruda; ARRAUT, Josefina Moraes. Estudo Sinótico e da Estrutura Vertical de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis Ocorrido em Janeiro de 2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2023.

MAGALHÃES, A. R.; GLANTZ, M. H., 1992: Socioeconomic impacts of climate variations and policy responses in Brazil, United Nations Environment Program (UNEP), Secretariat for Planning and Coordination State of Ceara (SEPLAN), **Esquel Brasil Foundation**, 155 pp

MARENGO, J. A., Alves, L. M., Bezerra, E. A., e Lacerda, F. F. (2011). **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro** (pp. 410-449). Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido.

MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M. Drought in Northeast Brazil - past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2017. Doi » <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>

MARENGO, Jose A.; CUNHA, Ana P.; ALVES, Lincoln M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanalise**, v. 3, n. 1, p. 49-54, 2016.

MARENGO, Jose A.; CUNHA, Ana P.; ALVES, Lincoln M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanalise**, v. 3, n. 1, p. 49-54, 2016.

McKee, T. B. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, **MA: American Meteorological Society**, 1993. p. 179-183.

MERA, Yeriel Elizabeth Zambrano; VERA, Jonny Fernando Rivadeneira; PÉREZ-MARTÍN, Miguel Ángel. Linking El Niño Southern Oscillation for early drought detection in tropical climates: The Ecuadorian coast. **Science of the Total Environment**, v. 643, p. 193-207, 2018.

MOGHIMI, Mohammad Mehdi; ZAREI, Abdol Rassoul; MAHMOUDI, Mohammad Reza. Seasonal drought forecasting in arid regions, using different time series models and RDI index. **Journal of Water and Climate Change**, v. 11, n. 3, p. 633-654, 2020.

MONTEIRO, L. S. ; OLIVEIRA JÚNIOR, J.F. ; GHAFAR, B. ; QIN, S. ; MUMTAZ, F. ; CORREIA FILHO, W. L. F. ; SHAH, M. ; JARDIM, A. M. R. F. ; SILVA, M. V. ; SANTIAGO, D. B. ; BARROS, H. G. ; MENDES, D. ; ABREU, M. C. ; SOUZA, A. ; PIMENTEL, L. C.

G. ; SILVA, J. L. B. ; ASLAM, M. ; KURIQI, A. . Rainfall in the Urban Area and Its Impact on Climatology and Population Growth. **Atmosphere** , v. 13, p. 1610-1631, 2022.

MOURA, Geber Barbosa de A. et al. **Estudo preliminar da variabilidade pluviométrica do setor leste do Nordeste do Brasil: parte I**. In: X Congresso Brasileiro de meteorologia. 1998

NASCIMENTO, Diego Tarley Ferreira. Estudo comparativo da definição de anos-padrão do regime habitual e excepcional das precipitações a partir do ano civil e do ano hidrológico. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 1697-1706, 2017.

NASCIMENTO, Diego Tarley Ferreira; NOVAIS, Giuliano Tostes. Clima do Cerrado: dinâmica atmosférica e características, variabilidades e tipologias climáticas. **Eliséé**, v. 9, n. 2, p. e922021, 2020.

NÓBREGA, R. S., e Santiago, G. A. C. F. (2014). Tendência de temperatura na superfície do mar nos oceanos Atlântico e Pacífico e variabilidade de precipitação em Pernambuco. **Mercator (Fortaleza)**, 13(1), 107-118.

OLIVEIRA, Brunna Stefanny Sangel de; CUNHA, Alan Cavalcanti da. Correlação entre qualidade da água e variabilidade da precipitação no sul do Estado do Amapá. **Revista Ambiente e Água**, v. 9, p. 261-275, 2014.

OLIVEIRA-JÚNIOR, José Francisco de; CORREIA FILHO, Washington Luiz Félix; MONTEIRO, L. S. ; SHAH, Munawar ; HAFEEZ, A. ; GOIS, Givanildo ; LYRA, Gustavo B. ; Abreu, M. C. ; SANTIAGO, Dimas de Barros ; DE SOUZA, Amaury; MENDES, D. ; COSTA, C. E. A. S. ; BLANCO, Claudio José Cavalcante ; Zeri, Marcelo ; PIMENTEL, L. C. G. ; JAMJAREEGULGARN, P. ; SILVA, E. B. .Urban rainfall in the Capitals of Brazil: Variability, trend, and wavelet analysis. **ATMOSPHERIC RESEARCH** , v. 267, p. 105984, 2022.

OLIVEIRA-JÚNIOR, JOSÉ FRANCISCO DE; CORREIA FILHO,W.L.F. ;SANTIAGO,D.B.;GOIS, G.;COSTA, M.;SILVA JUNIOR,C.A. ; TEODORO, P. E. ;

FREIRE, F. M. . Rainfall in Brazilian Northeast via in situ data and CHELSA product: mapping, trends, and socio-environmental implications. **ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT** , v. 193, p. 263-281, 2021.

PEREIRA, Charla Campos et al. **Identificação de Secas no Estado de Alagoas via Standardized Precipitation Index (SPI)**. 2022.

R CORE TEAM et al. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>, 2016.

RAHMAT, Siti Nazahiyah; JAYASURIYA, Niranjali; BHUIYAN, Muhammed. Assessing droughts using meteorological drought indices in Victoria, Australia. **Hydrology Research**, v. 46, n. 3, p. 463-476, 2015.

REBOITA, M.S.; SANTOS, I.A. Influência de alguns padrões de teleconexão na precipitação no norte e nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, n. 2, p. 28-48, 2015.

REBOUÇAS, A.D.C. (1997). Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos Avançados**, 11(29), pp. 127–154.

ROCHA, R. L. DA . et al.. Mudança de Longo Prazo e Regionalização da Evapotranspiração de Referência no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. spe, p. 891–902, out. 2020.

ROHLF, J.F. Adaptive hierarchical clustering schemes. **Systematic Biology**, v.19, n. 2, p. 58-82, 1970.

SCHMIDT, D. M.; LIMA, K. C.; JESUS, E. S.. Variability climatic of water availability in the semiarid of the state of Rio Grande do Norte. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, [s.l.], v. 41, n. 3, p. 483-491, 4 dez. 2018. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/29744>. Acesso em: 10 ago. 2020. http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_483_491.

SILVA, Aion Angelu Ferraz; JARDIM, Carlos Henrique. **VARIABILIDADE E REGIONALIZAÇÃO DOS ANOS-PADRÃO DE PLUVIOSIDADE NA REGIÃO DE UNAÍ-MG**. Simpósio Nacional de Geografia e Gestão Territorial e Semana Acadêmica de Geografia da Universidade Estadual de Londrina, v. 1, p. 796- 813, 2018.

SILVA, Greicy Kelly da et al. Análise da Variabilidade Espaço-Temporal do SPI: Um Estudo de Caso para a Sub-Bacia Choró, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 539-549, 2021.

SILVA, josier Ferreira; NOBRE, francisco wlirian. O discurso da seca e da crise hídrica: uma análise do Cinturão das Águas do Ceará. **Sustainability in Debate**, v. 7, p. 22-37, 2016.

SILVA, TRBF, Santos CACd, Silva DJF, Santos CAG, da Silva RM, de Brito JIB. Climate Indices-Based Analysis of Rainfall Spatiotemporal Variability in Pernambuco State, Brazil. **Water**. 2022; 14(14):2190. <https://doi.org/10.3390/w14142190>

SOBRAL, BS, Oliveira-Júnior, JF, de Gois, G, Pereira-Júnior, ER. Spatial variability of SPI and RDIst drought indices applied to intense episodes of drought occurred in Rio de Janeiro State, Brazil. **Int J Climatol**. 2018; 38: 3896– 3916. <https://doi.org/10.1002/joc.5542>

SOKAL, R.R.; ROHLF, F.J. The comparison of dendrograms by objective methods. **Taxon**, v. 11, n. 2, p. 33-40, 1962

SOTTO, D., Ribeiro, D. G., Abiko, A. K., Sampaio, C. A. C., Navas, C. A., Marins, K. R. de C., Sobral, M. do C. M., Philippi, A., e Buckeridge, M. S.. (2019). Sustentabilidade urbana: dimensões conceituais e instrumentos legais de implementação. **Estudos Avançados**, 33(97), 61–80. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2019.3397.004>

SUASSUNA, Arthur de Souza Antunes; MAIA, Adelena Gonçalves. **Aplicação do índice de precipitação padronizado (SPI) para identificação de períodos de seca no Rio Grande do Norte**. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 1-8, 2017.

SURENDRAN, U., Anagha, B., Raja, P. et al. Análise da seca de regiões úmidas, semiáridas e áridas da Índia usando o modelo DrinC com diferentes índices de seca. **Water Resour Manage** 33, 1521–1540 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11269-019-2188-5>

SVOBODA, Mark; HAYES, Michael; WOOD, Deborah. **Standardized precipitation index: user guide**. 2012.

TERASSI, Paulo Miguel de Bodas et al. Standardized Precipitation Index Aplicado à Identificação do Padrão das Chuvas na Vertente Paranaense da Bacia Hidrográfica do Rio Itararé. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 557-571, 2020

TIGKAS, D., Vangelis, H. e Tsakiris, G. DrinC: um software para análise de secas baseado em índices de seca. **Earth Sci Inform** 8, 697–709 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>

TIGKAS, D.; VANGELIS, H.; PROUTSOS, N.; TSAKIRIS, G. Incorporating aSPI and eRDI in Drought Indices Calculator (DrinC) Software for Agricultural Drought Characterisation and Monitoring. **Hydrology** 2022, 9, 100. <https://doi.org/10.3390/hydrology9060100>

TSAKIRIS, G. et al. Drought meteorological monitoring network design for the reconnaissance drought index (RDI). In: Proceedings of the 1st International Conference “Drought management: scientific and technological innovations”. Zaragoza, Spain: option Méditerranéennes, **series A**. 2008. p. 57-62.

TURCO, José Eduardo Pitelli; BARBOSA, José Carlos. Avaliação de duas estações meteorológicas automatizadas, para estimativa diária da evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith. **Irriga**, v. 13, n. 3, p. 339-354, 2008.

VAN LOON, Anne F. et al. Drought in a human-modified world: reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 9, p. 3631-3650, 2016.

VANGELIS, H.; TIGKAS, D.; TSAKIRIS, G. The effect of PET method on reconnaissance drought index (RDI) calculation. **Journal of Arid Environments**, v. 88, p. 130-140, 2013.

VICENTE-SERRANO, Sergio M.; BEGUERÍA, Santiago; LÓPEZ-MORENO, Juan 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.

WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. **San Diego – CA: Academic Press**, 1995.

ZARCH, Mohammad Amin Asadi; SIVAKUMAR, Bellie; SHARMA, Ashish. Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). **Journal of hydrology**, v. 526, p. 183-195, 2015.

ZAREI, Abdol Rassoul. Evaluation of drought condition in arid and semi-arid regions, using RDI index. **Water Resources Management**, v. 32, p. 1689- 1711, 2018.