



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (RECURSOS HÍDRICOS)**

**JORGIANE PIRES BEZERRA**

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA E SEU USO NO**  
**MONITORAMENTO DE SECAS E AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS**  
**CLIMÁTICAS NAS VAZÕES AFLUENTES A RESERVATÓRIOS**

**FORTALEZA**

**2024**

JORGIANE PIRES BEZERRA

MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA E SEU USO NO MONITORAMENTO  
DE SECAS E AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS  
VAZÕES AFLUENTES A RESERVATÓRIOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins.

Coorientador: Dr. Ályson Brayner Sousa Estácio.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

B469m Bezerra, Jorgiane Pires.  
Modelagem hidrológica distribuída e seu uso no monitoramento de secas e avaliação dos impactos das mudanças climáticas nas vazões afluentes a reservatórios / Jorgiane Pires Bezerra. – 2024.  
75 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins.

Coorientação: Prof. Dr. Ályson Braynner Sousa Estácio.

1. Extremos Hidrológicos. 2. Índice de Seca Composto. 3. Mudanças Climáticas. 4. Modelagem Hidrológica. 5. Gestão de Recursos Hídricos. I. Título.

CDD 627

---

JORGIANE PIRES BEZERRA

MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA E SEU USO NO MONITORAMENTO  
DE SECAS E AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS  
VAZÕES AFLUENTES A RESERVATÓRIOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em:    /    /    .

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Ályson Brayner Sousa Estácio (Coorientador)  
Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)

---

Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Dirceu Silveira Reis Junior  
Universidade de Brasília (UNB)

## AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Dr. Eduardo Sávio, uma das pessoas mais geniais que já tive o prazer de conhecer, cuja paixão pelo conhecimento foi fundamental em minha formação. Em meio à sua agenda ocupada, ele sempre encontrou tempo para me orientar e tirar dúvidas, enfatizando a importância de compreender cada aspecto do meu trabalho e não apenas gerar resultados. Em momentos de incerteza, ele me tranquilizava dizendo “No final tudo dá certo, se não deu ainda é porque o final não chegou”.

Ao meu coorientador, Dr. Ályson Estácio, estendo um agradecimento imensurável. Sinto-me extremamente afortunada e agradeço ao universo por todos os caminhos que me levaram a ele e por sua disposição em aceitar a minha coorientação. Sua generosidade, bondade e sabedoria foram como um porto seguro em meio às tempestades da incerteza. Mais do que compartilhar seu vasto conhecimento, ele ofereceu um ombro amigo e palavras tranquilizadoras em cada momento de dúvida ou ansiedade.

Agradeço ao Dr. Junior Vasconcelos pela compreensão e orientação desde minha entrada na Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) em 2019. Seu apoio foi fundamental não apenas para este trabalho, mas também para o meu crescimento pessoal e profissional.

Ao Dr. Dirceu Reis, estendo meu sincero agradecimento não apenas por suas contribuições, mas também por ser fonte de inspiração para me aprofundar nos estudos de modelos estatísticos.

Aos professores do departamento de pós-graduação em engenharia civil, em especial ao Prof. Dr. Assis Souza Filho, Prof. Dr. Iran Lima e Prof<sup>a</sup> Dra. Ticiania Studart, agradeço pelo amor ao conhecimento e pela riqueza de aprendizado transmitido.

Minha família merece um agradecimento especial, em particular minha mãe Socorro, meu irmão Jardel e meu filho Bernardo, que é a fonte da minha inspiração diária para lutar por um futuro melhor. Seu amor incondicional e apoio foram essenciais para o meu sucesso.

Um agradecimento especial ao meu esposo, Geovanni Laurindo, por seu suporte inabalável, especialmente nos momentos em que as dificuldades financeiras e de tempo que pareciam insuperáveis. Sua força e confiança em mim foram fundamentais para que eu continuasse firme em minha jornada.

Estendo meus agradecimentos aos meus amigos da sala de projetos da Funceme pelo apoio inestimável durante este período desafiador. Agradeço a Domingo Cassain pelas suas contribuições enriquecedoras, a Renan Vieira pelo aprendizado durante o processo de doutorado,

e a Letícia Freitas pelo aconselhamento e suporte que foram fundamentais em minha jornada, principalmente no início do mestrado em que passei por um momento muito difícil na minha vida pessoal. A Dário e Samira, expressei minha gratidão pelas palavras de conforto e pelos abraços reconfortantes que me ofereceram em dezembro, um período de grande aflição devido a elaboração da dissertação e do resultado da primeira etapa do doutorado.

Gostaria também de expressar minha profunda aos meus amigos da pós-graduação em especial ao Geovane e a Tereza Melo, cujo apoio foi essencial não apenas nas disciplinas, mas também no suporte emocional durante o processo de seleção do doutorado.

Agradeço a Funceme pelo apoio científico, pois lá não foi apenas um local de trabalho, mas um ambiente enriquecedor onde cresci profissionalmente e pessoalmente, cercada por mentes brilhantes e pessoas que acreditam na ciência. Esta experiência moldou significativamente minha carreira e perspectiva, proporcionando-me oportunidades únicas de aprendizado e colaboração.

Gostaria de dedicar um agradecimento especial a todas as pessoas incansáveis que, apesar dos períodos difíceis em que a ciência foi questionada e desacreditada, mantiveram-se firmes em sua dedicação e crença no poder transformador do conhecimento científico.

Por fim, minha gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

## RESUMO

Os eventos hidrológicos extremos intensificam-se em resposta às mudanças climáticas, marcadas por elevações significativas na temperatura global e alterações nos padrões de precipitação. Estas transformações não somente exacerbam a severidade dos eventos de secas e cheias, mas também modificam o seu padrão espacial. Neste cenário, a região semiárida do Ceará, situada no Nordeste Brasileiro, tornou-se foco de estudos e desenvolvimento de estratégias de gestão de recursos hídricos devido à sua particular suscetibilidade às variações climáticas. O presente estudo propôs a criação de ferramentas, utilizando modelagem hidrológica distribuída, destinadas a apoiar o estudo e monitoramento de secas, além de avaliar os efeitos das mudanças climáticas sobre o regime de vazões, focando na Região Hidrográfica do Banabuiú. Um Índice de Seca Composto (CDI) foi desenvolvido e aplicado especificamente a esta região, sendo posteriormente validado na Bacia do Reservatório Riacho do Sangue. Este índice integra seis indicadores climáticos e hidrológicos, oferecendo uma avaliação integrada das condições de seca. A ponderação dos indicadores para a composição do CDI foi conduzida através dos resultados de uma Análise de Componentes Principais (PCA) dos indicadores. Para avaliar os efeitos das mudanças climáticas sobre a hidrologia da região, analisaram-se as mudanças relativas de vazões, avaliando tanto a probabilidade de redução quanto as alterações nas cheias, considerando diferentes frequências de ocorrência. Para essa análise, foram usados modelos climáticos globais do CMIP6, permitindo uma investigação das projeções futuras sob variados cenários climáticos. Os resultados confirmaram a eficácia do CDI como uma ferramenta para o monitoramento de secas, demonstrando sua capacidade de capturar a severidade e duração desses eventos em diversas escalas temporais. A análise dos impactos das mudanças climáticas revelou uma variação significativa nas projeções de vazão, dependendo do período e do cenário futuro analisados. Esse fenômeno é acompanhado por um aumento na incerteza associada aos resultados, visto que alguns indicam um aumento na vazão, enquanto outros apontam para uma diminuição. Esse fator é atribuído principalmente às disparidades entre os modelos climáticos e os cenários de emissão. Conclui-se que a implementação do CDI e a análise da variabilidade e incerteza nas vazões constituem avanços significativos no monitoramento e na compreensão dos impactos das mudanças climáticas sobre eventos hidrológicos extremos, especialmente em regiões semiáridas. O CDI, ao integrar diversos indicadores hidrológicos e climáticos, se torna uma ferramenta para a detecção e avaliação de secas, servindo como um instrumento de suporte a políticas públicas e iniciativas de gestão de secas. Simultaneamente, o estudo sobre a variabilidade e incerteza das vazões sublinha a necessidade de incorporar esses aspectos no planejamento dos recursos hídricos.

**Palavras-chave:** extremos hidrológicos; índice de seca composto; mudanças climáticas; modelagem hidrológica; incerteza climática; gestão de recursos hídricos.

## ABSTRACT

Extreme hydrological events have intensified in response to climate change, marked by significant rises in global temperature and changes in precipitation patterns. These changes have not only exacerbated the severity of droughts and floods but have also altered their spatial pattern. Against this backdrop, the semi-arid region of Ceará, located in northeastern Brazil, has become the focus of studies and the development of water resource management strategies due to its particular susceptibility to climate variations. This study proposed the creation of tools, using distributed hydrological modelling, to support the study and monitoring of droughts, as well as assessing the effects of climate change on the flow regime, focusing on the Banabuiú Hydrographic Region. A Composite Drought Index (CDI) was developed and applied specifically to this region, and later validated in the Riacho do Sangue Reservoir Basin. This index integrates six climatic and hydrological indicators, offering an integrated assessment of drought conditions. The weighting of the indicators for the composition of the CDI was conducted through the results of a Principal Component Analysis (PCA) of the indicators. To assess the effects of climate change on the region's hydrology, the relative changes in flows were analyzed, assessing both the probability of reduction and the changes in floods, considering different frequencies of occurrence. For this analysis, global climate models from CMIP6 were used, allowing an investigation of future projections under various climate scenarios. The results confirmed the effectiveness of the CDI as a tool for monitoring droughts, demonstrating its ability to capture the severity and duration of these events on different time scales. The analysis of the impacts of climate change has revealed a significant variation in flow projections depending on the analyzed period and future scenario. This phenomenon is accompanied by an increase in uncertainty associated with the results, as some indicate an increase in flow while others point to a decrease. This factor is primarily attributed to differences between climate models and emission scenarios. It is concluded that the implementation of the CDI and the analysis of variability and uncertainty in flows constitute significant advances in monitoring and understanding the impacts of climate change on extreme hydrological events, especially in semi-arid regions. By integrating various hydrological and climatic indicators, the CDI becomes a tool for detecting and assessing droughts, serving as an instrument to support public policies and drought management initiatives. At the same time, the study on the variability and uncertainty of flows underlines the need to incorporate these aspects into water resources planning.

**Keywords:** hydrological extremes; composite drought index; climate change; hydrological modelling; climate uncertainty; water resources management.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas metodológicas para a composição e validação do CDI.....	22
Figura 2 - Localização das Bacias Hidrográficas do Banabuiú e do Riacho do Sangue.....	23
Figura 3 - Anomalias padronizadas do rendimento de feijão e milho e de precipitação no período de 1974 a 2022, as setas indicam eventos de El Niños .....	25
Figura 4 – Áreas incrementais dos reservatórios monitorados na Região Hidrográfica do Banabuiú e Bacia do Reservatório Riacho do Sangue. A numeração no centro das áreas representa o identificador dos reservatórios. ....	31
Figura 5 - Mapa de municípios selecionados para validação do CDI .....	32
Figura 6 - Classificação da severidade da seca.....	35
Figura 7 - Evolução espaço-temporal da severidade da seca nas Bacias Hidrográficas Banabuiú e Riacho do Sangue: 2012-2020 .....	38
Figura 8 - Comparativo Temporal da Severidade de Seca na Bacia Hidrográfica de Banabuiú: Análise do CDI-4 (A) e CDI-12 (B) de 1998 a 2020 .....	40
Figura 9 - Correlação entre as perdas de rendimento de milho ao nível municipal e os valores do CDI-4.....	41
Figura 10 - Correlação entre o aporte aos reservatórios e os valores do CDI-12.....	43
Figura 11 - Comparação entre CDI-4 e monitor de secas na avaliação dos percentuais da área da bacia que estão em cada categoria de severidade de seca na Bacia do Reservatório Riacho do Sangue .....	45
Figura 12 - Mapa de localização da bacia incremental do reservatório Banabuiú .....	49
Figura 13 - Comparação dos cenários SSP245 (azul) e SSP585 (vermelho) para mudanças percentuais médias anuais na precipitação acumulada entre janeiro e julho nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100).....	55
Figura 14 - Comparação dos cenários SSP245 (azul) e SSP585 (vermelho) para mudanças percentuais médias anuais na ETP acumulada entre janeiro e julho nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100).....	56
Figura 15 - Comparação dos cenários SSP245 (azul) e SSP585 (vermelho) para mudanças percentuais médias anuais na vazão entre janeiro e julho nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100) .....	58
Figura 16 - Comparação dos cenários SSP245 (azul) e SSP585 (vermelho) para mudanças percentuais no índice de aridez entre janeiro e julho nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100).....	60

Figura 17 - Curva de probabilidade acumulada para o SSP585 considerando a variação da vazão média anual entre janeiro e julho nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100).....	62
Figura 18 - Curva de probabilidade acumulada para o SSP585 considerando a variação da vazão média anual entre janeiro e julho nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100).....	62
Figura 19 – Mudanças relativas das cheias com diferentes tempos de recorrência entre JAN-JUL para os cenários SSP245 (C1) e SSP585 (C2) nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100).....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Indicadores e variáveis utilizadas na composição do CDI.....	26
Tabela 2 – Pesos dos indicadores hidroclimáticos para PC1 .....	37
Tabela 3 – Modelos Climáticos Globais do CMIP6 utilizados .....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ACP	Análise de Componentes Principais
BIC	<i>Bayesian Information Criterion</i>
CDI	Índice de Seca Composto
CMIP	Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados
COGERH	Companhia de Gerenciamento dos Recursos Hídricos
DSI	Indicador de Períodos Secos
ETP	Evapotranspiração Pontencial
EVA	Erro percentual das Vazões Anuais
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GEV	Distribuição Generalizada de Valores Extremos
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MGB	Modelo Hidrológico de Grandes Bacias
MCG	Modelos de Circulação Geral
NASH-Log	Logaritmo do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe
NSE	Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliff
PCA	Análise de Componentes Principais
SMI	Indicador de Umidade do Solo
SRI	Indicador de Escoamento Padronizado
SPI	Indicador de Precipitação Padronizado
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>
TCI	Indicador de Condição Térmica
UFC	Universidade Federal do Ceará
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
VCI	Indicador de Condição da Vegetação
VHI	Indicador de Saúde Vegetal
WSI	Indicador de Períodos Úmidos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	16
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	17
<b>1.2</b>	<b>Organização dos capítulos da Dissertação</b> .....	18
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM ÍNDICE DE SECA COMPOSTO PARA MONITORAMENTO DE SECAS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS</b> .....	19
<b>2.1</b>	<b>Introdução</b> .....	19
<b>2.2</b>	<b>Metodologia</b> .....	20
<b>2.2.1</b>	<i>Área de estudo e impactos das secas</i> .....	22
<b>2.2.2</b>	<i>Indicadores de seca baseados em variáveis hidrometeorológicas</i> .....	25
<b>2.2.2.1</b>	<i>Indicador de Precipitação Padronizado (SPI)</i> .....	27
<b>2.2.2.2</b>	<i>Indicador de Escoamento Padronizado (SRI)</i> .....	27
<b>2.2.2.3</b>	<i>Indicador de Saúde Vegetal (VHI)</i> .....	27
<b>2.2.2.4</b>	<i>Indicador de Umidade do Solo (SMI)</i> .....	28
<b>2.2.2.5</b>	<i>Indicador de Períodos Secos (DSI) e Indicador de Períodos Úmidos (WSI)</i> .....	28
<b>2.2.3</b>	<i>Escalas de análise</i> .....	29
<b>2.2.3.1</b>	<i>Escalas espaciais</i> .....	30
<b>2.2.3.2</b>	<i>Escalas temporais</i> .....	33
<b>2.2.4</b>	<i>Análise de Componentes Principais e composição dos pesos do CDI</i> .....	33
<b>2.2.5</b>	<i>Limiares de severidade de seca</i> .....	34
<b>2.2.6</b>	<i>Validação</i> .....	35
<b>2.3</b>	<b>Resultados</b> .....	36
<b>2.3.1</b>	<i>Análise multivariada</i> .....	36
<b>2.3.2</b>	<i>Evolução espaço-temporal da severidade da seca conforme o CDI</i> .....	37
<b>2.3.3</b>	<i>Validação do CDI</i> .....	40
<b>2.3.3.1</b>	<i>Impactos na produção de milho</i> .....	40

2.3.3.2	<i>Impactos no aporte aos reservatórios</i> .....	42
2.4	<b>Discussões</b> .....	43
2.4.1	<i>Versatilidade e aplicabilidade do CDI</i> .....	43
2.4.2	<i>CDI e o Monitor de Secas</i> .....	44
2.5	<b>Conclusões</b> .....	46
3	<b>ANÁLISE DA VARIABILIDADE NAS VARIÁVEIS HIDROMETEOROLÓGICAS NA ÁREA DO RESERVATÓRIO BANABUIÚ SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS</b> .....	47
3.1	<b>Introdução</b> .....	47
3.2	<b>Metodologia</b> .....	48
3.2.1	<i>Área de estudo e dados hidrometeorológicos observados</i> .....	48
3.2.2	<i>Modelos climáticos globais e projeções do CMIP6</i> .....	50
3.2.3	<i>Variáveis climáticas projetadas e correção de viés</i> .....	51
3.2.4	<i>Modelagem hidrológica</i> .....	52
3.2.5	<i>Estratégia de análise das projeções hidrológicas</i> .....	53
3.3	<b>Resultados</b> .....	54
3.3.1	<i>Mudanças na variabilidade das variáveis hidroclimáticas</i> .....	54
3.3.1.1	<i>Precipitação e ETP</i> .....	54
3.3.1.2	<i>Vazão</i> .....	57
3.3.1.3	<i>Índice de aridez</i> .....	59
3.3.2	<i>Probabilidade de ocorrência das variações de vazão para os cenários SSP585 e SSP245</i> .....	61
3.3.3	<i>Mudanças nos extremos de cheia</i> .....	63
3.4	<b>Conclusões</b> .....	65
4	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISA FUTURA</b> .....	66
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	68

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

As mudanças climáticas, evidenciadas pelo aumento médio global de cerca de 1°C acima dos níveis pré-industriais, estão provocando alterações significativas nos padrões climáticos em todo o mundo. Essas alterações estão intensificando eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas severas e chuvas intensas, com impactos profundos em regiões vulneráveis. Estudos recentes, incluindo os do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), ressaltam a urgência de compreender e mitigar esses impactos, especialmente em áreas onde o aumento das temperaturas globais, impulsionado por atividades humanas, pode levar a um agravamento desses eventos (IPCC, 2021; Tang, 2019; Shah, 2020).

Nesse contexto, a região semiárida do Nordeste brasileiro que já é marcada por desafios climáticos significativos como secas prolongadas, escassez hídrica e degradação do solo, enfrenta uma vulnerabilidade crescente muito em função das mudanças climáticas. Com a projeção de condições ainda mais severas, como secas mais intensas e variações extremas na disponibilidade de água, a sustentabilidade dos recursos hídricos está em risco, não só em termos quantitativos, mas em termos qualitativos. Essa situação impõe desafios adicionais, especialmente nas comunidades rurais, onde a dependência da água para subsistência e desenvolvimento econômico é crítica (Andrade *et al.*, 2021; Marego *et al.*, 2017; Magalhães *et al.*, 2022).

Diante desses desafios, torna-se essencial o desenvolvimento de ferramentas que subsidiem o monitoramento dessas variações, assim como proceder a análise dos impactos das mudanças de clima no setor dos recursos hídricos. Isto permite-nos entender os impactos da variabilidade climática e das mudanças clima no setor, permitindo identificar vulnerabilidades e desenvolver medidas de adaptação apropriadas (Brito *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2017; Kim; Jehanzaib, 2020; Modarres; Sarhadi, 2016).

Adicionalmente, a importância de abordar os extremos hidrológicos, tanto secas quanto cheias, é reforçada por autores como Forzieri *et al.* (2016) e Singh *et al.* (2014), que destacam a necessidade de compreender os riscos associados às mudanças climáticas e desenvolver estratégias de mitigação adaptativas e resilientes. A modelagem hidrológica pode ser um instrumento de subsídio a esses estudos, fornecendo dados de vazões para análise e monitoramento desses extremos.

Nesse estudo, para obter as series temporais de vazão, foi utilizado o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB), desenvolvido por Collischonn (2001). Sua estrutura distribuída permitiu a representação da variabilidade espacial das características físicas e

biogeográficas das bacias hidrográficas, simulando os processos fundamentais do ciclo hidrológico, incluindo precipitação, evapotranspiração, infiltração, e fluxos superficiais e subterrâneos. A integração de dados espaciais diversos pelo MGB, como topografia, uso do solo e cobertura vegetal, possibilitou a condução de análises hidrológicas em diferentes escalas espaciais.

O MGB foi utilizado para as duas análises nesse estudo. A primeira delas concentrou-se no desenvolvimento do Índice de Seca Composto (CDI) para a Região Hidrográfica do Banabuiú e validado na Bacia do Reservatório Riacho do Sangue. Ao utilizar os dados de vazão gerados pelo MGB, foi possível calcular e integrar o Índice de Escoamento Padronizado (SRI) como um indicador hidrológico no CDI, evidenciando, assim, a utilidade do modelo na avaliação das condições de seca.

A segunda investigação focou na variabilidade e incerteza das vazões na Área Incremental do Reservatório Banabuiú, com base nas projeções climáticas do CMIP6. Neste estudo, o MGB utilizou dados de precipitação e evapotranspiração potencial (ETP), sendo a ETP calculada externamente pelo método de Hargreaves-Samani (Hargreaves; Samani, 1985), a partir de dados oriundos dos modelos do CMIP6, considerando dois cenários de análise: SSP585 e SSP245. A inclusão desses dados no MGB permitiu a análise das projeções de vazão sob diversos cenários de mudanças climática, contribuindo para uma compreensão dos impactos das mudanças climáticas sobre a vazão afluente ao reservatório Banabuiú.

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal deste estudo é desenvolver e aplicar ferramentas baseadas em modelagem hidrológica para o monitoramento de secas e avaliação dos impactos das mudanças climáticas. Para atingir este objetivo principal, os objetivos específicos delineados são:

1. Desenvolver um Índice de Seca Composto (CDI), integrando indicadores climáticos e hidrológicos para fornecer uma avaliação integrada das condições de seca;
2. Aplicar e validar o CDI desenvolvido na Região Hidrográfica do Banabuiú e na Bacia do Reservatório Riacho do Sangue, para monitorar as condições de seca e entender sua dinâmica na região;
3. Examinar a mudança relativa da precipitação, evapotranspiração, vazão e do índice de aridez na Área Incremental do Reservatório Banabuiú, utilizando modelos climáticos globais do CMIP6;

4. Analisar as probabilidades das variações nas vazões médias e mudança nos extremos de cheias.

## **1.2 Organização dos capítulos da Dissertação**

Este documento está estruturado em cinco capítulos. Este capítulo, de caráter introdutório, apresenta o contexto das mudanças climáticas e seus impactos nos extremos hidrológicos, particularmente em regiões semiáridas. Além disso, justifica a importância dos estudos e delinea os objetivos específicos da pesquisa.

Os dois capítulos seguintes estão organizados na forma de artigos científicos. O capítulo 2 é intitulado "Desenvolvimento e aplicação de um índice de seca composto para monitoramento de seca em regiões semiáridas". Neste capítulo, é detalhado o processo de desenvolvimento do CDI, calibrado na Bacia do Rio Banabuiú, tendo sua aplicação e validação na Bacia do Reservatório Riacho do Sangue, fornecendo uma análise abrangente das condições de seca na região.

No capítulo 3, intitulado "Análise da variabilidade nas variáveis hidrometeorológicas na área do reservatório Banabuiú sob cenários de mudanças climáticas", são exploradas as projeções de vazão utilizando modelos climáticos globais do CMIP6. Este capítulo foca na variabilidade e incerteza das projeções de vazão e suas implicações para a gestão de recursos hídricos na bacia de estudo.

Por fim, o capítulo 4 sintetiza as conclusões do estudo, destacando os principais resultados, contribuições e implicações da pesquisa para o entendimento e gestão dos extremos hidrológicos em um contexto de mudanças climáticas. O capítulo 5 apresenta as referências bibliográficas que embasaram a elaboração da dissertação.

## 2 DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM ÍNDICE DE SECA COMPOSTO PARA MONITORAMENTO DE SECAS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS

### 2.1 Introdução

As secas são caracterizadas pela redução acentuada da precipitação em comparação com as médias históricas, podendo persistir por períodos prolongados, resultando em escassez de água (Wilhite; Glantz, 2019). O aumento das emissões de gases de efeito estufa tem ocasionado mudanças significativas dos padrões de clima do planeta, em particular, promovendo a ocorrência de eventos mais extremos e mais frequentes, os quais representam um desafio à adaptação dos mesmos (Van Loon; Van Lanen, 2013; Berbel; Esteban, 2019).

Além disso, as secas apresentam um impacto multifacetado e transversal, influenciando diversos setores. Elas comprometem a segurança alimentar e a sustentabilidade econômica, afetam a disponibilidade de água para consumo humano e têm consequências significativas sobre os ecossistemas (Mishra, 2020; Teutschbein *et al.*, 2023). Por esta razão, estão frequentemente associadas a conflitos pelo uso da água, desde disputas a nível local até tensões internacionais (Gleick, 2014). Assim, enfatiza-se a necessidade de abordagens integradas para gerenciar e monitorar os eventos e impactos das secas de forma eficaz.

A manifestação da seca em diversas formas, incluindo meteorológica, agrícola, e hidrológica, evidencia a necessidade de uma abordagem integrada. Considerar uma única variável hidrometeorológica para avaliá-la pode ser limitante para o seu gerenciamento. Nesse sentido, o Índice de Seca Composto (CDI) emerge como uma informação integradora, ao considerar simultaneamente diferentes dimensões de uma seca, proporcionando uma visão integrada desses eventos, além de propiciar maior agilidade no processo de monitoramento pois integra diferentes indicadores (Bayissa *et al.*, 2019; Wang; Yu, 2021; Karimi *et al.*, 2022).

O CDI de *New South Wales*, analisado por Clark *et al.* (2016), oferece uma avaliação das condições sazonais locais. Nos Estados Unidos, o *U.S. Drought Monitor* (National Drought Mitigation Center, 2023) integra múltiplos indicadores para fornecer uma análise detalhada das condições de seca. Na Europa, conforme Jager e Vogt (2015), o *European Drought Observatory* utiliza um CDI adaptado às características climáticas do continente europeu.

A praticidade do uso de um indicador de seca único, composto e automático, propicia maior flexibilidade ao sistema de monitoramento, permitindo sua aplicação em diferentes contextos. Por esta razão, o mesmo poderia ser indicado como produto de apoio em

sistemas de monitoramento de secas que primem pelo engajamento de várias instituições responsáveis. Este é o caso do Monitor de Secas do Brasil, que conta com o envolvimento de quase 60 instituições estaduais e 5 federais na sua operacionalização (ANA, 2023). A funcionalidade de um indicador como o CDI reflete uma abordagem integrada que é corroborada por práticas de monitoramento de secas no mundo.

Neste trabalho, propõe-se a implementação de um CDI aplicado a bacias hidrográficas localizadas em uma região semiárida, uma área notoriamente suscetível a secas (Moreira *et al.*, 2020). Para isto, foram considerados seis indicadores distintos para a composição de um CDI, abrangendo análises de padrões e anomalias de precipitação e vazão, frequência e duração de períodos secos e úmidos, disponibilidade de umidade no solo e condições de saúde vegetal.

Conforme trabalhos anteriores, este estudo adota a Análise de Componentes Principais (PCA) para determinar os pesos do CDI proposto. A PCA é uma técnica estatística multivariada que visa reduzir a dimensionalidade de um conjunto de dados, estabelecendo pesos para as variáveis em um espaço de componentes reduzido. Esta metodologia é essencial para identificar os fatores ou componentes que mais influenciam a variabilidade nos dados, permitindo a atribuição de pesos que refletem as contribuições relativas de cada indicador na composição do CDI. Este método foi utilizado e validado em diversos estudos recentes, incluindo Schwartz *et al.* (2022), Pandya, Gontia e Parmar (2022), Bayissa *et al.* (2019) e Guillory *et al.* (2023).

Diante desse contexto, o objetivo principal deste estudo é desenvolver um CDI como um instrumento efetivo para o monitoramento de secas, visando subsidiar a gestão de recursos hídricos. Esse instrumento servirá como produto de apoio ao Monitor de Secas do Brasil, um processo mensalmente realizado que tem a Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) como instituição central, sendo apoiado pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) e que teve início em 2014.

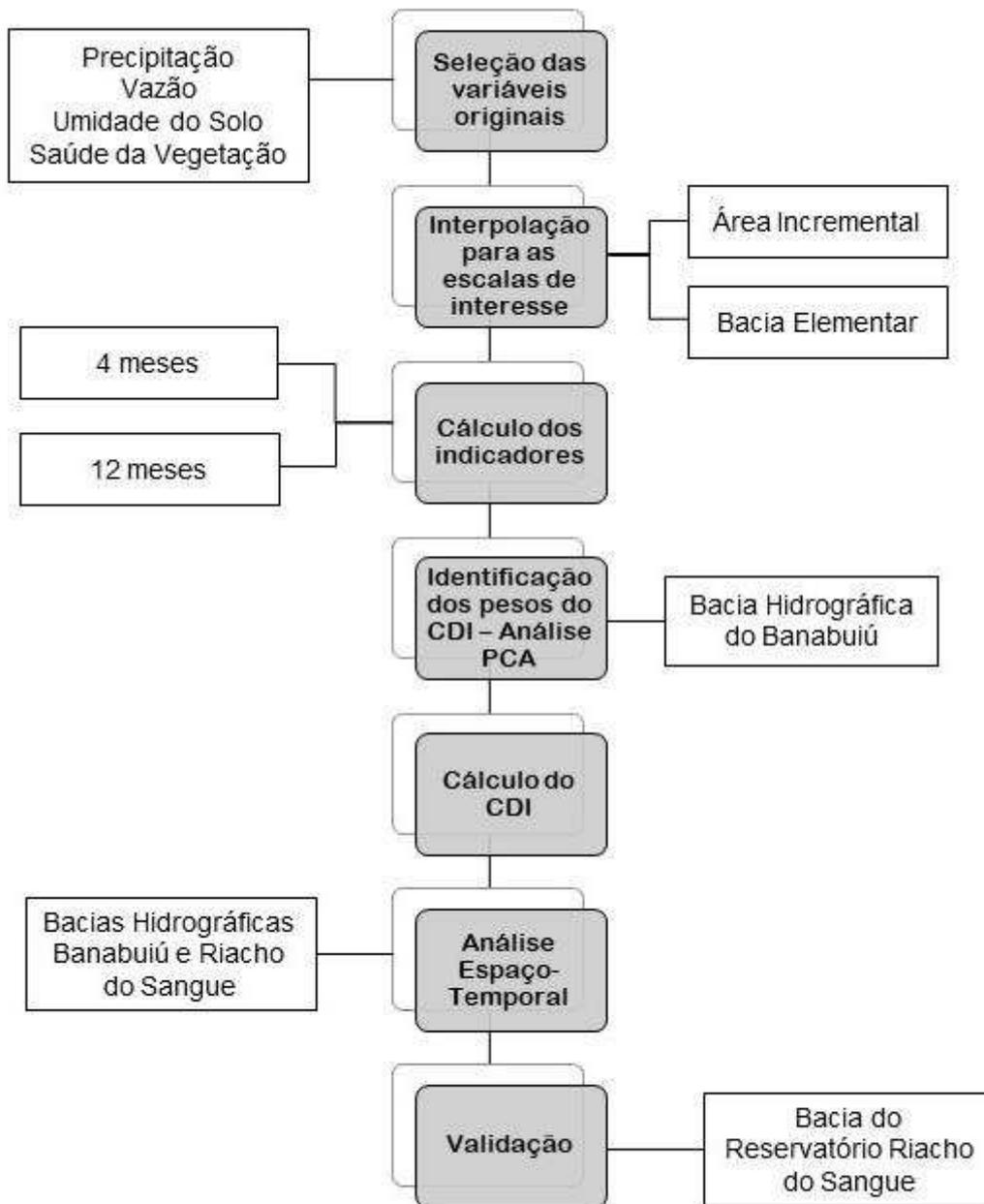
## **2.2 Metodologia**

A metodologia adotada para este estudo envolveu uma série de etapas concebidas para desenvolver e validar o CDI. A abordagem adotada possui os seguintes passos e o fluxograma das etapas metodológicas pode ser visualizado na Figura 1:

1. Escolha das variáveis para representar diferentes dimensões das secas;

2. Interpolação das variáveis nas escalas espaciais de interesse;
3. Ajuste das variáveis interpoladas para escalas temporais para refletir as dinâmicas de curto e médio prazo das secas e cálculo dos indicadores padronizados a partir dos dados das variáveis nas escalas temporais e espaciais de interesse;
4. Utilização da PCA para identificar as componentes que capturam a maior variância nos dados, assim como a determinação dos pesos dos indicadores;
5. Cálculo do CDI com base nos pesos obtidos;
6. Análise da distribuição espaço-temporal da seca;
7. Análise de correlação do índice composto com indicadores de impactos das secas, isto é, as perdas na produção agrícola e a redução na produção de aporte aos reservatórios, permitindo verificar a aplicabilidade do CDI em capturar a dinâmica da seca na bacia.

Figura 1 - Etapas metodológicas para a composição e validação do CDI



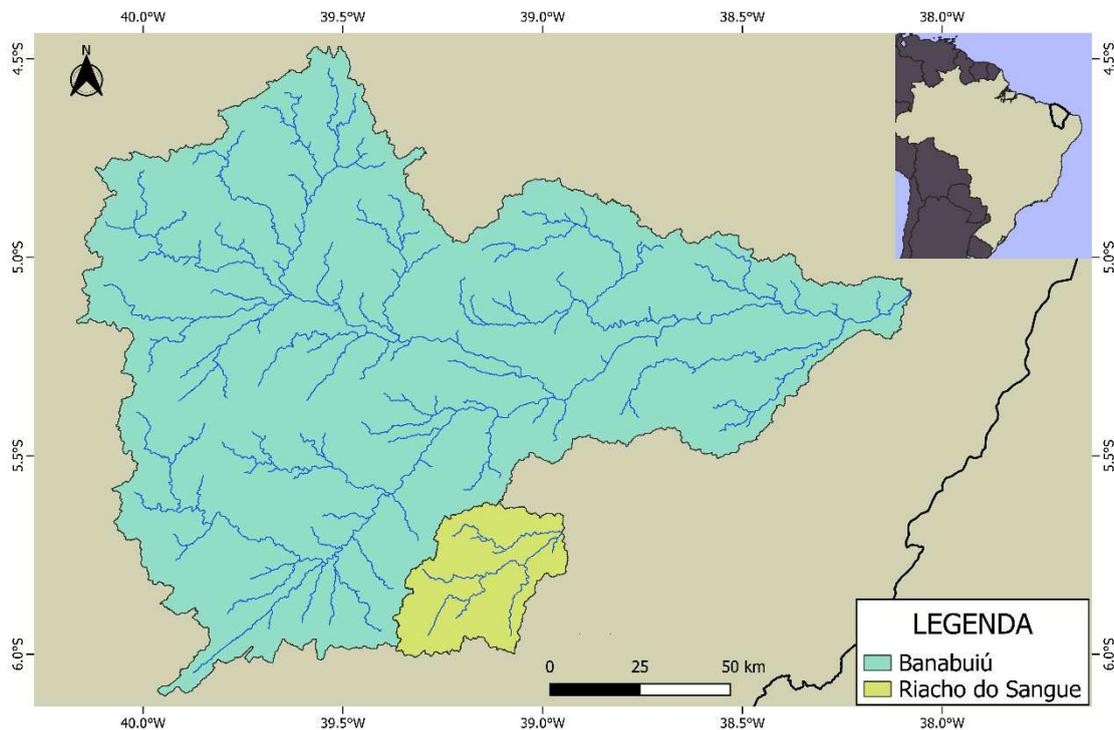
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

### 2.2.1 Área de estudo e impactos das secas

As Bacias Hidrográficas do Banabuiú e do Riacho do Sangue, ambas situadas no estado do Ceará, na região Nordeste do Brasil (Figura 2), são caracterizadas por um clima semiárido, com altíssima variabilidade interanual, períodos de estiagem prolongados e chuvas

irregulares. A precipitação anual nessas áreas varia entre 600-800 mm, concentrando-se principalmente entre os meses de fevereiro e maio (Funceme, 2023). Aliado a isto, tem-se solos rasos com embasamento cristalino predominante e evaporação anual altamente elevada (acima de 1.500 mm) nessas bacias, o que implica na intermitência dos seus rios. Estas condições representam um desafio enorme à gestão dos seus recursos hídricos (Ceará, 2009).

Figura 2 - Localização das Bacias Hidrográficas do Banabuiú e do Riacho do Sangue



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A Bacia Hidrográfica do Banabuiú estende-se por aproximadamente 19.650 km<sup>2</sup>, englobando 15 municípios. O rio Banabuiú, com um percurso de 314 km, desempenha um papel central no sistema hídrico da bacia, sendo vital tanto para o abastecimento de água quanto para o suporte das práticas agrícolas locais. Além disso, a bacia se caracteriza pela presença de uma rede complexa de afluentes e uma rede de reservatórios estratégicos, os quais desempenham um papel importante no balanço entre oferta e demanda a eles associados, especialmente em períodos de escassez de chuvas (Ceará, 2009).

Contígua à Bacia do Banabuiú, com áreas a leste e ao sul desta, a Bacia do Reservatório Riacho do Sangue ocupa uma área de cerca de 2.204 km<sup>2</sup> e faz parte da região hidrográfica de planejamento do Médio Jaguaribe. Esta sub-bacia é importante contribuinte ao

Açude Castanhão, o maior reservatório do estado e um dos maiores reservatórios da região. O Riacho do Sangue, com nascentes situadas em altitudes de aproximadamente 380 m, estende-se por cerca de 100 km até sua confluência ao Açude Castanhão (Ribeiro Neto *et al.*, 2022; Mesquita *et al.*, 2022).

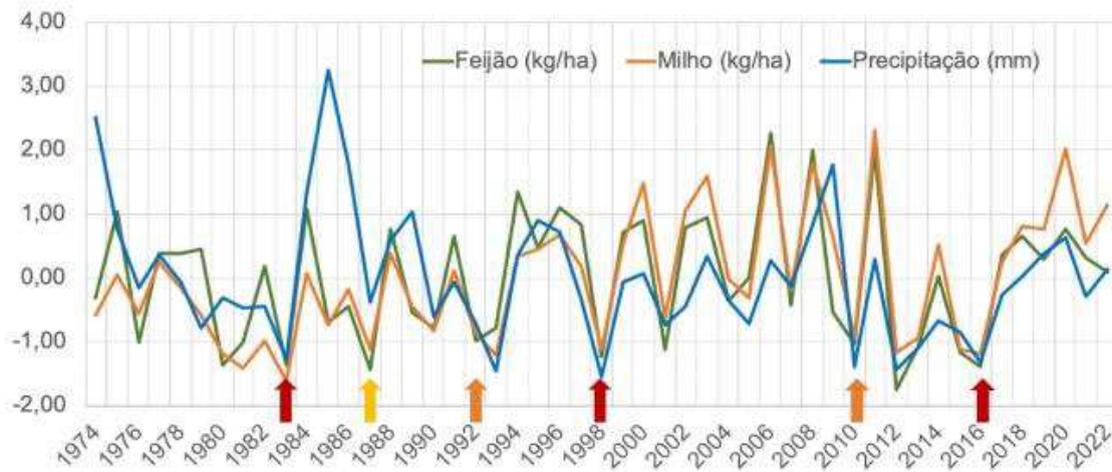
As afluições aos reservatórios nas regiões supracitadas são fundamentais para o abastecimento de água para diversas atividades, incluindo a irrigação e a indústria. Durante a última seca severa, entre 2012 e 2017, a região enfrentou uma redução drástica nos volumes dos reservatórios destas duas bacias, resultando em níveis críticos nestes reservatórios e afetando gravemente o abastecimento de água para consumo humano e atividades econômicas essenciais (Kchouk *et al.*, 2023; Brasil; Medeiros, 2020).

Essa seca multianual, além dos impactos supracitados, acarretou impactos significativos para a agricultura de sequeiro, uma prática que depende exclusivamente das chuvas e uma atividade econômica predominante nas áreas supracitadas. Essa forma de cultivo enfrentou desafios notáveis devido à escassez de precipitações durante este período. Em particular, a produção de milho, uma cultura tradicionalmente cultivada entre os meses de fevereiro e maio no Ceará, sofreu impactos severos devido, em particular, ao seu ciclo de cultivo mais longo quando comparado com outras culturas (e.g., feijão).

Estudos, como os de Alencar *et al.* (2019) e Pereira *et al.* (2015), ressaltam uma forte relação entre os padrões climáticos e a produtividade agrícola. Na área de estudo, a ocorrência de Eventos de *El Niño*, associados ao aquecimento das águas do Pacífico Equatorial, podem promover, dependendo da intensidade deste aquecimento, uma circulação atmosférica de grande escala que pode produzir ou intensificar a condição de seca no Norte do Nordeste Brasileiro, e resultar em impactos substanciais sobre a agricultura de sequeiro. Esses fenômenos alteram os padrões normais de precipitação e temperatura, levando a períodos de escassez hídrica que comprometem a produtividade das culturas (Nóia Júnior; Sentelhas, 2019).

A Figura 3 apresenta as anomalias padronizadas dos rendimentos das culturas de feijão e milho no Ceará, assim como as anomalias de precipitação, indicando a redução dos mesmos em resposta às baixas precipitações, especialmente durante eventos de *El Niño* (*El Niños* moderado, moderado a forte e forte estão indicados por setas amarela, laranja e vermelha, respectivamente). Esse gráfico reforça a estreita relação entre clima e agricultura, com períodos de déficit hídrico correlacionando-se diretamente com quedas no rendimento agrícola.

Figura 3 - Anomalias padronizadas do rendimento de feijão e milho e de precipitação no período de 1974 a 2022, as setas indicam eventos de *El Niños*



Fonte: Funceme, 2023.

### 2.2.2 Indicadores de seca baseados em variáveis hidrometeorológicas

A composição do CDI neste estudo foi baseada na seleção de variáveis hidrometeorológicas que capturam diversas dimensões das secas e no cálculo de indicadores a partir delas. As variáveis escolhidas, relacionadas à precipitação, vazão, saúde vegetal e umidade do solo, têm, conforme Ji Tao *et al.* (2018), forte relação com os impactos da seca. Elas foram obtidas de diferentes fontes, incluindo redes de monitoramento meteorológico, modelos físicos ou conceituais e produtos de sensoriamento remoto, apresentando heterogeneidade em termos de escalas espaciais e temporais. Isso demandou uma compatibilização de escalas, conforme detalhado na seção 2.3.

O cálculo dos indicadores parte inicialmente da identificação das distribuições estatísticas que melhores se ajustam à variável base do indicador (e.g., precipitação acumulada em 4 meses ou 12 meses), a qual podem ser variáveis diretamente advindas de redes de monitoramento, de modelos físicos ou conceituais (e.g., hidrológicos) e de produtos de sensoriamento remoto. Segundo os critérios Informação de *Akaike* (AIC) e o Teste de *Kolmogorov-Smirnov* (Khatun *et al.*, 2021), a distribuição mais adequada, para todas as variáveis analisadas, foi a distribuição *Gama*. Apesar de ter apenas 2 parâmetros, essa distribuição é versátil, permitindo modelar variáveis positivas e que apresentem assimetria, uma característica comum em muitos indicadores climáticos (Bolgov; Sarmanov, 2020).

Em seguida, foi realizado o cálculo de indicadores padronizados para permitir que dados de diferentes fontes, ou com diferentes unidades de medida, possam ser comparáveis de maneira objetiva e quantitativa. Assim, todas variáveis selecionadas ou delas derivadas foram submetidas ao processo de padronização utilizando-se da distribuição Normal Padrão. Após o ajuste da distribuição *Gama* à variável em sua escala original, é realizada a normalização dos dados (Blain; Avila; Pereira, 2018). Essa padronização é realizada por meio da inversa da distribuição normal padrão, com média 0 e variância 1. Para cada valor da variável não normalizada (escala original), identifica-se a probabilidade acumulada da distribuição *Gama* ajustada. A partir desta probabilidade acumulada, aplica-se a inversa da função acumulada da normal padrão, obtendo-se, assim, o indicador normalizado.

Por exemplo, para calcular o indicador padronizado associado ao acumulado de precipitação para o período fevereiro a maio ( $P_{FMAM}$ ), faz-se o seguinte: 1. calcula-se a série precipitação acumulada correspondente; 2. ajusta-se a distribuição *Gama* à série calculada  $\{P_{FMAM}\}$ ; 3. identifica-se, para cada valor da variável original ( $P_{FMAM}$ ), a probabilidade acumulada associada ( $Pr_{FMAM}$ ); e, 4. Calcula-se, a partir de  $Pr_{FMAM}$ , a inversa da função acumulada da Normal padrão, ou seja, o valor do indicador padronizado SPI4. A Tabela 1 relaciona os indicadores, as variáveis originais selecionadas e as respectivas escalas de fontes de dados.

Tabela 1 – Indicadores e variáveis utilizadas na composição do CDI

Indicador	Variável original	Aspecto da seca	Escala espacial e temporal da variável original	Fonte dos dados
SPI (Standardized Precipitation Index) - McKee <i>et al.</i> (1993).	Precipitação	Secas meteorológicas	0,15°, diária	FUNCEME
SRI (Standardized Runoff Index) - Shukla e Wood (2008).	Vazão	Secas hidrológicas	Bacias elementares (área média de 68 km <sup>2</sup> ), diária	Modelo MGB (Modelo de Grandes Bacias)
VHI (Vegetation Health Index) - Kogan <i>et al.</i> (2012).	Saúde da vegetação	Impacto na produtividade agrícola	0,03°, semanal	STAR - Global Vegetation Health Products
SMI (Soil Moisture Index) - Climate Data Store (CDS).	Umidade do solo	Impacto na produtividade agrícola	0,25°, mensal	Climate Data Store (CDS) da European Space Agency (ESA)
Dry Spell Index (DSI) – Sun <i>et al.</i> (2005).	Precipitação	Quantificação de sequências de dias secos	0,15°, diária	FUNCEME
Wet Spell Index (WSI) - Sun <i>et al.</i> (2005).	Precipitação	Quantificação da continuidade das precipitações	0,15°, diária	FUNCEME

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A seguir são apresentados, em maior detalhe, os indicadores derivados a partir das variáveis hidrometeorológicas.

#### *2.2.2.1 Indicador de Precipitação Padronizado (SPI)*

O Indicador de Precipitação Padronizado (SPI), recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO), é reconhecido por capturar a severidade de uma seca meteorológica. Por ser padronizado, ele permite comparar as condições de severidade de seca em diferentes locais, o que é um fator importante dada a natureza relativamente variável do conceito de seca. Este indicador, proposto por McKee *et al.* (1993), parte dos dados pluviométricos acumulados em janelas temporais móveis. Valores positivos do SPI indicam desvios positivos em relação à média (excesso), enquanto valores negativos apontam desvios negativos (escassez). O SPI pode ainda ser calculado em diferentes escalas temporais (p.e., SPI4, SPI6, SPI12, SPI24 etc.), em função da extensão, em número de meses, usada na acumulação dos valores de precipitação para os quais se deseja calcular.

#### *2.2.2.2 Indicador de Escoamento Padronizado (SRI)*

Inspirado no SPI, o Indicador de Escoamento Padronizado (SRI) foi desenvolvido para avaliar secas hidrológicas. A metodologia de cálculo do SRI é a mesma do SPI, distinguindo-se apenas pelo fato de serem utilizados dados de escoamento superficial ao invés de dados de precipitação. Este indicador é particularmente adequado em análises voltadas a bacias hidrográficas, onde o comportamento do escoamento é influenciado tanto pela capacidade de armazenamento do solo quanto pela resposta à variabilidade climática. Estudos de Dikici (2020) e Veetil *et al.* (2020) destacam a relevância do SRI na análise hidrológica, sublinhando sua aplicabilidade em diferentes contextos geográficos.

#### *2.2.2.3 Indicador de Saúde Vegetal (VHI)*

O Indicador de Saúde Vegetal (VHI), derivado de dados de sensoriamento remoto, é utilizado na avaliação do estado da vegetação e no monitoramento de secas. Este indicador, que sintetiza variáveis biofísicas (e.g., fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida, fAPAR), é composto por dois subindicadores: Condição da Vegetação (VCI) e o de Condição Térmica (TCI) (Kogan *et al.*, 2012). Estes subindicadores avaliam a umidade e o estresse

térmico nas plantas, respectivamente, impactando diretamente na produtividade agrícola, como demonstrado em estudos de Li *et al.* (2020) e Hu *et al.* (2020).

Além de sua aplicação em previsões de rendimento agrícola e análises de propagação de doenças, a robustez do VHI é reforçada pelo uso de séries temporais e dados de alta resolução espacial de sensores como o NOAA-AVHRR, geridos pelo *Centre for Satellite Applications and Research* (STAR) da NOAA (Kogan, 1997; Zuhro; Tambunan; Marko, 2020). Uma vez obtido a série de VHI, ajusta-se uma distribuição Gama de dois parâmetros para a escala temporal de interesse (e.g., 4, 12 meses), semelhante ao processo feito para o indicador SPI.

#### 2.2.2.4 Indicador de Umidade do Solo (SMI)

O Indicador de Umidade do Solo (SMI) neste estudo foi calculado usando dados de umidade do solo do *Climate Data Store* (CDS) da *European Space Agency* (ESA), cobrindo uma camada superficial de 2 a 5 cm de profundidade. A análise feita pela ESA utilizou técnicas de sensoriamento remoto passivo e ativo, integrando dados de radiômetros e instrumentos como SAR e dispersômetros (Copernicus Climate Change Service, 2023). A escolha da versão combinada do produto CDS permitiu uma estimativa da umidade do solo, dado importante para análises de secas, com ponderação baseada na relação sinal-ruído (SNR). Esta abordagem é apoiada por estudos recentes, garantindo a precisão e abrangência dos resultados (Dorigo *et al.*, 2017; Gruber *et al.*, 2019). O processo de padronização, como realizado para o VHI, foi também aplicado a este indicador.

#### 2.2.2.5 Indicador de Períodos Secos (DSI) e Indicador de Períodos Úmidos (WSI)

O Indicador de Períodos Secos (DSI) é uma métrica usada para monitorar a escassez hídrica, identificando sequências de dias consecutivos sem precipitação significativa, em geral, menor do que 2 mm. A definição de um limiar de precipitação é um aspecto chave para diferenciar dias secos de úmidos, com metodologias variando entre estudos. Algumas pesquisas utilizam limiares fixos, enquanto outras adotam valores adaptados espacialmente, baseando-se em percentis ou médias diárias de precipitação (Agbazo *et al.*, 2021; Rivoire *et al.*, 2019). Assim, o indicador foi definido conforme a Equação 1 (Sun *et al.*, 2007):

$$DSI \text{ ou } WSI = \sum_{i=1}^n L_i W_i \quad (1)$$

Em que  $L_i$  é a duração do  $i$ -ésimo período seco e  $W$  é uma função de  $L_i$

$$W_i = \begin{cases} 1 & \text{para } L_i < 10 \\ 5 & \text{para } L_i \geq 10 \end{cases}$$

O  $L_i$  é definido como três ou mais dias consecutivos com precipitação diária inferior a 2 mm. O peso  $W$  é baseado na duração dos períodos de seca ( $L_i$ ). Para episódios com períodos de seca não superiores a 10 dias, é definido um peso igual a um, enquanto para períodos maiores é definido um peso maior (5) devido às maiores perdas associadas a condições de seca prolongada (Sun *et al.*, 2007).

O Indicador de Períodos Úmidos (WSI) é uma métrica desenvolvida para quantificar a continuidade das precipitações em uma determinada região. Esse indicador é calculado identificando-se os períodos úmidos, que são definidos como sequências de dias consecutivos nos quais a precipitação excede um limiar pré-estabelecido. Este limiar é selecionado com base nas características climáticas específicas da região em estudo e pode variar conforme o contexto e os objetivos da análise (Chaudhary; Dhanya; Vinnarasi, 2019).

Neste estudo, adotou-se um limiar de 10 mm de precipitação diária para definir um dia como úmido, uma escolha que reflete as características hidrometeorológicas distintas das regiões semiáridas analisadas. Nessas áreas, a precipitação é menos frequente e mais variável, tornando um limiar mais elevado mais representativo das condições locais (Mathlouthi, Lebdi, 2021). Assim, dias com precipitação acima desse limiar são classificados como úmidos. Para aprofundar a análise, períodos úmidos ou secos que se estendem por mais de dez dias consecutivos recebem pesos adicionais, realçando a importância desses eventos na análise dos padrões de precipitação na região estudada. Assim, o índice de dias úmidos foi definido conforme a Equação 1.

A duração dos períodos úmidos de uma estação foi definida como três ou mais dias consecutivos com precipitação diária superior a 10 mm. Um peso maior é dado aos períodos úmidos com duração de pelo menos 10 dias para manter a consistência com a definição do índice de seca (Sun *et al.* 2007). O processo de padronização, como realizado para o VHI e o SMI, foi também aplicado a estes indicadores (DSI e WSI). Ao referir-se a todos os indicadores neste trabalho, considera-se a versão normalizada dos mesmos.

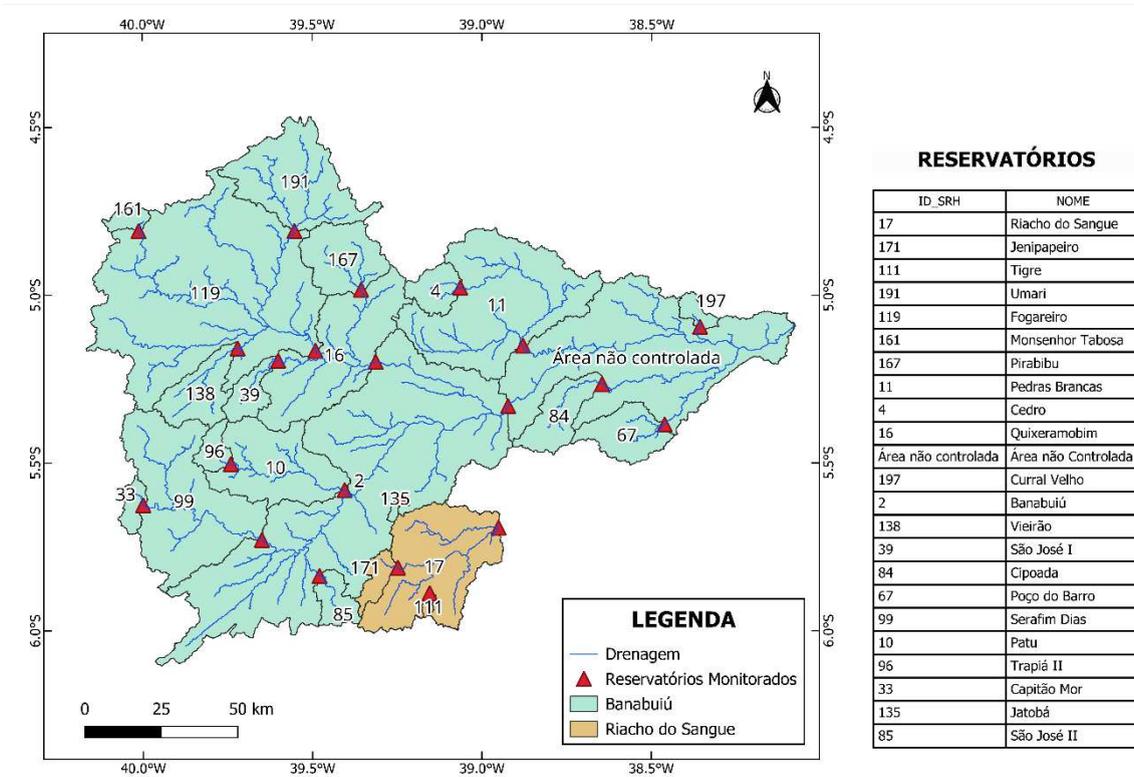
### 2.2.3 Escalas de análise

### 2.2.3.1 Escalas espaciais

Tendo em vista as diferentes escalas espaciais dos indicadores utilizados, foi necessário realizar um ajuste do conjunto de dados para as escalas de interesse para viabilizar a comparação, composição e validação do CDI. As variáveis hidroclimáticas que originam os indicadores foram interpoladas utilizando o método de Diagrama de *Voronoi* (Di *et al.*, 2020). A exceção ocorre para os dados de vazão, uma vez que essa variável, que origina o SRI, já está na escala de bacia, com vazão calculada através do modelo hidrológico, não demandando interpolação. As escalas de interesse foram adaptadas nas seguintes etapas: (i) identificação dos pesos dos indicadores, (ii) análise da distribuição espacial da seca e (iii) validação do CDI.

Para a identificação dos pesos atribuídos a cada indicador na composição do CDI foram utilizadas como unidades espaciais as áreas incrementais dos reservatórios, monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (Cogerh). A área incremental é definida aqui como a área de contribuição de escoamento para um reservatório, independente de reservatórios a montante. É relevante mencionar que as áreas incrementais dos reservatórios da Bacia do Riacho do Sangue não foram consideradas na identificação dos pesos, uma vez que essa região foi usada para a validação dos pesos obtidos para a Região Hidrográfica do Banabuiú. Detalhes desta delimitação podem ser encontrados na Figura 4.

Figura 4 – Áreas incrementais dos reservatórios monitorados na Região Hidrográfica do Banabuiú e Bacia do Reservatório Riacho do Sangue. A numeração no centro das áreas representa o identificador dos reservatórios.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

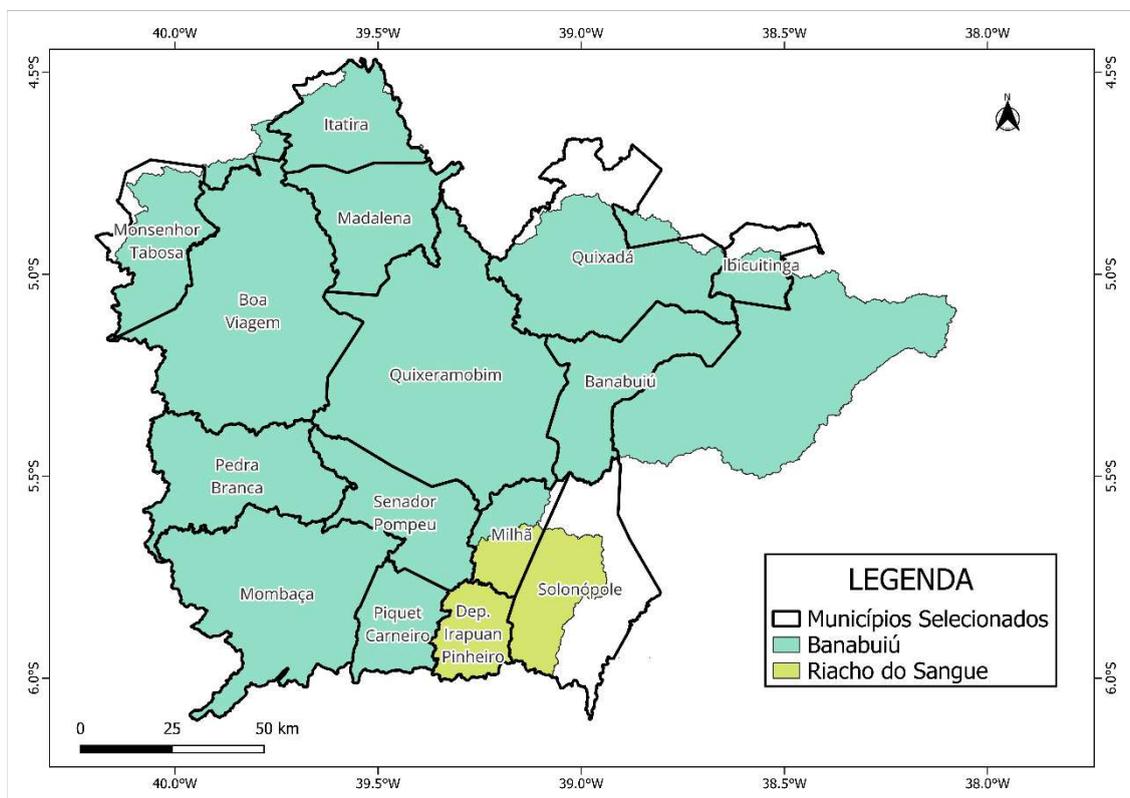
A escolha da escala de áreas incrementais para a determinação dos pesos justifica-se pela importância de manter um equilíbrio entre as dimensões espacial e temporal na análise PCA, que considerou simultaneamente ambas as escalas. Com a análise abrangendo 22 anos e 19 bacias hidrográficas, é essencial que as escalas de tempo e espaço sejam tratadas considerando adequadamente as interações entre essas duas variáveis, uma vez que se considerou na análise a variabilidade dos indicadores no tempo e no espaço simultaneamente.

Na etapa de avaliação da distribuição espacial das diferentes categorias de seca, utilizaram-se os dados interpolados para escala de bacia elementar do modelo hidrológico semi-distribuído, com tamanho médio de 68 km<sup>2</sup>. Essas bacias, que correspondem à área de contribuição para cada segmento de drenagem, estão relacionadas à discretização no Modelo de Grandes Bacias (MGB). Os dados hidroclimáticos interpolados para as bacias elementares foram ponderados com os pesos identificados na etapa anterior para a avaliação do CDI nessa escala. Essa abordagem foi escolhida estrategicamente para utilizar a distribuição espacial

fornecida pelo modelo hidrológico.

A escolha da escala de bacia elementar para avaliar o CDI baseou-se na constatação de que as dimensões das áreas incrementais dos reservatórios muitas vezes ultrapassam os limites municipais (Figura 5), os quais serão importantes na etapa de validação. Ao realizar a espacialização da seca a partir das bacias elementares permite-se uma análise espacial mais detalhada, isto é, em escalas geográficas menores.

Figura 5 - Mapa de municípios selecionados para validação do CDI



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Posteriormente, realizou-se a reagregação dos dados para a escala municipal, onde são disponíveis dados de produtividade e perdas agrícolas, que quantificam o impacto das secas e que foram utilizados para validar o CDI. Para a reagregação na escala municipal, foi realizado o cálculo da média ponderada dos valores do CDI de cada bacia elementar, considerando as proporções das áreas que cada uma ocupa dentro dos municípios. Uma segunda validação foi realizada na escala de bacias incrementais, usando dados de aporte aos reservatórios.

### *2.2.3.2 Escalas temporais*

Após adaptar os dados às escalas espaciais, procedeu-se o ajuste para as escalas temporais de 4 e 12 meses, utilizando janelas móveis para avaliar a evolução e a variabilidade das secas nessas escalas. Estudos recentes, destacam a importância de analisar as secas em múltiplas escalas temporais (Mathbout *et al.*, 2018; Aghakouchak *et al.*, 2020). Esta abordagem multiescala é importante para compreender os efeitos variados das secas em diferentes sistemas, incluindo meteorológicos, agrícolas, hidrológicos e ecológicos. Foi observado que diferentes setores da sociedade respondem de maneira diversa a períodos de escassez. Setores abastecidos por reservatórios plurianuais, por exemplo, mostram maior resiliência, suportando secas mais longas, que podem durar mais de um ano. Em contraste, setores ligados à agricultura de sequeiro são impactados diretamente pela escassez de precipitação e umidade no solo em períodos mais curtos.

Considerando os usos da água na área de estudo, a escala de 4 meses foi adotada para avaliar as secas de curto prazo, que podem ter impactos diretos na agricultura de sequeiro. Durante este período, a redução da precipitação pode acarretar perdas significativas na produção agrícola e, conseqüentemente, na economia local. Por outro lado, a escala de 12 meses foi utilizada para a análise das secas de médio prazo, cujos efeitos são mais perceptíveis nos estoques de reservatórios. As análises nessas escalas de 4 e 12 meses originaram, respectivamente o CDI-4 e o CDI-12.

### *2.2.4 Análise de Componentes Principais e composição dos pesos do CDI*

No desenvolvimento do CDI para este estudo, a técnica de Análise de Componentes Principais (PCA) foi empregada para determinar os pesos dos indicadores individuais. A PCA é reconhecida por sua eficiência na redução da dimensionalidade dos dados, identificando as componentes que explicam a maior parte da variância dos dados (Anowar; Sadaqui; Selim, 2021). A PCA foi aplicada ao conjunto de indicadores variando mês a mês e entre bacias incrementais na Bacia Hidrográfica Banabuiú com o objetivo de analisar toda a variância, considerando a correlação espaço-temporal entre eles.

Isso possibilita a alocação de pesos baseada na relevância de cada indicador, uma abordagem fundamental para a análise integrada das condições de seca (Pandya; Gontia; Parmar, 2022; Bayissa *et al.*, 2019). Na realização deste estudo, a análise PCA foi conduzida considerando as séries temporais mensais tanto nas janelas 4 meses quanto nas de 12 meses,

abrangendo um período de janeiro de 1998 a dezembro de 2020, período em comum entre os dados das variáveis, permitindo assim uma avaliação abrangente das condições de seca em diferentes escalas temporais. É importante destacar que, devido ao período limitado dos dados das variáveis originais, a validação espacial foi realizada para a Bacia do Reservatório Riacho do Sangue.

Os coeficientes da primeira componente principal (PC1) foram utilizados para determinar os pesos dos indicadores. Esta escolha foi baseada na significativa proporção da variância total capturada pelo primeiro componente, que variou entre 70 a 75%. Esta alta proporção indica que o primeiro componente principal foi capaz de capturar a combinação linear das variáveis originais que melhor explica a variação total nos dados (Kherif; Latypova, 2020).

Após a identificação dos componentes principais, a análise se concentrou nos coeficientes associados a cada um, revelando a influência relativa de cada indicador hidroclimático no comportamento do componente principal. O procedimento subsequente foi a padronização dos pesos dos indicadores, em que foi feito dividindo a contribuição de cada indicador para a PC1 pelo módulo da soma de todas as contribuições dos indicadores. Dessa forma, gerando os coeficientes abaixo. Este processo garantiu que os pesos fossem proporcionais e comparáveis. A formulação do CDI em ambas as escalas segue a mesma estrutura básica (Equação 2):

$$\begin{array}{l} CDI - 4 \\ \text{ou} \\ CDI - 12 \end{array} = a * SPI + b * SRI + c * VHI + d * SMI + e * DSI + f * WSI \quad (2)$$

Em que a, b, c, d, e, f são os pesos dos indicadores. Ainda que sigam a mesma estrutura, os pesos adotados são diferentes para o CDI-4 e o CDI-12 em função da análise PCA em cada uma dessas escalas.

### ***2.2.5 Limiares de severidade de seca***

A classificação de severidade de secas no CDI é delineada de acordo com a metodologia utilizada pelo Monitor de Secas, como ilustrado na Figura 6. Esta figura é dividida em três colunas principais: a primeira define as categorias de severidade de secas; a segunda associa estas categorias aos percentis correspondentes; e a terceira especifica os limiares do

CDI para cada nível de severidade. Os limiares do CDI foram estabelecidos com base em uma distribuição normal padrão, com média 0 e desvio padrão de 1, refletindo a padronização prévia dos dados utilizados na composição desse índice.

Figura 6 - Classificação da severidade da seca

Categorias de Severidade da Seca	Limiares Percentis	Limiares CDI
Fraca	20 a 30	-0.52 a -0.84
Moderada	10 a 20	-0.84 a -1.28
Grave	5 a 10	-1.28 a -1.64
Extrema	2 a 5	-1.64 a -2.05
Excepcional	$\leq 2$	$\leq -2.05$

Fonte: Elaborado pela autora baseado no Monitor de Secas, 2024.

### 2.2.6 Validação

A fim de permitir uma validação do CDI, os pesos determinados para os indicadores na região do Banabuiú, foram aplicados na Bacia do Reservatório Riacho do Sangue. A aplicação dos pesos do CDI, obtidos para a Bacia do Rio Banabuiú, na Bacia do Reservatório Riacho do Sangue justifica-se por duas razões. Primeiramente, a série disponível para cálculo dos indicadores tem comprimento de 23 anos para calibração e validação, tendo neste período uma seca severa multianual de 8 anos de duração na região de estudo. Assim, a calibração e/ou validação seriam seriamente impactadas por esta seca. Finalmente, permitirá avaliar a hipótese de que as variações capturadas pelos pesos do CDI são também representativas para outras áreas que compartilhem características hidro meteorológicas semelhantes.

Nesta etapa de validação, CDI-4 e CDI-12 foram comparados com indicadores de impacto das secas. As séries de CDI-4, calculadas ao nível municipal, para o mês de maio foram correlacionadas com a partir dos dados de perdas percentuais na produção, em relação ao que foi plantado em cada ano, de milho por município entre 2009 e 2020 (Dados da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Ceará - EMATERCE).

A escolha do milho como indicador se justifica pela sua importância econômica nas regiões de estudo e sua sensibilidade às variações climáticas, especialmente em períodos de seca (Pereira *et al.*, 2015; Cavalcante *et al.*, 2022). É importante destacar que, nesta análise,

foram consideradas exclusivamente as perdas de milho de sequeiro, uma vez que esta modalidade de cultivo é altamente dependente das condições climáticas, sendo diretamente afetada pelas variações de precipitação e umidade do solo. Esta especificidade é importante para a validação do CDI-4, pois reflete de maneira mais direta o impacto das variações climáticas sobre a produção agrícola, fornecendo uma medida precisa do efeito das secas sobre culturas dependentes exclusivamente das condições naturais de precipitação.

A série do CDI-12 para o mês dezembro foi correlacionada com dados de aporte aos reservatórios fornecidos pela COGERH com período de 1998 a 2020. Dessa forma, pode-se analisar a janela de janeiro a dezembro, representando as condições de seca ao término do ano. Em ambas as escalas temporais, aplicou-se o índice de correlação de Pearson (Cleophas *et al.*, 2018) entre os dados do CDI e os usados para a validação. Esta análise permite avaliar a relação entre o CDI e os impactos observados tanto na produção agrícola quanto nos aportes aos reservatórios, fornecendo uma medida estatística sobre a eficácia do CDI em capturar as dinâmicas de seca nas regiões estudadas.

## 2.3 Resultados

### 2.3.1 Análise multivariada

A aplicação da análise PCA neste estudo forneceu uma avaliação estatística sobre a influência de vários indicadores hidrometeorológicos nas condições de seca, considerando duas escalas temporais: 4 meses (CDI-4) e 12 meses (CDI-12). Na escala de 4 meses, a PCA destacou a precipitação, representada pelo SPI, com um autovetor de 0.49. Este valor positivo elevado destaca a precipitação como um fator determinante nas secas de curto prazo.

Em contrapartida, o DSI apresentou um autovetor negativo significativo de -0.43, indicando que a presença significativa de veranicos é inversamente relacionada à primeira componente (PC1), um resultado coerente com o que o indicador representa. Além disso, o SRI e o VHI mostraram autovetores de 0.43 e 0.42, respectivamente, evidenciando a relevância do escoamento superficial e do estado da vegetação nas condições de seca de curto prazo. O SMI com um autovetor de 0.41 complementa essa análise, fornecendo uma perspectiva adicional sobre a contribuição da umidade do solo na PC1.

Na escala de 12 meses, observa-se uma tendência similar. O SPI manteve sua posição como um indicador relevante, com um autovetor de 0.47. O DSI continuou a exibir um autovetor negativo (-0.42), enfatizando que períodos sem chuva são relevantes na intensificação

das condições de seca. Os autovetores do SRI (0.43), VHI (0.43) e SMI (0.38) permaneceram significativos, embora com ligeiras variações em relação à escala de 4 meses. A Tabela 2 apresenta os pesos normalizados através das contribuições supracitadas de cada indicador. Estes refletem a contribuição relativa de cada indicador na variação capturada pelo primeiro componente principal (PC1) para as escalas temporais CDI-4 e CDI-12.

Tabela 2 – Pesos dos indicadores hidroclimáticos para PC1

CDI	WSI	SPI	SRI	DSI	SMI	VHI
CDI-4	0.10	0.20	0.19	-0.18	0.17	0.16
CDI-12	0.12	0.20	0.18	-0.17	0.16	0.18

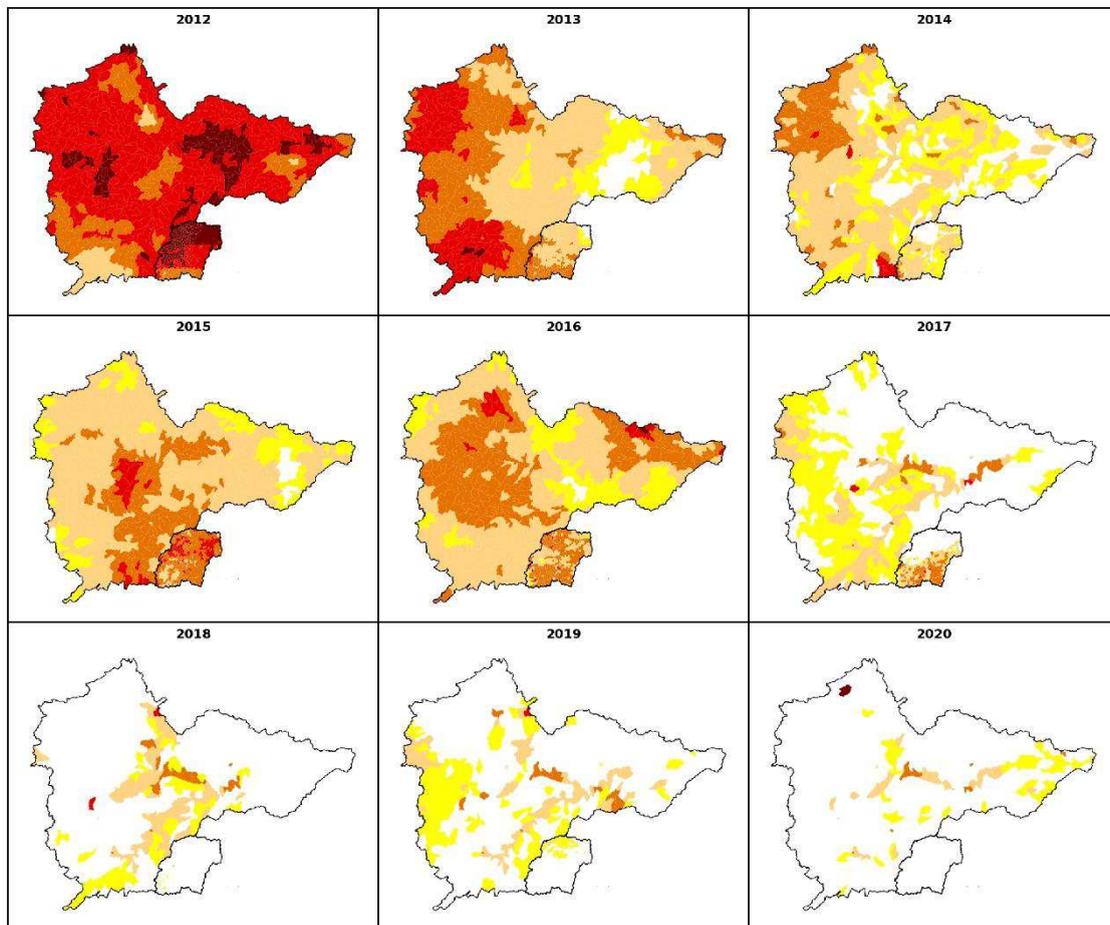
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A análise dos pesos normalizados dos indicadores hidrometeorológicos revela sua importância relativa para a primeira componente principal (PC1) em ambas as escalas temporais do CDI-4 e CDI-12. Isto demonstra uma consistência na influência relativa de cada indicador nas condições de seca, independentemente da janela temporal analisada.

### 2.3.2 Evolução espaço-temporal da severidade da seca conforme o CDI

Os mapas detalhados das Bacias Hidrográficas do Banabuiú e do Riacho do Sangue revelam padrões importantes na distribuição e severidade das condições de seca ao longo do tempo. A metodologia utilizada destaca as áreas mais atingidas, como evidenciado na Figura 7. Essa figura exhibe as alterações detectadas com o uso do CDI-4, abrangendo o período de fevereiro a maio de 2012 a 2020. Durante esse intervalo, esta região sofreu uma intensa seca que teve início em 2012 e perdurou até 2019, mas com impactos cumulativos até 2020. Os efeitos dessa seca foram amplos, afetando diversos setores, incluindo a agricultura, o setor de recursos hídricos e a economia (Pontes Filho *et al.*, 2020).

Figura 7 - Evolução espaço-temporal da severidade da seca nas Bacias Hidrográficas Banabuiú e Riacho do Sangue: 2012-2020



**CLASSIFICAÇÃO DE SEVERIDADE DA SECA**

Sem Seca Relativa	Seca Moderada	Seca Extrema	Seca Excepcional
Seca Fraca	Seca Grave		

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

No ano de 2012, há uma predominância de condições de seca grave a excepcional. Essas condições não se restringem a uma área específica, sugerindo que fatores abrangentes influenciaram a bacia como um todo (e.g., regime de precipitação). Em 2013, observa-se uma atenuação na gravidade dessas condições, com a maioria das áreas exibindo níveis moderados a graves. A melhoria nas condições de precipitação acumulada entre fevereiro e maio pode ter influenciado a mudança observada. No período de fevereiro a maio de 2012, a precipitação acumulada foi de 176.2 mm, representando um desvio de -66.4% em relação à média. Já no mesmo período de 2013, a precipitação acumulada aumentou para 314.4 mm, com um desvio de -40.1% em relação à média (Funceme, 2023).

Avançando para 2014, observa-se uma redução na área classificada com seca extrema, assim como uma diminuição nas regiões com condições graves de seca. No entanto, em 2015, houve um ressurgimento de áreas gravemente afetadas, especialmente na parte central da bacia. Isso sugere uma mudança na dinâmica das condições de seca, aparentemente migrando de montante para jusante. A pesquisa de Van Oel, Martins e Costa (2017) reforça essa tendência. Seus resultados mostraram que, a partir de 2014, ocorreu uma redução significativa no volume armazenado a jusante, o que sugere que tal mudança pode estar intensificando as condições de seca nessas regiões.

Nos anos seguintes, a extensão e a gravidade dessas condições flutuam, com 2017 apresentando uma melhora em relação a 2016. Este período é seguido por uma melhora significativa entre 2018 e 2020, caracterizada por uma redução substancial nas áreas afetadas por condições graves e extremas. Em 2020, em particular, as condições são mínimas, sugerindo um possível retorno à normalidade em termos de umidade.

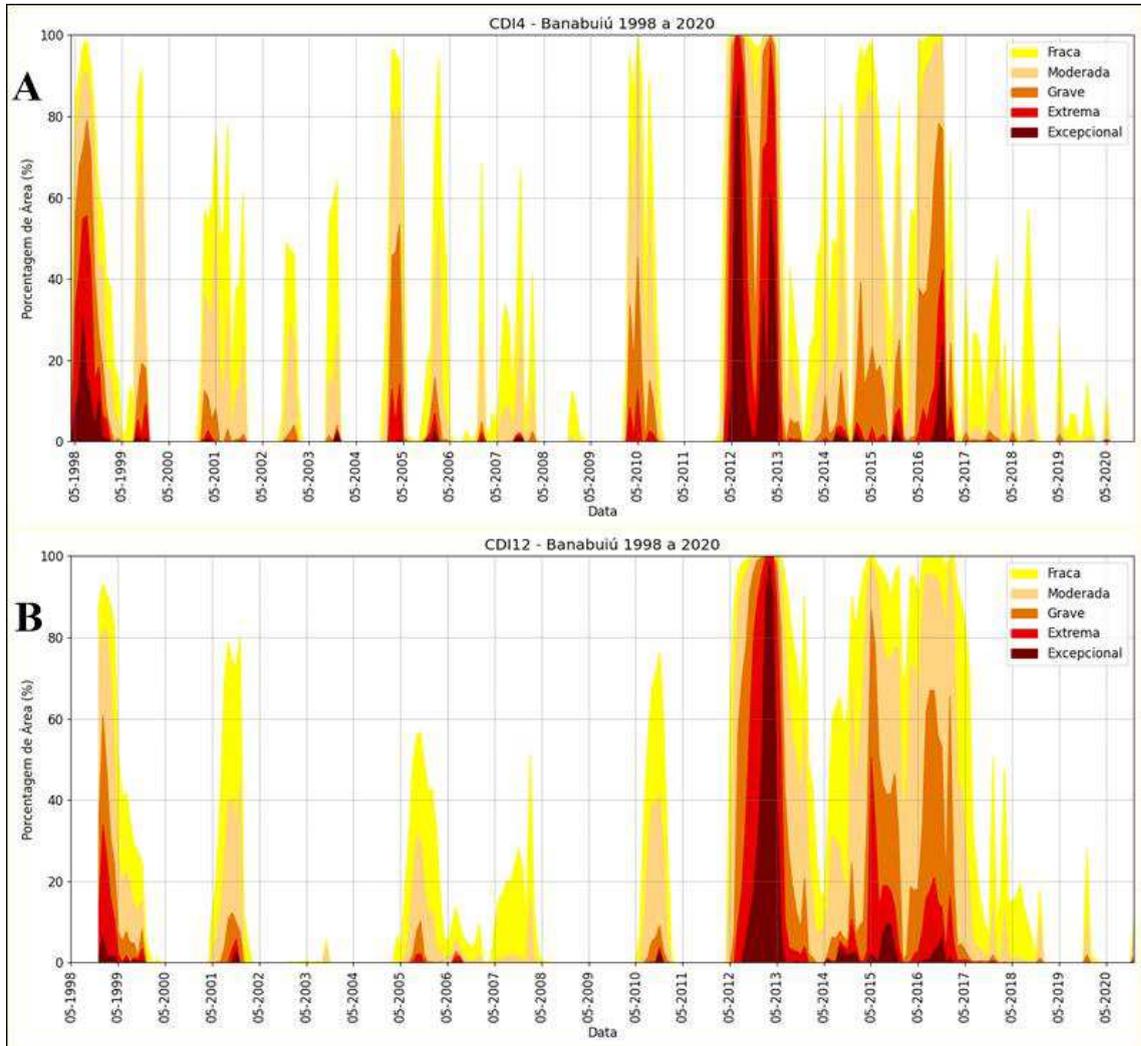
Quanto à origem e progressão desses padrões, os resultados indicam que eles não emergem de uma única fonte ou localização específica dentro da bacia. Ao contrário, parecem ser o resultado de uma combinação de fatores regionais, como padrões de precipitação e variações climáticas. O ano de 2012, por exemplo, foi marcado por uma seca generalizada, afetando a bacia como um todo, o que reforça a ideia da influência de fatores climáticos abrangentes.

A progressão desses padrões ao longo dos anos estudados não segue um modelo uniforme ou linear. Por exemplo, em 2015, observa-se um ressurgimento de condições graves, especialmente na parte central da bacia, sugerindo uma mudança na direção desses eventos. Essa variação indica que o fenômeno é dinâmico, potencialmente influenciado por uma série de fatores ambientais e climáticos interconectados. Por fim, em relação à velocidade de propagação desses padrões, os resultados sugerem que eles se manifestam como um processo gradual, evoluindo ao longo do tempo, ao invés de ocorrer de maneira rápida ou abrupta. Isso é claramente evidenciado pelas flutuações na severidade e extensão observadas ao longo dos anos.

Ao analisar a área da bacia em cada categoria de severidade de seca, conforme ilustrado na Figura 8, que apresenta os gráficos CDI-4 e CDI-12 para a Região Hidrográfica Banabuiú, obtém-se uma visão da dinâmica das secas entre 1998 e 2020. Nos gráficos do CDI-4, é notável que os anos de 2012 a 2020 destacam-se pela prevalência de secas em diversas categorias, afetando uma porção substancial da bacia. Este padrão sugere uma resposta imediata e variável da região às condições climáticas de curto prazo, com flutuações significativas na

severidade da seca ao longo dos anos.

Figura 8 - Comparativo Temporal da Severidade de Seca na Bacia Hidrográfica de Banabuiú: Análise do CDI-4 (A) e CDI-12 (B) de 1998 a 2020



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Por outro lado, o gráfico CDI-12 revela um cenário de seca mais prolongado e persistente na bacia. O período de 2012 a 2020 é marcado pelo início de uma seca excepcional em meados de 2012, que se estendeu até 2017. Este período é caracterizado pela persistência de condições secas, com o ápice dessa seca sendo evidente no gráfico de 2012.

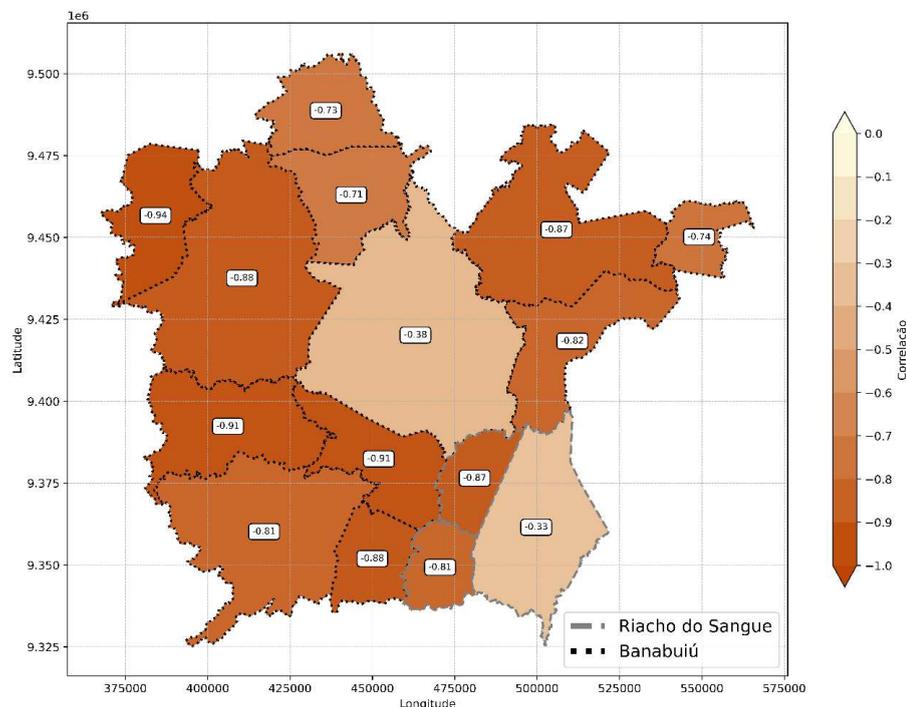
### 2.3.3 Validação do CDI

#### 2.3.3.1 Impactos na produção de milho

Nas bacias hidrográficas do Banabuiú e do Riacho do Sangue, a cultura do milho demonstrou uma sensibilidade significativa às variações nas condições de seca. A análise de correlação evidencia que valores do CDI-4 muito negativos, representativos de secas severas, estão consistentemente associados a perdas substanciais na produção do milho (kg/ha). Este padrão sublinha a vulnerabilidade do milho a períodos prolongados de escassez hídrica. A duração e o momento das condições anômalas de umidade são fatores determinantes na frequência e intensidade das anomalias de umidade e rendimento.

As áreas escuras do mapa, conforme indicado pela Figura 9, indicando correlação com valores próximos a -1, coincidem com reduções acentuadas na produção do milho. Como os valores mais negativos do CDI estão associados a secas mais intensas, é esperado que estes valores estejam associados a perdas maiores da produção de milho. Portanto, correlações negativas entre o CDI-4 e as perdas indicam que o índice de seca representa adequadamente a ocorrência de seca agrícola na escala dos municípios.

Figura 9 - Correlação entre as perdas de rendimento de milho ao nível municipal e os valores do CDI-4



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Em nenhum dos municípios ocorre correlação positiva entre o CDI-4 e as perdas de produção, com correlações inferiores a -0,7 na maior parte dos casos. As exceções são os municípios de Quixeramobim e de Solonópole, onde a correlação entre o CDI-4 e a

produtividade do milho registrou valores na faixa de -0,3 a -0,4. Estes resultados indicam uma relação menos direta entre a intensidade da seca e a produção de milho nesses locais. Essa variação na correlação pode ser explicada por diversos fatores, incluindo a diminuição na área de plantio (ha) que ocorreu durante a seca.

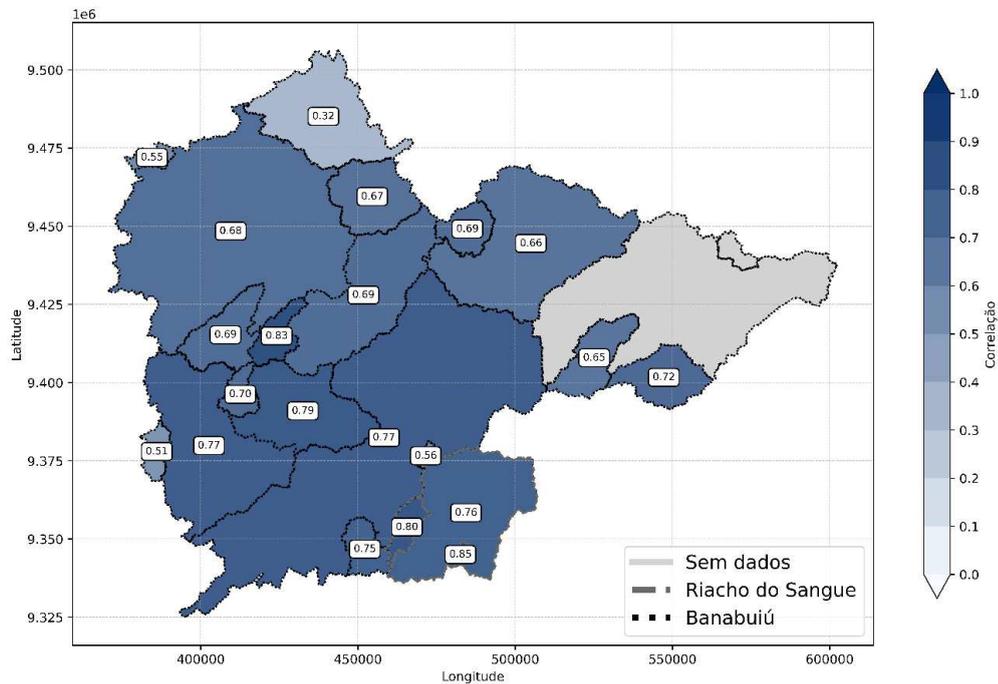
Uma hipótese relevante para explicar a variação na produtividade do milho é a influência de fatores adicionais, além das condições de seca. Aspectos como mudanças nas práticas de plantio, atividades econômicas e a implementação de subsídios municipais podem ter um papel significativo nessa variação. Esta hipótese é apoiada por um estudo da Funceme (2022), que observou resiliência na produção de milho à seca na região de Quixeramobim. Aqui, o rendimento do milho foi menos afetado, mesmo com uma redução na área de plantio de 15400 ha em 2011 para 5160 ha no início da seca em 2012. Uma tendência similar foi observada em Solonópole, onde a área de plantio diminuiu de 7000 ha em 2011 para 4117 ha em 2012. Além disso, em Solonópole, houve um aumento significativo na atividade leiteira, com o volume de leite produzido superando 20% da média.

### *2.3.3.2 Impactos no aporte aos reservatórios*

A análise dos dados de aporte mensal ( $m^3/mês$ ) aos reservatórios monitorados foi realizada em relação ao CDI para a escala de doze meses (CDI-12). Correlações positivas, que são representadas por tons mais escuros no mapa, indicam uma maior concordância entre as condições de seca, sugeridas por valores mais negativos de CDI, e a ocorrência de aportes menores. Áreas sem dados são indicadas em cinza.

Para o CDI-12, as correlações com os aportes anuais variaram entre valores de 0.76 a 0.85, conforme apresentado na Figura 10. Regiões com correlações mais expressivas indicam que, o CDI-12 reflete as condições hidrológicas de aporte ao final do ano, sugerindo que a confiabilidade do índice ao avaliar a seca de médio prazo nessas áreas específicas da bacia. Valores mais altos de correlação sugerem que o CDI-12 pode capturar as variações no aporte considerando uma escala anual. Para as bacias com menor correlação, como a de Monsenhor Tabosa, a hipótese levantada é a necessidade de calibração do modelo hidrológico, já que essa bacia não apresentou coeficientes de desempenho satisfatórios.

Figura 10 - Correlação entre o aporte aos reservatórios e os valores do CDI-12



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

## 2.4 Discussões

### 2.4.1 Versatilidade e aplicabilidade do CDI

Os resultados deste estudo apontam para a ampla aplicabilidade do CDI proposto em diferentes escalas espaciais. O índice demonstra sua relevância em distintas escalas temporais, sendo capaz de capturar a severidade de uma seca tanto no curto prazo (4 meses), quanto no médio prazo (12 meses), e conseguindo capturar a dinâmica da seca nestas escalas.

Além disso, o desenvolvimento da metodologia para determinar os pesos dos indicadores no CDI indica que estes podem ser usados para regiões com características geomorfológicas e com respostas hidrológicas similares. Esta representa uma vantagem significativa, facilitando a aplicação do CDI em diversas regiões sem a necessidade de recalibração dos pesos, desde que estas tenham um grau significativo de similaridade.

A validação do CDI, realizada através da análise de variáveis que mensuram os efeitos de secas, demonstrou sua capacidade de capturar as diversas manifestações desse fenômeno. A correlação do CDI com a redução na produção de milho e as variações no aporte aos reservatórios reforça sua aplicação como uma ferramenta suporte ao monitoramento de secas. Além disso, essa validação evidencia a capacidade do CDI de incorporar múltiplas

dimensões das secas - incluindo aspectos meteorológicos, hidrológicos, ambientais e agrícolas.

#### **2.4.2 CDI e o Monitor de Secas**

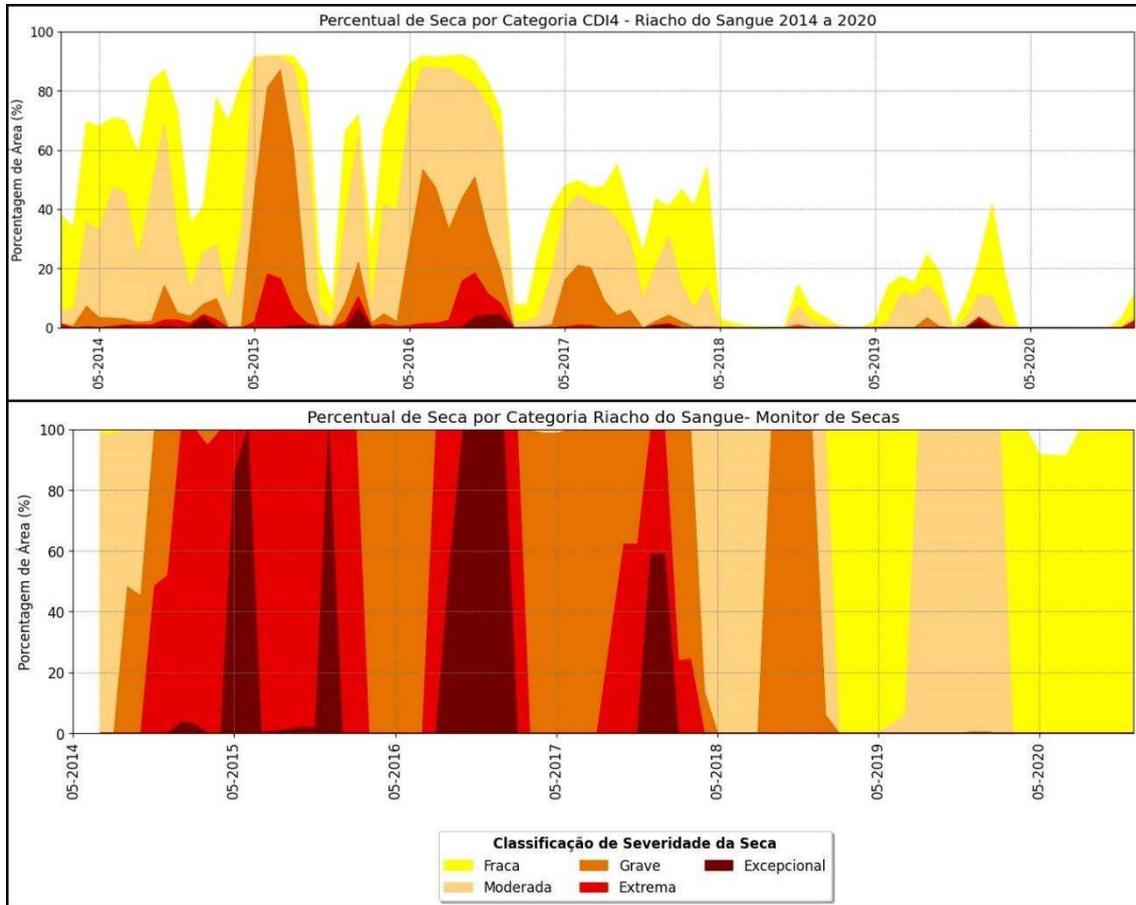
O Índice de Seca Composto (CDI) compartilha algumas semelhanças com o atual Monitor de Secas, particularmente na inclusão do SPI como um componente chave. Este indicador é essencial para ambos os sistemas, pois fornece uma medida padronizada da precipitação, permitindo uma comparação consistente das condições de seca ao longo do tempo e em diferentes regiões. No entanto, existem diferenças na abordagem e metodologia entre o CDI e o Monitor de Secas.

O Monitor de Secas utiliza três indicadores principais: o SPI, o SPEI (Indicador Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração) e o WSI. O WSI é calculado avaliando a duração dos períodos úmidos, que são definidos como sequências de três ou mais dias com precipitação acima de 10 mm (Martins *et al.*, 2015). Este indicador, o WSI, é também utilizado na composição do CDI e atua como um proxy do SRI na composição do Monitor de Secas.

Por outro lado, o CDI adota uma abordagem diferente, utilizando um modelo hidrológico semi-distribuído. Assim, o CDI oferece uma representação mais física e detalhada do escoamento, levando em conta a diversidade e as particularidades de cada região analisada. A proposta de incorporar o CDI ao sistema atual do Monitor de Secas traz uma perspectiva inovadora para o monitoramento e manejo desses eventos. O CDI pode atuar como um produto de apoio operacional automático para o Monitor de Secas, auxiliando na representação da seca em nível de municípios e na validação dessa ferramenta.

A Figura 11 ilustra o percentual da área da Bacia do Reservatório Riacho do Sangue classificada em cada nível de severidade de seca, conforme indicado tanto pelo CDI quanto pelo Monitor de Seca. A análise comparativa destaca as diferenças significativas em termos de resolução espacial e sensibilidade. O CDI se destaca por sua capacidade de oferecer uma resolução espacial mais detalhada, o que lhe permite capturar variações sutis nas condições de seca em diferentes áreas da bacia. Um exemplo claro dessa capacidade foi observado em 2017, quando o CDI conseguiu identificar áreas específicas da bacia que sofreram de condições de seca extrema.

Figura 11 - Comparação entre CDI-4 e monitor de secas na avaliação dos percentuais da área da bacia que estão em cada categoria de severidade de seca na Bacia do Reservatório Riacho do Sangue



Fonte: Elaborado pela autora baseado nos dados do Monitor de Secas, 2024.

Entre 2018 e 2020, a análise revela uma maior convergência entre as avaliações do CDI e do Monitor de Seca, sugerindo consistência na detecção de tendências de seca na bacia ao longo do tempo. É importante destacar que o Monitor de Seca abrange uma integração de indicadores que consideram períodos mais longos, não apenas 4 meses, mas também se estendendo até 12 e potencialmente até 24 meses. Esta característica sugere uma perspectiva mais ampla na avaliação das condições de seca, capturando não apenas eventos imediatos, mas também tendências de longo prazo.

Além disso, ao examinar os anos afetados pela seca de vários anos, ressalta-se que os impactos críticos desses períodos não são tão evidentes quando analisados individualmente. O que realmente amplifica a severidade da seca é a duração prolongada desses eventos. Essa observação sublinha a importância de considerar a persistência da seca, além de sua intensidade

imediate, ao avaliar seu impacto na bacia.

## 2.5 Conclusões

Esse estudo teve como objetivo a composição e a análise de um Índice de Seca Composto (CDI) para a Bacia da Região Hidrográfica do Banabuiú e do Reservatório Riacho do Sangue, regiões marcadas por um regime climático semiárido e uma histórica vulnerabilidade a secas. A partir da metodologia proposta, criou-se um instrumento de apoio ao Monitor de Secas, capaz de aprimorar o sistema de monitoramento de secas em operação no Brasil.

A Análise de Componentes Principais (PCA) demonstrou identificação e ponderação dos indicadores mais representativos na variação das condições hidrológicas das bacias estudadas. A aplicação do CDI em escalas temporais de 4 e 12 meses permitiu a captura das dinâmicas de secas de curto e médio prazo, respectivamente, refletindo as respostas diferenciadas de variáveis hidroclimáticas às secas.

A correlação do CDI com os dados de perdas de milho de sequeiro e os aportes aos reservatórios reforçou a validade do índice como um indicador das condições de seca. Os resultados evidenciaram que secas severas, particularmente na escala de 4 meses, estão diretamente associadas a perdas significativas na produção agrícola, enquanto as secas de médio prazo refletidas pelo CDI-12 são indicativas de impactos sobre os volumes dos reservatórios.

A incorporação do CDI como um produto de apoio no monitor de secas pode auxiliar a incluir a espacialização da avaliação de secas a nível municipal. Outro fator relevante é o uso de um modelo hidrológico para o cálculo do SRI. Dessa forma, permitindo uma análise espacializada da distribuição de escoamento e considerando a diversidade espacial inerente às características das bacias hidrográficas.

Complementando o atual modelo, a incorporação de indicadores adicionais relevantes, como o SPEI, pode enriquecer substancialmente a análise das secas, trazendo uma nova dimensão de compreensão integrada. Da mesma forma, contempla-se a possibilidade de expandir a aplicação do CDI para abranger escalas temporais variadas, como CDI-1 e CDI-36, o que potencialmente ofereceria uma perspectiva dos diferentes impactos da seca ao longo do tempo.

### 3 ANÁLISE DA VARIABILIDADE NAS VARIÁVEIS HIDROMETEOROLÓGICAS NA ÁREA DO RESERVATÓRIO BANABUIÚ SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

#### 3.1 Introdução

As mudanças climáticas, oriundas de alterações antropogênicas nos padrões climáticos globais, afetam profundamente setores como agricultura, biodiversidade e economia, conforme evidenciado por estudos recentes (Papalexiou; Montanari, 2019; Lu *et al.*, 2019; Zubaldi *et al.*, 2020; Gondim *et al.*, 2018). Desde 1988, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) tem sido instrumental na compilação dessas evidências através dos Relatórios de Avaliação (ARs), que detalham os impactos e propõem estratégias de mitigação e adaptação (Robinson, 2020; Borie *et al.*, 2021).

Com a introdução de dados do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6) no Sexto Relatório de Avaliação (AR6), o IPCC incorpora avanços significativos na modelagem climática. O CMIP6, trazendo uma resolução espacial mais alta e uma representação mais complexa de processos climáticos, incluindo ciclos biogeoquímicos e interações entre a atmosfera e a biosfera, permite uma análise mais precisa das dinâmicas climáticas. No AR6 destaca-se que as mudanças climáticas podem causar modificações no ciclo hidrológico, sublinhando a urgência de adotar estratégias de ação e compreensão integradas para mitigar e adaptar-se a esses impactos (Stockhause *et al.*, 2021; Grose *et al.*, 2020; Bazzanela *et al.*, 2023).

Essa necessidade é particularmente crítica em regiões semiáridas, as quais são mais vulneráveis às mudanças climáticas devido à suas características hidroclimáticas, tais, como, baixa precipitação e taxas altas de evaporação, o que as torna vulneráveis a eventos hidrológicos extremos. Pesquisas indicam que alterações nos regimes de vazão nessas áreas podem aumentar o risco de eventos hidrológicos extremos (Ramarao *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2022; Coutinho; Cataldi, 2023), tornando o uso das informações dos modelos climáticos globais (MCGs) em conjunto com a modelagem hidrológica uma ferramenta para entender e gerenciar esses riscos.

A modelagem hidrológica em regiões semiáridas pode ser feita utilizando modelos concentrados ou distribuídos. Os modelos distribuídos capturam a complexidade dos processos hidrológicos ao detalhar a heterogeneidade do uso do solo, topografia e condições climáticas, oferecendo uma precisão superior aos modelos concentrados que simplificam a bacia em uma

única unidade homogênea (Vilaseca *et al.*, 2021).

No entanto, a aplicação prática desses modelos em regiões semiáridas é limitada, com uma predominância de estudos utilizando o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), desenvolvido por Arnold *et al.* (1998). Este modelo tem sido amplamente adotado em pesquisas, como as realizadas por Wang *et al.* (2024), Chen *et al.* (2023) e Acharki *et al.* (2023), para investigar a variabilidade da vazão e os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos.

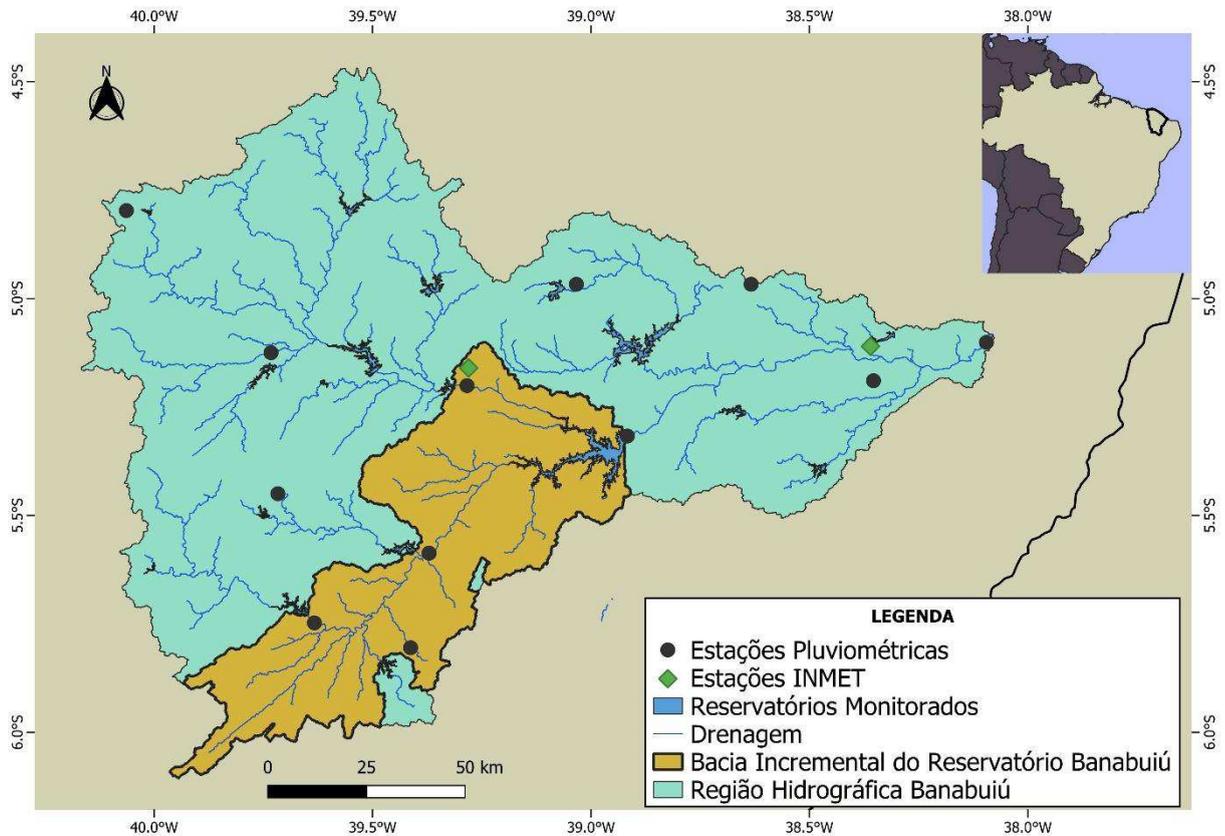
Apesar da utilidade do SWAT, identifica-se uma lacuna na aplicação de outros modelos distribuídos em regiões semiáridas utilizando dados do CMIP6. Este estudo visa explorar essa lacuna, empregando o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB), desenvolvido por Collischonn (2001), para avaliar os impactos das mudanças climáticas no regime de vazões na bacia incremental do reservatório Banabuiú, no Ceará, localizado no Nordeste Brasileiro. Tal abordagem representa uma oportunidade de pesquisa, ampliando a compreensão das dinâmicas hidrológicas em regiões semiáridas, considerando projeções de mudanças climáticas.

## **3.2 Metodologia**

### ***3.2.1 Área de estudo e dados hidrometeorológicos observados***

A bacia hidrográfica do reservatório Banabuiú tem uma área de 14,234 mil km<sup>2</sup>, e, quando descontadas as áreas controladas pelos reservatórios monitorados a montante, esta área, agora denominada área incremental do Reservatório Banabuiú, reduz-se para aproximadamente 4.4 mil km<sup>2</sup> (Ceará, 2018). Esta bacia está situada nas coordenadas de latitude 4° 25' e longitude 40° 10', conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Mapa de localização da bacia incremental do reservatório Banabuiú



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A região caracteriza-se por um clima tropical quente semiárido, com temperaturas médias anuais variando entre 26 e 28 °C (Ceará, 2009). A precipitação média anual é em torno de 700 mm acordo com dados da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme, 2023). Um déficit hídrico significativo marca a região, resultado da alta taxa de evaporação e da variabilidade espacial e temporal das chuvas. Essas condições hidroclimáticas, típicas do Ceará, influenciam a formação de rios com fluxo predominante em poucos meses durante a estação chuvosa, de janeiro a abril (Batista *et al.*, 2019).

O rio Banabuiú, que se estende por um percurso de 314 km até sua confluência com o rio Jaguaribe, próximo ao município de Limoeiro do Norte, é alimentado principalmente pelos rios Patu e Quixeramobim. O açude Banabuiú, situado nesta bacia hidrográfica, destaca-se como o maior reservatório da região e o terceiro maior do estado do Ceará, com uma capacidade de armazenamento de 1,5 bilhões de m<sup>3</sup> (Funceme, 2023).

Este reservatório, monitorado pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (Cogerh), desempenha um papel fundamental nos Projetos Malha D'Água Banabuiú-Sertão Central, ora em implantação, e o Malha D'água Sertões de Quixadá-Quixeramobim.

Uma inovação no abastecimento hídrico no Ceará, especialmente visando dar respostas aos períodos severos de seca que impactam a segurança hídrica no abastecimento urbano e rural (Ceará, 2020).

Os dados de precipitação e de temperatura, utilizados para a correção de viés dos modelos climáticos, foram obtidos, respectivamente, a partir das estações pluviométricas da Funceme e das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (ver Figura 12). Os dados de temperatura das estações meteorológicas foram utilizados para calcular a Evapotranspiração Potencial (ETP) através no método de Hargreaves-Samani (Hargreaves; Samani, 1985).

Os dados de vazão utilizados na calibração do modelo hidrológico foram estimados a partir do balanço hídrico reverso da série de volumes e retiradas do reservatório durante o período de 1985 a 2014. Essa abordagem baseia-se na análise dos níveis de água que foram registrados no reservatório Banabuiú, possibilitando a estimativa da vazão afluente ao reservatório, levando em consideração as contribuições da precipitação, as perdas por evaporação e as retiradas para diversos fins. Esses dados foram disponibilizados pela Funceme e pela Cogerh.

### ***3.2.2 Modelos climáticos globais e projeções do CMIP6***

Na avaliação dos impactos das mudanças climáticas, foram utilizados dados de simulações históricas (1985-2014) e projeções futuras (2023-2100) provenientes de modelos climáticos globais (MCGs) do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6). Selecionaram-se 8 modelos com base na disponibilidade de dados, cujas características fundamentais, incluindo país de origem, resolução espacial e referências principais, estão detalhadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Modelos Climáticos Globais do CMIP6 utilizados

Modelo (CMIP6)	País	Resolução (Lon x Lat)	Principal publicação
ACCESS-CM2	Austrália	1.9° × 1.3°	Bi <i>et al.</i> (2012), Bi <i>et al.</i> (2020)
ACCESS-ESM1-5	Austrália	1.9° × 1.2°	Law <i>et al.</i> (2017), Ziehn <i>et al.</i> (2020)
CanESM5	Canadá	2.8° × 2.8°	Swart <i>et al.</i> (2019)
EC-Earth3	Europa	0.7° × 0.7°	Döscher <i>et al.</i> (2022)
MPI-ESM1-2-HR	Alemanha	0.9° × 0.9°	Mauritsen <i>et al.</i> (2019)
MRI-ESM2-0	Japão	1.1° × 1.1°	Yukimoto <i>et al.</i> (2019)
MIROC6	Japão	1.4° × 1.4°	Tatebe <i>et al.</i> (2019)
MPI-ESM1-2-LR	Alemanha	1.9° × 1.9°	Gutjahr <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Para avaliar os impactos das mudanças climáticas no regime de vazões, este estudo utiliza os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 do CMIP6, representando diferentes trajetórias socioeconômicas e de emissões. O cenário SSP2-4.5, descrito como uma trajetória de desenvolvimento "intermediário", pressupõe que as tendências socioeconômicas atuais continuem levando a uma forçante radiativa de 4.5 W/m<sup>2</sup> até 2100 (Wang *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2023). Em contraste, o SSP5-8.5, um cenário de "crescimento econômico impulsionado por combustíveis fósseis", resulta em uma forçante radiativa de 8.5 W/m<sup>2</sup>, refletindo, assim, um aumento significativo nas emissões de gases de efeito estufa (Su *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2020).

### 3.2.3 Variáveis climáticas projetadas e correção de viés

A avaliação dos impactos hidrológicos das mudanças climáticas iniciou-se com a obtenção dos dados de temperatura e precipitação dos MCGs do CMIP6. A partir destes, a Evapotranspiração Potencial (ETP) foi estimada empregando o método de Hargreaves-Samani (Hargreaves; Samani, 1985), reconhecido por sua aplicabilidade em contextos em que os dados climáticos são limitados.

A fase seguinte após a estimativa da ETP compreendeu a interpolação dos dados de precipitação e da ETP calculada para as localizações dos postos pluviométricos e estações meteorológicas de interesse, respectivamente. Esta interpolação foi feita para remoção de viés,

das rodadas dos modelos climáticos durante o período de dados observados utilizado.

Após a interpolação, os dados de precipitação e ETP, estimados nas localidades dos postos e estações, foram submetidos a um processo de remoção de viés. O objetivo desta etapa foi de melhor descrever a variabilidade climática e hidrológica no período presente, esperando-se, com isto, aprimorar a precisão das simulações hidrológicas futuras. Para a correção de viés, empregou-se o método de Mapeamento de Quantis utilizando uma distribuição *Gama*.

A ideia básica por trás do *quantile mapping* é alinhar as distribuições de probabilidade acumulada de duas séries temporais, geralmente uma observada e outra simulada por modelos climáticos (e.g., precipitação, temperatura, ETP). Isso é feito ajustando os valores correspondentes da distribuição aos quantis (percentis) observados na série real (Xu *et al.*, 2021; Supharatid; Aribarg; Nafung, 2022).

A escolha da distribuição *Gama* para o ajuste das variáveis climáticas justifica-se pela sua capacidade de modelar a variabilidade e intensidade dessas variáveis, incluindo a ocorrência de eventos extremos (Heo *et al.*, 2019; Song; Chung; Shahid, 2022). A aplicação desta técnica de correção de viés foi realizada de forma diária, considerando a sazonalidade característica das séries de precipitação. Este procedimento garantiu a representação da variabilidade sazonal durante o período histórico (1985-2014), e, assumindo-se mudanças não significativas nestas relações estatísticas no futuro, também para as projeções futuras (2015-2100).

### **3.2.4 Modelagem hidrológica**

O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH), concebido por Collischonn (2001), constitui a base deste estudo para a análise dos impactos das mudanças do clima nas vazões afluentes ao reservatório Banabuiú. Este modelo, por ser distribuído, facilita a representação detalhada das características físicas e biogeográficas das bacias hidrográficas através da segmentação em bacias elementares, unidades definidas por critérios topográficos e hidrológicos (Vergasta *et al.*, 2021; Adam *et al.*, 2015).

No MGB, a estimativa da ETP é realizada dentro do modelo por meio de equações utilizando o método de *Penman-Monteith* (Allen *et al.*, 1998), para isso é feito a inserção dos seguintes dados de entrada: pressão atmosférica, umidade relativa, temperatura, radiação solar e velocidade do vento. Contudo, diante das limitações dos dados climáticos dos MCGs do CMIP6, os dados de ETP foram calculados externamente e o modelo MGB modificado para lê-los como dado de entrada.

O cálculo das séries temporais de ETP e precipitação, a serem inseridas no modelo, foi realizado através da interpolação dos valores dessas variáveis com os viéses corrigidos, para as bacias elementares do modelo MGB. Para tanto utilizou-se o método de Diagrama de *Voronoi* (Silva *et al.*, 2019), assegurando que as projeções dos MCGs fossem representadas nas escalas pertinentes à modelagem hidrológica. A metodologia empregada para a interpolação dos dados climáticos e sua subsequente inserção no MGB foi aplicada tanto às condições climáticas históricas quanto às projeções futuras do CMIP6.

A calibração do MGB foi feita a partir dos dados de vazão estimados pelo balanço hídrico reverso, conforme foi descrito no tópico 3.3.1, e foi realizada entre janeiro de 1985 e dezembro de 2014. As métricas de desempenho utilizadas para avaliar a adequação do modelo incluíram o Coeficiente de Eficiência de Nash-*Sutcliffe* (NSE) e o logaritmo do NSE (NASH-Log). O NSE alcançou um valor de 0.6 e o NASH-Log 0.39, indicando uma boa concordância entre as vazões simuladas e observadas. Deve-se ressaltar o alto grau de antropismo da bacia sob análise, incluindo-se aqui em torno de 13 mil pequenos barramentos na área de contribuição do reservatório Banabuiú.

### ***3.2.5 Estratégia de análise das projeções hidrológicas***

Neste estudo, a análise dos impactos das mudanças climáticas sobre o regime de vazões na bacia incremental do reservatório Banabuiú foi organizada em períodos, abordando tanto o histórico (1985 a 2014) quanto os futuros intervalos de 2023-2048 (P1), 2049-2074 (P2) e 2075-2100 (P3), e de acordo com os cenários SSP245 e SSP585. Esta estruturação permitiu uma avaliação comparativa das alterações projetadas nas variáveis hidroclimáticas em relação ao período e cenário futuro.

Inicialmente, a análise focou nas variações médias anuais percentuais em relação à condição histórica para as variáveis de vazão, precipitação, evapotranspiração potencial (ETP) e índice de aridez, concentrando-se nos meses de janeiro a junho. O índice de aridez, calculado como a razão entre a precipitação total anual e a ETP anual, seguiu a metodologia estabelecida pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Unep, 1992), permitindo a avaliação das mudanças nas condições de aridez e suas implicações para a disponibilidade hídrica e a vulnerabilidade dos ecossistemas à desertificação.

Posteriormente, a análise da probabilidade de alterações na vazão foi realizada por meio da função de distribuição acumulada das variações percentuais de vazão, baseada nos resultados modelados pelos diferentes MCGs. Esta etapa possibilitou a estimativa da

probabilidade de reduções significativas nas vazões, como diminuições de 50% ou mais, para os períodos futuros (P1, P2 e P3).

A fase conclusiva da análise direcionou-se para as mudanças nos extremos de cheia, utilizando a distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) para modelar as séries de máximos anuais, mais especificamente nos quantis de cheia com 10, 20 e 50 anos de recorrência, de forma a ter uma ideia das mudanças do risco hidrológico na região. Esta distribuição, identificada pelos parâmetros de localização ( $\mu$ ), escala ( $\sigma$ ) e forma ( $\xi$ ), é adequada para a análise de eventos extremos em hidrologia (Meresa; Tischbein; Mekonnen, 2022; Sime; Dibaba, 2023; Martins; Stedinger, 2000).

### **3.3 Resultados**

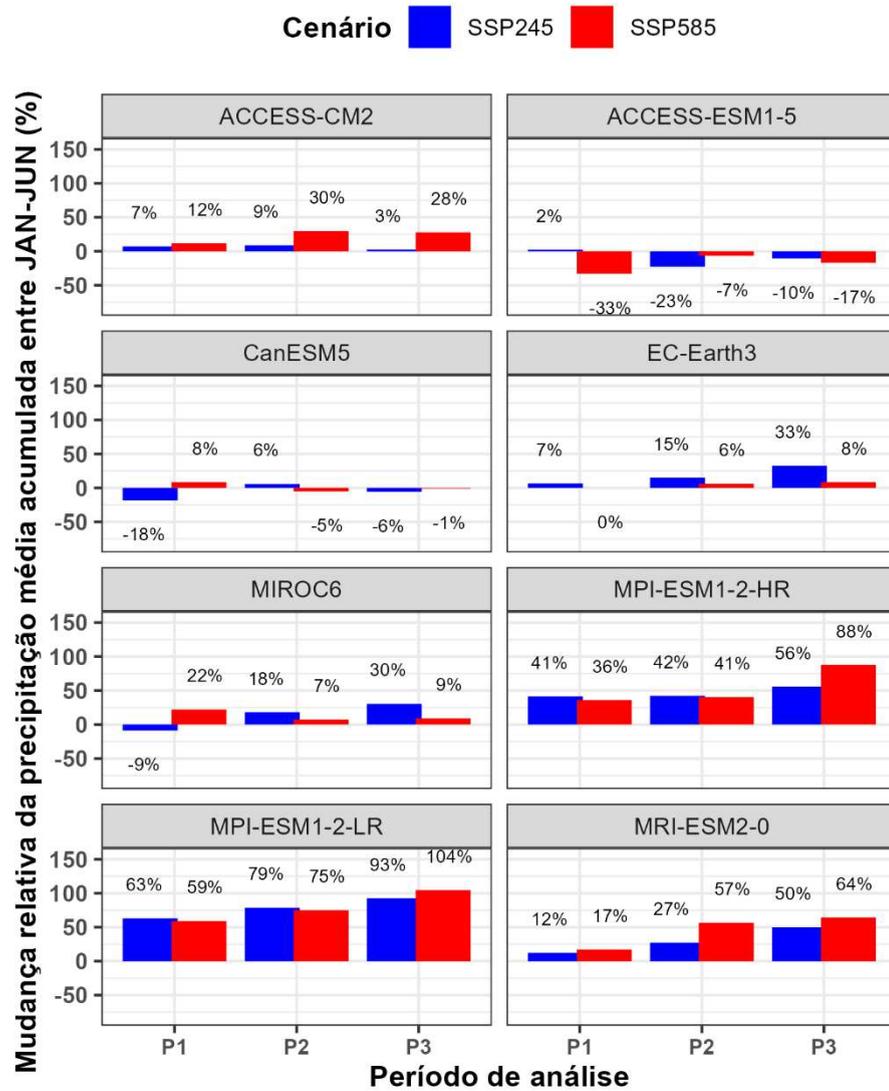
Foram identificadas inconsistências nos modelos climáticos do CMIP6 aplicados à região de estudo, o que levou ao reconhecimento de um viés úmido nas variáveis subsequentemente analisadas.

#### ***3.3.1 Mudanças na variabilidade das variáveis hidroclimáticas***

##### ***3.3.1.1 Precipitação e ETP***

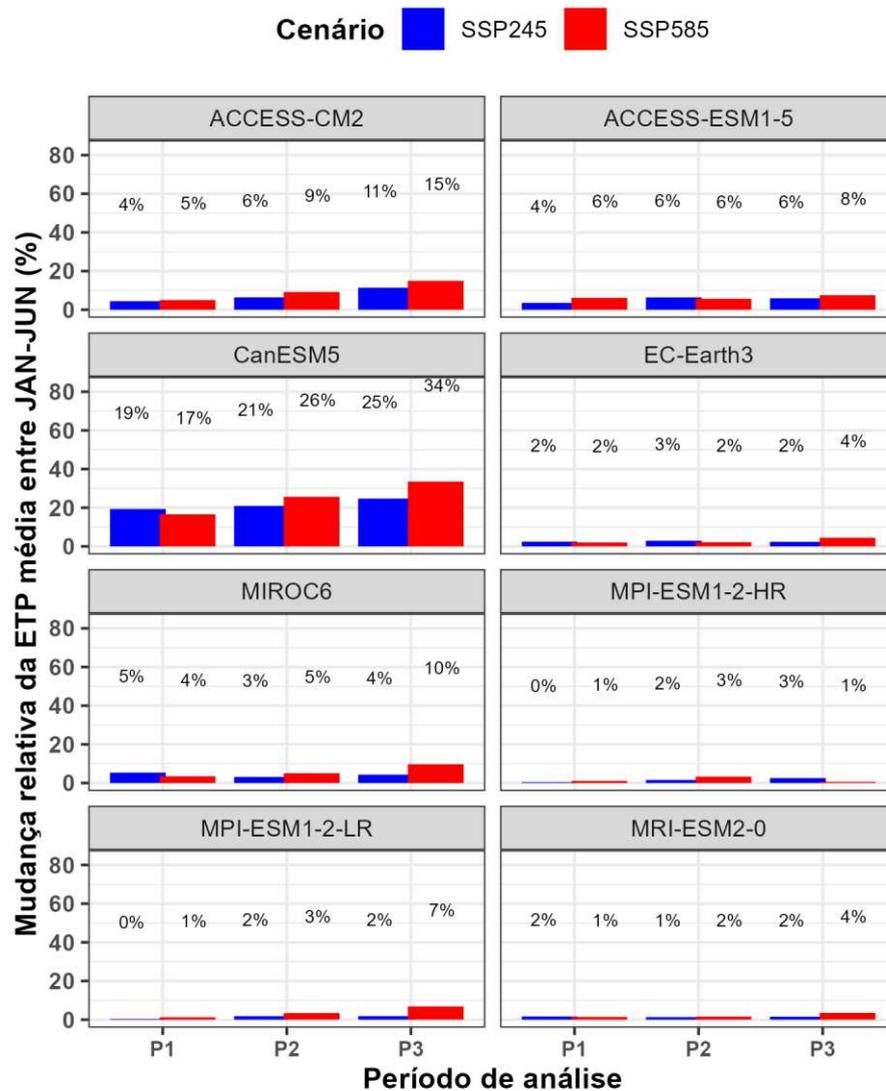
A análise comparativa entre os dados históricos e as projeções futuras dos modelos CMIP6, nos cenários SSP245 e SSP585, focada nas mudanças relativas à precipitação e ETP acumuladas médias, revelou um panorama heterogêneo e diversificado. Essa variação nos resultados é ilustrada nas Figuras 13 e 14, onde se observam as tendências distintas entre os modelos e cenários.

Figura 13 - Comparação dos cenários SSP245 (azul) e SSP585 (vermelho) para mudanças percentuais médias anuais na precipitação acumulada entre janeiro e julho nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100)



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Figura 14 - Comparação dos cenários SSP245 (azul) e SSP585 (vermelho) para mudanças percentuais médias anuais na ETP acumulada entre janeiro e julho nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100)



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

No cenário SSP245, a análise das projeções de precipitação e ETP dos modelos CMIP6 apresentou tendências variadas. A maioria dos modelos indicou um aumento na precipitação, com o MPI-ESM1-2-LR apresentando um acréscimo de 93% no terceiro período. Em contraste, o ACCESS-ESM1-5 e o CanESM5 mostraram uma tendência de diminuição, sendo mais pronunciada no ACCESS-ESM1-5 com uma redução de 23% no segundo período.

No cenário SSP245, a análise da variação percentual da ETP revelou um aumento moderado, sugerindo uma tendência de elevação na evapotranspiração sob as condições

climáticas projetadas. Os modelos ACCESS-ESM1-5, ACCESS-CM2 e CanESM5 mostraram os maiores aumentos, com o CanESM5 registrando um crescimento expressivo de 25% no terceiro período. Paralelamente, uma tendência de diminuição na precipitação foi observada nos modelos ACCESS-ESM1-5 e CanESM5. O CanESM5, em particular, exibiu reduções significativas tanto na precipitação quanto na ETP, evidenciando variações acentuadas nessas duas variáveis climáticas.

No cenário SSP585, as projeções dos modelos CMIP6 para precipitação e ETP demonstram padrões variados. A maioria indica um aumento na precipitação, mas o modelo ACCESS-ESM1-5 mostra uma tendência de redução, sendo esta menos intensa do que no cenário SSP245. Quanto à ETP, há um padrão claro de crescimento nos modelos analisados sob este cenário. Destaca-se o CanESM5 e o ACCESS-CM2, com incrementos significativos na ETP. Em particular, o CanESM5 exibe um aumento de 34% no terceiro período, evidenciando uma mudança considerável.

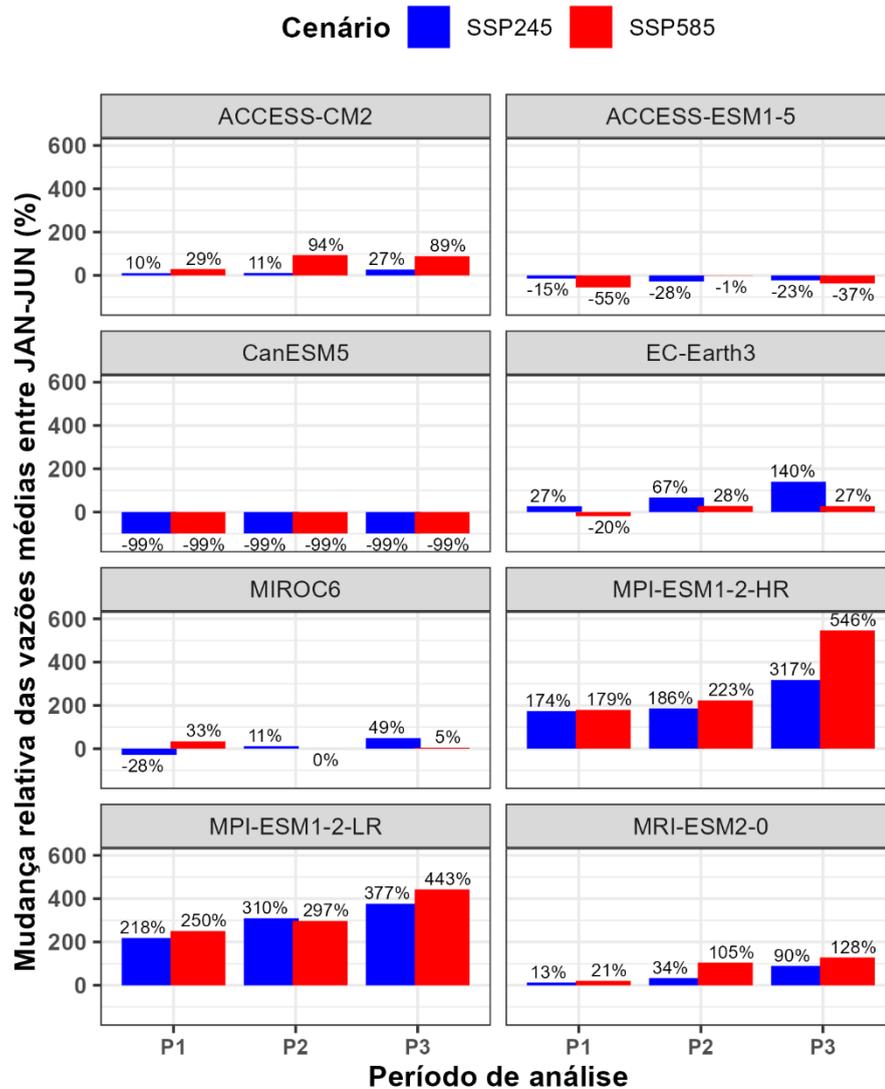
Os resultados apresentados por Correa *et al.* (2022) sobre a superestimação da precipitação pelos modelos climáticos na região Nordeste encontram concordância nos padrões observados nas análises dos cenários SSP245 e SSP585 dos modelos CMIP6 nesse estudo. Essas análises evidenciam uma tendência variada na projeção de precipitação e ETP, com alguns modelos, como o ACCESS-ESM1-5 e o CanESM5, indicando diminuições na precipitação em contraste com outros que sugerem aumentos.

### 3.3.1.2 Vazão

Para avaliar as mudanças percentuais nas vazões médias anuais, foi realizada uma análise comparativa das simulações, modelo a modelo, do CMIP6 referentes às projeções futuras nos cenários SSP245 e SSP585 em relação ao período histórico correspondente. Esta análise foi segmentada em três intervalos temporais definidos a priori.

Dentro do cenário SSP245, a tendência geral é o aumento da variação das vazões, conforme indicado pela maioria dos modelos. No entanto, há exceções importantes. O modelo MIROC6 prevê uma redução de 28% na vazão entre 2023 e 2048. Já o CanESM5 indica uma diminuição mais consistente em todos os períodos, com uma variação média de cerca de 100%. Paralelamente, o ACCESS-ESM1-5 mostra uma tendência de declínio, com a vazão diminuindo de 15% no primeiro período para 23% no terceiro. Essas variações estão ilustradas na Figura 15.

Figura 15 - Comparação dos cenários SSP245 (azul) e SSP585 (vermelho) para mudanças percentuais médias anuais na vazão entre janeiro e julho nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100)



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

No cenário SSP585, observa-se também um aumento geral na variação da vazão na maioria dos modelos. Entretanto, os modelos ACCESS-ESM1-5 e CanESM5, consistentes com suas tendências no cenário SSP245, mostram reduções significativas em todos os períodos. Especificamente, o ACCESS-ESM1-5 apresenta uma diminuição mais pronunciada de 55% no início, que se atenua para 37% no terceiro período. Da mesma forma, o CanESM5 mantém uma redução constante, com mudanças próximas a 100% em todos os períodos.

O modelo EC-Earth3, em contraste, apresenta um comportamento variado:

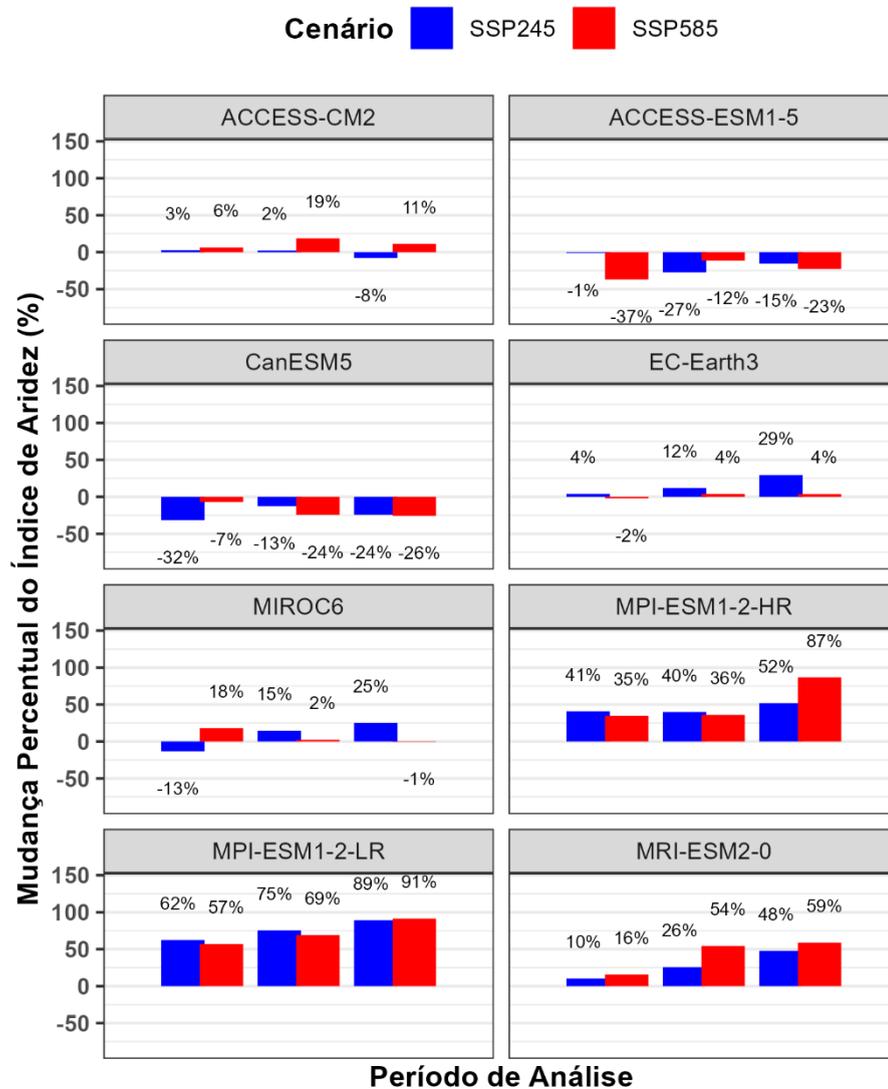
inicialmente, há uma redução de 20% na vazão no primeiro período, seguida por aumentos nos períodos subsequentes. Ao comparar os cenários SSP245 e SSP585, nota-se uma tendência geral de amplificação das mudanças na vazão sob o SSP585. É evidente que os modelos, independentemente de mostrarem aumentos ou diminuições no SSP245, tendem a manifestar variações mais extremas no cenário SSP585.

Os resultados derivados dos modelos CMIP6 evidenciam um contraste com as conclusões de estudos anteriores realizados pelo Banco Mundial em 2013 e pela Secretaria de Assuntos Estratégicos em 2015. Esses estudos anteriores, fundamentados nos modelos CMIP4 e CMIP5, prognosticavam uma diminuição nas vazões na região Nordeste do Brasil. A discrepância observada entre essas previsões anteriores e os resultados atuais pode ser parcialmente explicada pela implementação de atualizações nos modelos CMIP6. Além disso, a análise atual se diferencia pela consideração de um espectro mais amplo de modelos, bem como pela distinção nos próprios modelos utilizados, contribuindo para a variação nos resultados.

### *3.3.1.3 Índice de aridez*

A análise do índice de aridez, calculado com base nas projeções de precipitação e ETP dos modelos CMIP6, revela tendências variadas em relação ao histórico desses modelos. Uma variação negativa indica uma piora nas condições de aridez em comparação com o histórico, enquanto um valor positivo sugere o contrário. Esses resultados são ilustrados na Figura 16.

Figura 16 - Comparação dos cenários SSP245 (azul) e SSP585 (vermelho) para mudanças percentuais no índice de aridez entre janeiro e julho nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100)



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

No cenário SSP245, a maioria dos modelos aponta para um aumento no índice de aridez em comparação com o histórico, embora existam variações significativas entre eles. Por exemplo, o modelo MRI-ESM2-0 mostra uma tendência de aumento gradual do índice ao longo dos períodos analisados, indicando uma melhoria nessas condições. Em contraste, o CanESM5 se destaca com um aumento mais acentuado, sugerindo um agravamento nesse aspecto. Outros modelos, como o MIROC6, apresentam uma tendência de decréscimo, mas apenas em alguns períodos analisados.

Sob o cenário SSP585, uma resposta mais intensa é observada nos modelos

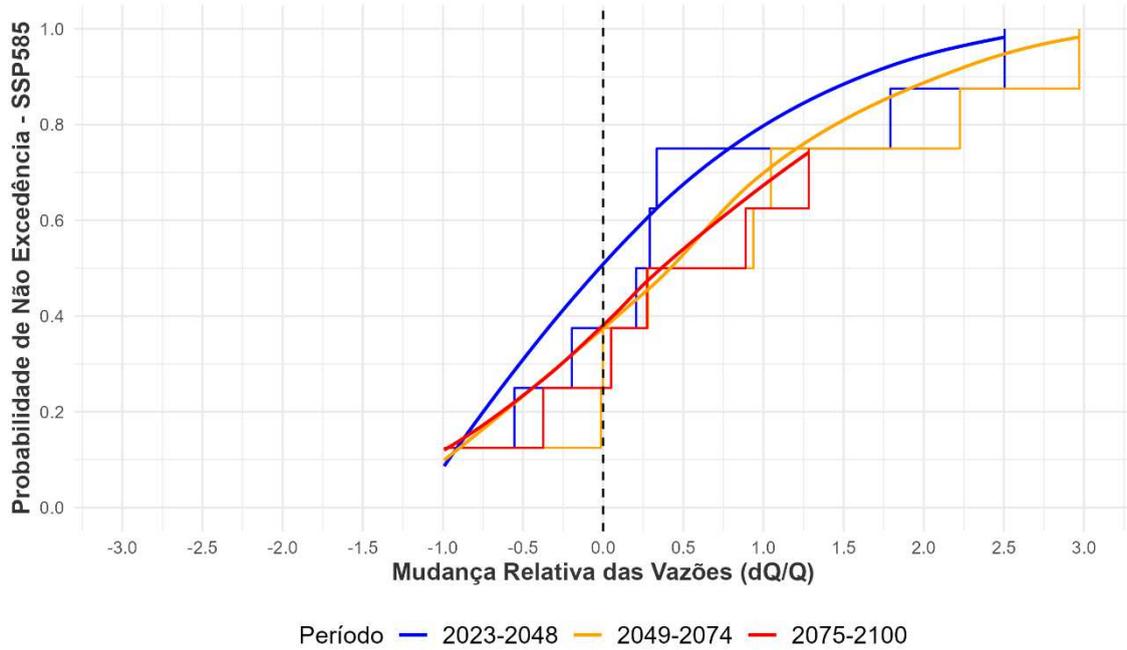
climáticos, caracterizada por um aumento geral no índice de aridez. Entretanto, modelos como ACCESS-ESM1-5, EC-Earth3 e CanESM5 demonstram uma tendência de diminuição nesse índice, divergindo da tendência predominante. Esses modelos também registram uma redução na precipitação e um aumento mais significativo na ETP, influenciando as variações observadas.

Esses resultados apresentam divergências parciais em relação às projeções de Silva *et al.* (2023) e Moraes, Wanderley e Delgado (2023), que preveem uma expansão das áreas áridas e um crescimento na vulnerabilidade à desertificação, particularmente na região semiárida do Nordeste Brasileiro. Enquanto alguns modelos do CMIP6 reforçam essa previsão, outros sugerem uma possível melhoria nas condições áridas, ressaltando a complexidade e a variabilidade inerentes às projeções climáticas.

### ***3.3.2 Probabilidade de ocorrência das variações de vazão para os cenários SSP585 e SSP245***

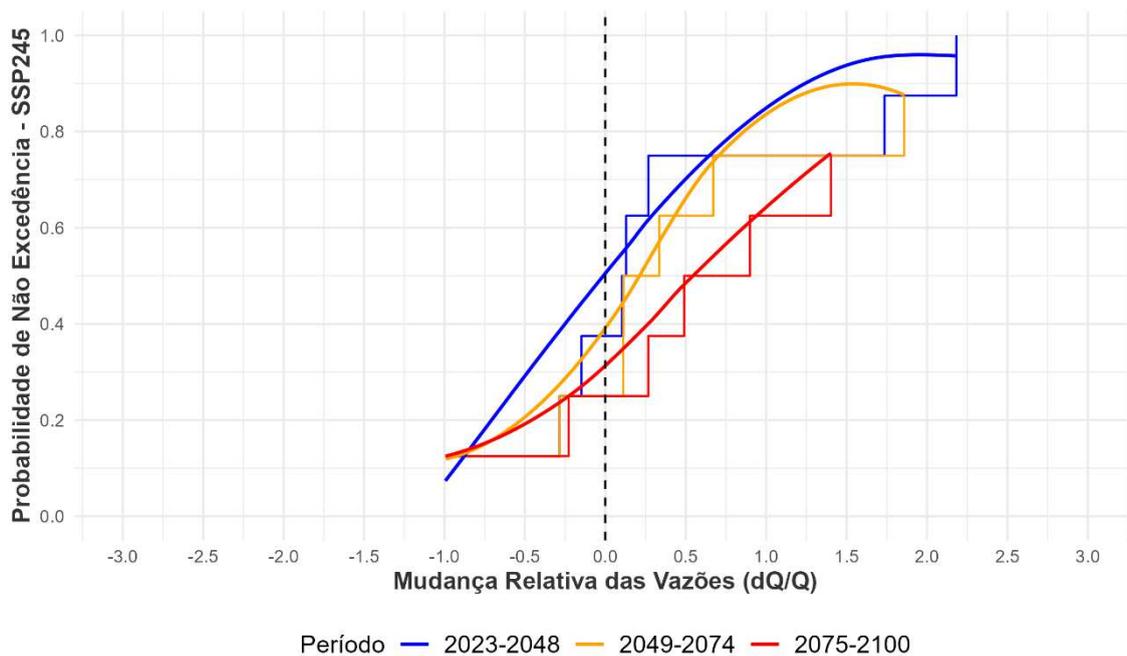
A análise das variações na vazão, especialmente sob o impacto das mudanças climáticas projetadas, é essencial para compreender a probabilidade de tais variações ocorrerem. Essa análise inclui a avaliação da mudança relativa de  $dQ/Q$  para os diferentes períodos abordados nas projeções climáticas. Utilizou-se a função de distribuição acumulada para realizar esta avaliação, conforme demonstrado na Figura 17 e 18, que se refere aos cenários projetados para a bacia incremental do reservatório Banabuiú.

Figura 17 - Curva de probabilidade acumulada para o SSP585 considerando a variação da vazão média anual entre janeiro e julho nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100)



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 18 - Curva de probabilidade acumulada para o SSP585 considerando a variação da vazão média anual entre janeiro e julho nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100)



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

No cenário SSP585, observa-se que as probabilidades de  $dQ/Q$  ser menor que 0 são de 38% para o P1, 38% para o P2 e 25% para o P3, conforme ilustrado na Figura 17. Esta tendência se assemelha àquela do cenário SSP245 para o P1 e o P3, porém, no SSP585, o P2 apresenta uma probabilidade maior de redução da vazão.

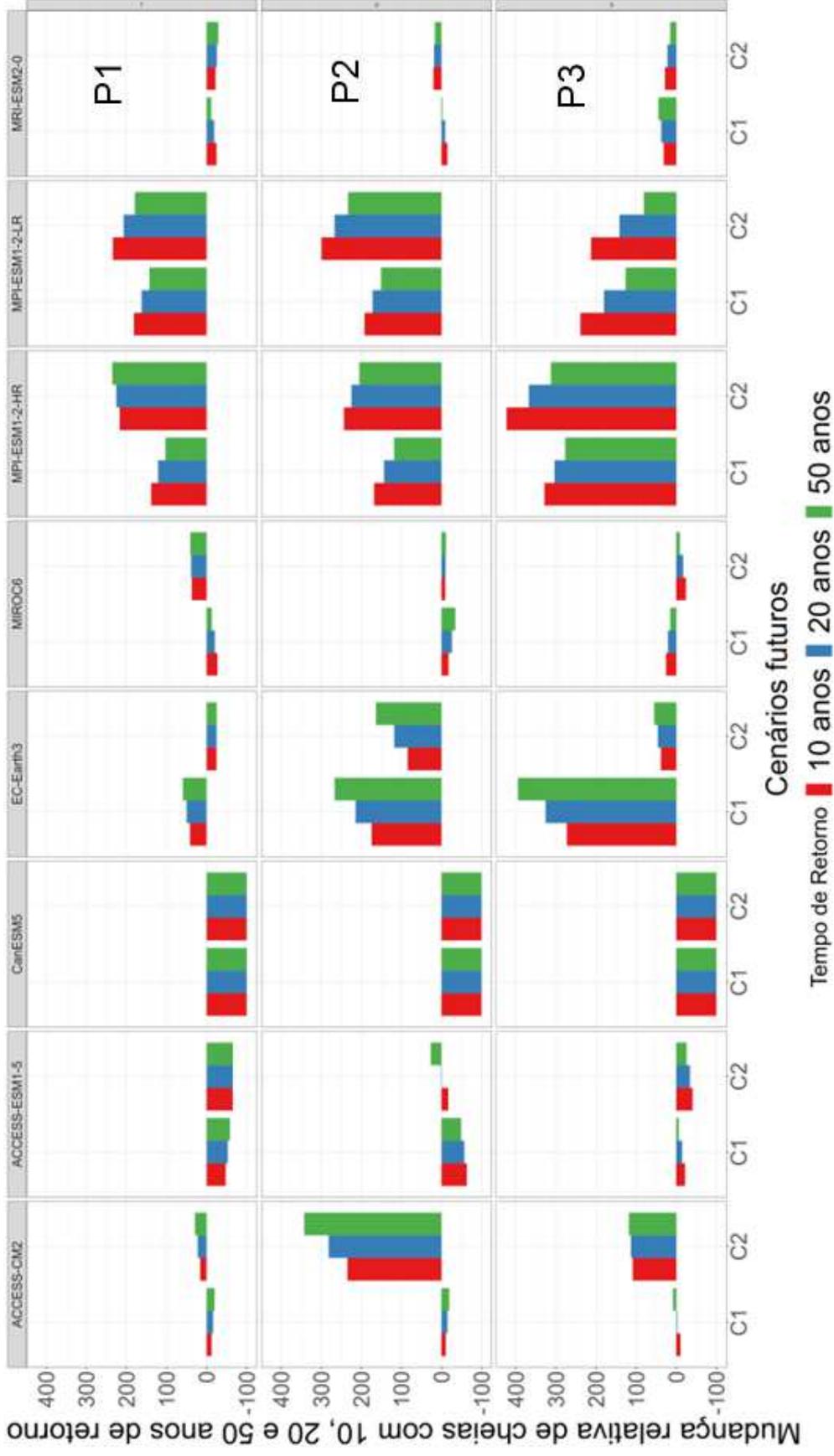
Analisando os diferentes níveis de variação de vazão, constata-se que a probabilidade de variações de -25% é elevada em ambos os cenários, com destaque para uma incidência ainda mais significativa no SSP585. Além disso, no cenário SSP585, a possibilidade de uma variação de vazão de -50% é de 25%. Em ambos os cenários, uma redução de quase 100% na vazão não é descartada, embora a probabilidade seja relativamente menor, ficando em torno de 12.5%.

A importância de considerar a ampla gama de incertezas nas projeções de vazão é enfatizada por estas análises, especialmente em cenários de mudanças climáticas extremas como o SSP585. É essencial compreender estas probabilidades para analisar os possíveis riscos de mudanças extremas na vazão considerando os potenciais impactos das mudanças climáticas.

### ***3.3.3 Mudanças nos extremos de cheia***

Este estudo analisa as mudanças nas vazões máximas para os períodos de retorno de 10, 20 e 50 anos. Destaca-se que padrões variados são observados sob os cenários SSP245 e SSP585. Isso fornece uma compreensão abrangente das potenciais variações das vazões máximas em diferentes cenários de mudança climática. Os resultados são ilustrados na Figura 19.

Figura 19 – Mudanças relativas das cheias com diferentes tempos de recorrência entre JAN-JUL para os cenários SSP245 (C1) e SSP585 (C2) nos períodos P1 (2023-2048), P2 (2049-2074) e P3 (2075-2100)



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

No cenário SSP245, a maioria dos modelos, como ACCESS-CM2 e MIROC6, indica uma tendência de diminuição nas vazões máximas para o período de retorno de 10 anos, sugerindo uma possível redução das mudanças percentuais relativas nas vazões máximas. Contudo, o modelo MPI-ESM1-2-HR mostra um aumento, indicando a possibilidade de eventos de cheia mais intensos sob um cenário de emissões moderadas.

Para o período de retorno de 20 anos, a tendência é semelhante, com uma diminuição geral nas vazões máximas, exceto nos modelos EC-Earth3, MPI-ESM1-2-HR e MPI-ESM1-2-LR, que projetam um aumento. Este padrão destaca a variação nas respostas hidrológicas às mudanças climáticas projetadas. Para o período de retorno de 50 anos, os modelos apresentam respostas diversificadas. Alguns modelos, como CanESM5, projetam uma redução significativa, sugerindo uma possível diminuição na severidade das cheias extremas, enquanto outros, como MPI-ESM1-2-LR, indicam um aumento, apontando para um risco elevado de eventos de cheia mais severos.

Sob o cenário SSP585, as projeções para o período de retorno de 10 anos mostram um aumento nas vazões máximas na maioria dos modelos, indicando um aumento na frequência de cheias moderadas. Para o período de retorno de 20 anos, as projeções indicam um aumento consistente nas vazões máximas em comparação com o cenário SSP245, sugerindo um acréscimo na intensidade de cheias mais significativas. Para o período de retorno de 50 anos, todos os modelos analisados projetam um aumento nas vazões máximas, com alguns indicando aumentos muito expressivos, sinalizando um risco consideravelmente maior de cheias extremas sob este cenário.

Estes resultados demonstram que eventos de cheia podem se tornar mais frequentes e intensos no futuro, especialmente sob o cenário SSP585. A variação nas projeções entre os modelos e cenários ressalta a necessidade de considerar uma ampla gama de possíveis cenários na gestão de riscos.

### **3.4 Conclusões**

Este estudo avaliou os impactos potenciais das mudanças climáticas no regime de vazões da bacia incremental do reservatório Banabuiú, empregando modelos do CMIP6. Observou-se que as variações nas projeções de vazão entre diferentes modelos e cenários ressaltam a complexidade das respostas hidrológicas a essas mudanças. Alguns modelos indicam aumento na vazão, enquanto outros projetam uma redução significativa, destacando as incertezas nas projeções climáticas.

As projeções de precipitação e evapotranspiração potencial (ETP) mostraram variações significativas entre os modelos, afetando diretamente o índice de aridez. Essa variabilidade indica a dificuldade em prever condições futuras de seca e umidade. A análise do índice do índice indica que alguns modelos preveem aumento na aridez, enquanto outros sugerem condições menos áridas.

A análise probabilística, focada nas variações de vazão, revelou uma ampla variabilidade nas probabilidades associadas a cada percentual da diferença relativa entre as vazões históricas e as projeções de cenários futuros. Este resultado evidencia uma incerteza considerável tanto na magnitude quanto na direção das mudanças.

No que se refere aos extremos de cheia, as projeções sob o cenário SSP585 indicaram um aumento nas vazões máximas, sugerindo maior intensidade de eventos severos de cheia. Os resultados deste estudo sublinham a importância de integrar a variabilidade e a incerteza das projeções climáticas ao analisar os resultados de mudanças relativas de vazão.

#### **4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISA FUTURA**

Esta dissertação investiga a modelagem hidrológica distribuída aplicada ao monitoramento de secas e à análise dos impactos das mudanças climáticas nas vazões afluentes do reservatório Banabuiú. O estudo se divide em dois artigos principais, focados em aspectos específicos dessa área.

O primeiro artigo discorre sobre o desenvolvimento e implementação do Índice de Seca Composto (CDI) na Região Hidrográfica do Banabuiú e na Bacia do Reservatório Riacho do Sangue. Utilizando uma combinação de indicadores climáticos e hidrológicos, o CDI facilita uma avaliação automática das condições de seca, tornando-se um instrumento para o monitoramento dessas condições.

Prosseguindo, o segundo artigo aborda os efeitos das mudanças climáticas nas vazões afluentes à Bacia Incremental do Reservatório Banabuiú, com a aplicação de modelos climáticos do CMIP6. Ressalta-se a necessidade de considerar a variabilidade e a incerteza nas projeções climáticas, especialmente quanto ao impacto de mudanças na precipitação no Nordeste brasileiro sobre as projeções de vazão, e a relevância de tais incertezas na interpretação dos resultados.

Esse estudo introduz o CDI como uma nova abordagem no monitoramento de secas no Brasil, destacando sua capacidade de analisar a dinâmica das secas na área estudada e podendo ser um instrumento de apoio a validação espaço-temporal desses eventos em conjunto

com o Monitor de Secas. As modificações no modelo hidrológico MGB, que agora incluem a utilização de dados de evapotranspiração potencial calculados por métodos alternativos, representam um avanço técnico significativo. Originalmente, o modelo processava a evapotranspiração potencial internamente, com a introdução de variáveis de entrada para ser calculada usando o método de Penman-Monteith.

Para pesquisas futuras, recomenda-se a incorporação e avaliação de novos indicadores e a validação do CDI em outras regiões semiáridas, sugere-se a exploração de métodos alternativos para sua validação, como o uso de diferentes abordagens estatísticas e a comparação com índices de seca reconhecidos internacionalmente. Importante também é a análise das estratégias de interpolação dos dados das variáveis originais e seu impacto nos resultados obtidos, o que pode aperfeiçoar os resultados gerados pelo CDI.

Além disso, a comparação dos resultados obtidos pelo acoplamento dos modelos do CMIP6 com o MGB com aqueles utilizando outros modelos hidrológicos concentrados é importante para identificar diferenças na modelagem das vazões em cenários de mudança climática. Desenvolver critérios de operação adaptados às demandas urbanas, dentro do escopo do Projeto Malha D'água, em resposta aos impactos das mudanças climáticas, contribuirão para a formulação de políticas públicas e estratégias de gestão adaptativas, objetivando reduzir os riscos associados às mudanças climáticas e promover a segurança hídrica.

## REFERÊNCIAS

- ADAM, Katiucia Nascimento et al. Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná. **Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos. Porto Alegre, RS. Vol. 20, n. 4 (out./dez. 2015), p. 999-1007**, 2015.
- AGBAZO, Médard Noukpo et al. Analysis and Predictability of Dry Spell Lengths Observed in Synoptic Stations of Benin Republic (West Africa). **American Journal of Climate Change**, v. 10, n. 4, p. 597-618, 2021.
- Agência Nacional de Águas (ANA). **A origem do Monitor de Secas**. Disponível em: <https://monitordesecas.ana.gov.br/a-origem-do-monitor>. Acesso em: 21 dez. 2023.
- AGHAKOUCHAK, Amir et al. Climate extremes and compound hazards in a warming world. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 48, p. 519-548, 2020.
- ANOWAR, Farzana; SADAOU, Samira; SELIM, Bassant. Conceptual and empirical comparison of dimensionality reduction algorithms (pca, kpca, lda, mds, svd, lle, isomap, le, ica, t-sne). **Computer Science Review**, v. 40, p. 100378, 2021.
- ÁVILA, Leandro et al. Comparative evaluation of five hydrological models in a large-scale and tropical river basin. **Water**, v. 14, n. 19, p. 3013, 2022.
- BATISTA. C. de O.N.; CORREIA, V.M.S.; SILVA, F.J.A. Variabilidade hidroquímica em dois reservatórios no semiárido brasileiro. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 13698-13712, 2019.
- BAYISSA, Yared A. et al. Developing a satellite-based combined drought indicator to monitor agricultural drought: A case study for Ethiopia. **GIScience & Remote Sensing**, v. 56, n. 5, p. 718-748, 2019.
- BAZZANELA, Anna Carolina et al. Performance of CMIP6 models over South America. **Climate Dynamics**, p. 1-16, 2023.
- BERBEL, Julio; ESTEBAN, Encarna. Droughts as a catalyst for water policy change. Analysis of Spain, Australia (MDB), and California. **Global Environmental Change**, v. 58, p. 101969, 2019.
- BLAIN, Gabriel Constantino; AVILA, Ana Maria H.; PEREIRA, Vânia Rosa. Using the normality assumption to calculate probability-based standardized drought indices: selection criteria with emphases on typical events. **International journal of climatology**, v. 38, p. e418-e436, 2018.
- BOLGOV, M. V.; SARMANOV, I. O. Two-dimensional distribution law of random variables having SN Kritskii and MF Menkel three-parameter gamma distributions: a symmetrical case. **Water Resources**, v. 47, p. 517-520, 2020.
- BORIE, Maud et al. Knowing like a global expert organization: Comparative insights from the IPCC and IPBES. **Global Environmental Change**, v. 68, p. 102261, 2021.

BRASIL, Paulilo; MEDEIROS, Pedro. NeStRes—model for operation of Non-Strategic Reservoirs for irrigation in drylands: model description and application to a semiarid basin. **Water Resources Management**, v. 34, n. 1, p. 195-210, 2020.

CAVALCANTE, Eduardo Santos et al. Supplemental irrigation with brackish water improves carbon assimilation and water use efficiency in maize under tropical dryland conditions. **Agriculture**, v. 12, n. 4, p. 544, 2022.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Caderno regional da sub-bacia do Banabuiú**. Fortaleza: INESP, 2009. 116p.: il. (Coleção Cadernos Regionais do Pacto das Águas, v. 2). ISBN 978-85-87764-99-7 (coleção); 978-85-7973-001-6 (v.).

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Caderno regional da sub-bacia do Banabuiú**. Fortaleza: INESP, 2009. 116p. : il. (Coleção Cadernos Regionais do Pacto das Águas, v. 2). ISBN 978-85-87764-99-7 (coleção); 978-85-7973-001-6 (v.).

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos. Projeto Malha D'Água. 2020. Disponível em: [https://www.srh.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/90/2020/07/APRESENT\\_MALHA-DAGUA\\_Sintese\\_2020\\_A4.pdf](https://www.srh.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/90/2020/07/APRESENT_MALHA-DAGUA_Sintese_2020_A4.pdf). Acesso em: 01 jan. 2024.

CHAUDHARY, Shushobhit; DHANYA, C. T.; VINNARASI, R. Dry and wet spell variability during monsoon in gauge-based gridded daily precipitation datasets over India. **Journal of Hydrology**, v. 546, p. 204-218, 2017.

CLEOPHAS, Ton J. et al. Bayesian Pearson correlation analysis. **Modern Bayesian statistics in clinical research**, p. 111-118, 2018.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S). **Soil moisture gridded data from 1978 to present**. Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-soil-moisture?tab=overview>. Acesso em: 12 dez. 2023.

DI, Zichao Wendy et al. Centroidal Voronoi tessellation based methods for optimal rain gauge location prediction. **Journal of Hydrology**, v. 584, p. 124651, 2020.

DIKICI, Mehmet. Drought analysis with different indices for the Asi Basin (Turkey). **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 20739, 2020.

DORIGO, Wouter et al. The International Soil Moisture Network: serving Earth system science for over a decade. **Hydrology and earth system sciences**, v. 25, n. 11, p. 5749-5804, 2021.

FALLAH-GHALHARI, Gholamabbas; SHAKERI, Fahimeh. Assessing the consequences of climate change on potential evapotranspiration in Iran in the coming decades. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 16, n. 4, p. 225, 2023.

FUNCEME. **Calendário de médias históricas para as regiões do Ceará**. Disponível em: <http://www.funceme.br/app-calendario/ano/regioes/media>. Acesso em: 30 dez. 2023.

GLEICK, Peter H. Water, drought, climate change, and conflict in Syria. **Weather, climate, and society**, v. 6, n. 3, p. 331-340, 2014.

GONDIM, Rubens et al. Climate change impacts on water demand and availability using CMIP5 models in the Jaguaribe basin, semi-arid Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, p. 1-14, 2018.

GROSE, Michael Richard et al. Insights from CMIP6 for Australia's future climate. **Earth's Future**, v. 8, n. 5, p. e2019EF001469, 2020.

GRUBER, Alexander et al. Evolution of the ESA CCI Soil Moisture climate data records and their underlying merging methodology. **Earth System Science Data**, v. 11, n. 2, p. 717-739, 2019.

GUILLORY, Laura et al. A drought monitor for Australia. **Environmental Modelling & Software**, v. 170, p. 105852, 2023.

HEO, Jun-Haeng et al. Probability distributions for a quantile mapping technique for a bias correction of precipitation data: A case study to precipitation data under climate change. **Water**, v. 11, n. 7, p. 1475, 2019.

HU, Tian et al. Monitoring agricultural drought in Australia using MTSAT-2 land surface temperature retrievals. **Remote Sensing of Environment**, v. 236, p. 111419, 2020.

JAGER, Alfred L.; VOGT, Jürgen V. Analyzing the combined drought indicator (CDI): demonstration and analysis of its evolution during spring and summer 2013-2014. **Agriculture and agricultural science procedia**, v. 4, p. 222-231, 2015.

Jl, Tao et al. Comprehensive drought index as an indicator for use in drought monitoring integrating multi-source remote sensing data: a case study covering the Sichuan-Chongqing region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 3, p. 786-809, 2018.

KARIMI, Mahshid et al. Meteorological and agricultural drought monitoring in Southwest of Iran using a remote sensing-based combined drought index. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 36, n. 11, p. 3707-3724, 2022.

KCHOUK, Sarra et al. Mind the Gap: Misalignment Between Drought Monitoring and Community Realities. **EGUsphere**, v. 2023, p. 1-24, 2023.

KHATUN, Nasrin et al. Applications of normality test in statistical analysis. **Open Journal of Statistics**, v. 11, n. 01, p. 113, 2021.

KHERIF, Ferath; LATYPOVA, Adeliya. Principal component analysis. In: **Machine Learning**. Academic Press, 2020. p. 209-225.

KOGAN, F. N. Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 4, p. 621-636, 1997.

KOGAN, Felix; SALAZAR, Luis; ROYTMAN, Leonid. Forecasting crop production using satellite-based vegetation health indices in Kansas, USA. **International journal of remote sensing**, v. 33, n. 9, p. 2798-2814, 2012.

LI, Ronghui et al. Quantitative analysis of agricultural drought propagation process in the Yangtze River Basin by using cross wavelet analysis and spatial autocorrelation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 280, p. 107809, 2020.

LI, Su-Yuan et al. Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015–2099. **Advances in Climate Change Research**, v. 11, n. 3, p. 210-217, 2020.

LU, Shibao et al. Impacts of climate change on water resources and grain production. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 143, p. 76-84, 2019.

MARTINS, Eduardo Sávio P.R. et al. **Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas**. 1ª ed. Brasília, 2015. 124p. ISBN 978-85-88192-16-4

MATHBOUT, Shifa et al. Spatial and temporal analysis of drought variability at several time scales in Syria during 1961–2012. **Atmospheric Research**, v. 200, p. 153-168, 2018.

MATHLOUTHI, Majid; LEBDI, Fethi. Comprehensive study of the wet and dry spells and their extremes in the Mediterranean climate basin Northern Tunisia. **SN Applied Sciences**, v. 3, p. 1-17, 2021.

MCKEE, Thomas B. et al. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: **Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology**. 1993. p. 179-183.

MEDEIROS, Felipe Jeferson de; OLIVEIRA, Cristiano Prestrelo de; AVILA-DIAZ, Alvaro. Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6. **Weather and Climate Extremes**, v. 38, p. 100511, 2022.

MERESA, Hadush; TISCHBEIN, Bernhard; MEKONNEN, Tewodros. Climate change impact on extreme precipitation and peak flood magnitude and frequency: Observations from CMIP6 and hydrological models. **Natural Hazards**, v. 111, n. 3, p. 2649-2679, 2022.

MESGARI, Ebrahim et al. Assessment of CMIP6 models' performances and projection of precipitation based on SSP scenarios over the MENAP region. **Journal of Water and Climate Change**, v. 13, n. 10, p. 3607-3619, 2022.

MESQUITA, Eveline Andrade et al. Geoprocessamento aplicado à espacialização da potencialidade à erosão laminar na sub-bacia hidrográfica Riacho do Sangue-Ce. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 1, p. 3868-3874, 2022.

MISHRA, Vimal. Long-term (1870–2018) drought reconstruction in context of surface water security in India. **Journal of Hydrology**, v. 580, p. 124228, 2020.

MOREIRA, Rafaella Pessoa et al. Climate and climate-sensitive diseases in semi-arid regions: a systematic review. **International Journal of Public Health**, v. 65, p. 1749-1761, 2020.

NATIONAL DROUGHT MITIGATION CENTER. **NDMC Composite Drought Indicators**. Disponível em: <https://ndmcblands.unl.edu/>. Acesso em: 20 dez. 2020.

NÓIA JÚNIOR, Rogério de Souza; SENTELHAS, Paulo Cesar. Soybean-maize off-season

double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases. **Agricultural Systems**, v. 173, p. 254-267, 2019.

OLÉN, Niklas Boke; LEHSTEN, Veiko. High-resolution global population projections dataset developed with CMIP6 RCP and SSP scenarios for year 2010–2100. **Data in Brief**, v. 40, p. 107804, 2022.

PANDYA, PARTHSARTHI; GONTIA, N. K.; PARMAR, H. V. Development of PCA-based composite drought index for agricultural drought assessment using remote-sensing. **Journal of Agrometeorology**, v. 24, n. 4, p. 384-392, 2022.

PAPALEXIOU, Simon Michael; MONTANARI, Alberto. Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. **Water Resources Research**, v. 55, n. 6, p. 4901-4914, 2019.

PEREIRA, J. M. R. et al. Climate seasonal forecast and derived indexes for droughts in Ceará, Brazil. **Drought: Research and Science-Policy Interfacing**, p. 315, 2015.

PONTES FILHO, João Dehon et al. Copula-based multivariate frequency analysis of the 2012–2018 drought in Northeast Brazil. **Water**, v. 12, n. 3, p. 834, 2020.

RAMARAO, M. V. S. et al. Understanding land surface response to changing South Asian monsoon in a warming climate. **Earth System Dynamics**, v. 6, n. 2, p. 569-582, 2015.

RIBEIRO NETO, Germano Gondim et al. Drought cycle analysis to evaluate the influence of a dense network of small reservoirs on drought evolution. **Water Resources Research**, v. 58, n. 1, p. e2021WR030799, 2022.

RIVOIRE, Pauline et al. Impact of the dry-day definition on Mediterranean extreme dry-spell analysis. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 19, n. 8, p. 1629-1638, 2019.

ROBINSON, Stacy-ann. Climate change adaptation in SIDS: A systematic review of the literature pre and post the IPCC Fifth Assessment Report. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 11, n. 4, p. e653, 2020.

SCHWARTZ, Caily et al. A statistical evaluation of Earth-observation-based composite drought indices for a localized assessment of agricultural drought in Pakistan. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 106, p. 102646, 2022.

SHI, Lijie et al. Assessing future runoff changes with different potential evapotranspiration inputs based on multi-model ensemble of CMIP5 projections. **Journal of Hydrology**, v. 612, p. 128042, 2022.

SILVA, Alexandro Medeiros et al. Modeling the effects of future climate and land-use changes on streamflow in a headwater basin in the Brazilian Caatinga biome. **Geocarto International**, v. 37, n. 26, p. 12436-12465, 2022.

SILVA, Antonio Samuel Alves da et al. Comparison of interpolation methods for spatial distribution of monthly precipitation in the state of Pernambuco, Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 24, n. 3, p. 04018068, 2019.

SIME, Chala Hailu; DIBABA, Wakjira Takala. Evaluation of CMIP6 model performance and extreme precipitation prediction in the Awash basin. **Heliyon**, v. 9, n. 11, 2023.

SONG, Young Hoon; CHUNG, Eun-Sung; SHAHID, Shamsuddin. The new bias correction method for daily extremes precipitation over South Korea using CMIP6 GCMs. **Water Resources Management**, v. 36, n. 15, p. 5977-5997, 2022.

STOCKHAUSE, Martina et al. Cmpip6 data documentation and citation in ipcc's sixth assessment report (ar6). In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**. 2021. p. EGU21-2886.

SU, Buda et al. Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China. **Atmospheric Research**, v. 250, p. 105375, 2021.

SUN, Liqiang et al. Climate variability and corn yields in semiarid Ceará, Brazil. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, n. 2, p. 226-240, 2007.

SUPHARATID, Seree; ARIBARG, Thannob; NAFUNG, Jirawat. Bias-corrected CMIP6 climate model projection over Southeast Asia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 147, p. 669-690, 2022.

TEUTSCHBEIN, Claudia et al. Future drought propagation through the water-energy-food-ecosystem nexus—A Nordic perspective. **Journal of Hydrology**, v. 617, p. 128963, 2023.

VAN LOON, Anne F.; VAN LANEN, Henny AJ. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. **Water Resources Research**, v. 49, n. 3, p. 1483-1502, 2013.

VAN OEL, P.; MARTINS, Eduardo Sávio Passos Rodrigues; COSTA, A. C. The effect of reservoir networks on drought propagation. **European water**, United Kingdom, v. 60, p. 287-292, 2017.

VEETTIL, Anoop Valiya et al. Multiscale hydrological drought analysis: Role of climate, catchment and morphological variables and associated thresholds. **Journal of Hydrology**, v. 582, p. 124533, 2020.

VILASECA, Federico et al. A comparison between lumped and distributed hydrological models for daily rainfall-runoff simulation. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2021. p. 012016.

VERGASTA, Leonardo Alves et al. Avaliação do Balanço de água na Bacia do Rio Madeira Simulado Pelo Modelo Regional Climático Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 153-169, 2021.

WANG, Jin-liang; YU, Yuan-he. Comprehensive drought monitoring in Yunnan Province, China using multisource remote sensing data. **Journal of Mountain Science**, v. 18, n. 6, p. 1537-1549, 2021.

WANG, Ziyao et al. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: A case study of Bortala, China. **Ecological**

**Indicators**, v. 134, p. 108499, 2022.

WILHITE, Donald A.; GLANTZ, Michael H. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. **Planning for drought**, p. 11-27, 2019.

XU, Zhongfeng et al. Bias-corrected CMIP6 global dataset for dynamical downscaling of the historical and future climate (1979–2100). **Scientific Data**, v. 8, n. 1, p. 293, 2021.

ZHANG, Yuanming et al. Challenges and solutions to biodiversity conservation in arid lands. **Science of the Total Environment**, v. 857, p. 159695, 2023.

ZHU, Qinyan et al. Modeling soybean cultivation suitability in China and its future trends in climate change scenarios. **Journal of Environmental Management**, v. 345, p. 118934, 2023.

ZUBAIDI, Salah L. et al. A method for predicting long-term municipal water demands under climate change. **Water Resources Management**, v. 34, p. 1265-1279, 2020.

ZUHRO, Asma; TAMBUNAN, Mangapul Parlindungan; MARKO, Kuswanto. Application of vegetation health index (VHI) to identify distribution of agricultural drought in Indramayu Regency, West Java Province. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2020. p. 012047.