



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GREICY KELLY DA SILVA

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA, DEMANDAS HÍDRICAS E
MUDANÇAS CLIMÁTICAS: O HIDROSSISTEMA JAGUARIBE-
METROPOLITANO, CEARÁ, BRASIL**

FORTALEZA
2024

GREICY KELLY DA SILVA

ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA, DEMANDAS HÍDRICAS E MUDANÇAS
CLIMÁTICAS: O HIDROSSISTEMA JAGUARIBE-METROPOLITANO, CEARÁ,
BRASIL

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

Orientador: Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira.

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)

S58a

Silva, Greicy Kelly da.

Análise da variabilidade climática, demandas hídricas e mudanças climáticas: o Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano, Ceará, Brasil / Greicy Kelly da Silva. – 2024.
225 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira.

1. Jaguaribe-Metropolitano. 2. mudanças climáticas. 3. recursos hídricos. I. Título.

CDD 627

GREICY KELLY DA SILVA

ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA, DEMANDAS HÍDRICAS E MUDANÇAS
CLIMÁTICAS: O HIDROSSISTEMA JAGUARIBE-METROPOLITANO, CEARÁ,
BRASIL

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

Aprovada em: 26/01/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Samiria Maria Oliveira da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luiz Martins de Araújo Junior
Universidade da Integração Internacional da
Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Dr. Domingo Cassain Sales
Fundação Cearense de Meteorologia e
Recursos Hídricos (FUNCEME)

A Deus.

Aos meus pais, Jacinta e Francisco.

Ao meu irmão, Emanuel.

Ao meu avô, Luiz Agostinho (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde e forças para superar todas as dificuldades ao longo desta jornada e por todas as infinitas bênçãos concedidas em minha vida.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais que foram e são os heróis da minha vida me incentivando e me apoiando nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. E ao meu irmão Emanuel, que em muitos momentos de minha ausência, nos ofereceu afeto, ajuda e apoio incondicional. Ao meu inesquecível avô, exemplo de amor e honestidade, figura de grande importância em minha formação e de quem eu sinto imensa saudade. Agradeço também aos tios, tias, primos e primas por sempre torcerem pelo meu sucesso acadêmico e profissional.

Ao meu querido orientador Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira, por ser o mentor deste trabalho além de ter me dado todo o auxílio, incentivo, confiança e paciência. Não tenho palavras para agradecer todo o suporte e principalmente a amabilidade destinada a mim. Agradeço, especialmente, por ter sido escuta nos muitos momentos difíceis pelos quais passei nesta reta final desde a pandemia.

Ao meu querido amigo-irmão Marx Vinicius, ao qual tenho imensa admiração. Obrigada pela paciência, conselhos de vida e por sempre ter me ajudado nos momentos que mais precisei. Sinto uma imensa saudade de trabalhar com uma pessoa tão generosa e comprometida, que inspira todos ao seu redor. Quando eu crescer, quero ser que nem você.

Quero agradecer ao Eduardo (Dudu), Duarte e Marx que compartilharam seus códigos, dados e conhecimentos técnicos comigo. Suas contribuições foram cruciais para superar desafios e avançar em minha pesquisa. Sem a generosidade e expertise de vocês, eu teria enfrentado dificuldades significativamente maiores. E também aos meus amigos Patrícia Queiroz, Luidhy Santana e meus colegas da EEM José de Alencar (Daiana, Eliziane, Elber, Terliane e Márcio) que contribuíram fortemente para o término desta jornada me dando apoio incondicional e deixando meus dias mais leves e divertidos. Agradeço ainda aos colegas que participaram do início da jornada do doutorado: Raimundo, Evaldo, Itamara e Fajr.

Quero agradecer também a ajuda do Clebson do Carmo, profissional ímpar da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos que acolheu todas as minhas dúvidas sobre o SIGA e ofereceu todo o suporte necessário na construção da rede.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado.” (Roberto Shinyashiki)

RESUMO

A água é essencial para a vida na Terra, mas o aumento da demanda devido ao crescimento populacional e desenvolvimento econômico têm pressionado cada vez mais o setor dos recursos hídricos. Mudanças climáticas e econômicas influenciam a disponibilidade e demanda de água, gerando incertezas para o futuro. No Estado do Ceará, a variabilidade das chuvas, rios intermitentes e altas taxas de evaporação aumentam as incertezas e complexidade da gestão hídrica. Dito isso, o objetivo deste estudo foi avaliar os impactos dos fenômenos climáticos e de ações antropogênicas, juntamente com as emissões de gases de efeito estufa no Sistema Jaguaribe-Metropolitano (SJM). Dentre as principais metodologias empregadas neste estudo cita-se: a análise das estatísticas descritivas, das variabilidades sazonal, interanual e decadal e dos Indicadores de Precipitação e de Escoamento Padronizado para séries de precipitação e vazão; a avaliação do comportamento futuro da demanda hídrica em cenários de crescimento populacional, industrial e da irrigação utilizando um modelo de crescimento exponencial; a avaliação dos padrões de variação da precipitação, vazão e temperatura a partir de dados dos modelos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) em relação a dados observados – provenientes do *Global Precipitation Climatology Centre* e *Climatic Research Unit*, bem como as análises das projeções e seus possíveis impactos associados com as mudanças climáticas considerando os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5; a avaliação do impacto das mudanças climáticas na disponibilidade de água no SJM em um Sistema de Informação para Gerenciamento da Alocação de Água (SIGA) a partir de dados dos modelos CMIP6, considerando períodos presente e futuro para os cenários supracitados. Nas análises supramencionadas, constatou-se que eventos extremos de secas e chuvas já são uma realidade e que podem se tornar cada vez mais frequentes nas próximas décadas. Adicionalmente, ao analisar o comportamento das fases das oscilações climáticas do Oceano Pacífico e do Atlântico, foi observada a influência desses eventos e da temperatura da superfície do mar na variação dos padrões de precipitação no estado do Ceará. Ao examinar as projeções do modelo ETS para a demanda hídrica em diferentes cenários, foi constatada uma semelhança significativa nos resultados em alguns setores e bacias. As projeções apontaram ainda um aumento contínuo da demanda consuntiva ao longo do tempo para algumas delas. As mudanças climáticas, por sua vez, terão implicações significativas nas últimas três décadas do século XXI, especialmente em um cenário de altas emissões de gases de efeito estufa, exigindo esforços de mitigação. O modelo SIGA destacou-se com sólido desempenho na simulação dos volumes mensais do sistema hídrico. Variações nos níveis dos reservatórios ao longo das décadas foram

observadas, com momentos de escassez intercalados por períodos de disponibilidade, levantando preocupações sobre o abastecimento de água. Os modelos do CMIP6 revelaram variações significativas no volume útil dos reservatórios, destacando a sensibilidade de alguns modelos a diferentes cenários. Simulações sob cenários futuros SSP2-4.5 e SSP5-8.5 indicaram variações significativas nos volumes úteis e atendimento de demandas, destacando a importância de considerar múltiplos fatores na gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Jaguaribe-Metropolitano; mudanças climáticas; recursos hídricos.

ABSTRACT

Water is essential for life on Earth, but increasing demand due to population growth and economic development has increasingly pressured the water resources sector. Climate and economic changes influence water availability and demand, creating uncertainties for the future. In the State of Ceará, rainfall variability, intermittent rivers, and high evaporation rates increase uncertainties and complexity in water management. That said, the objective of this study was to assess the impacts of climatic phenomena and anthropogenic actions, along with greenhouse gas emissions, on the Jaguaribe-Metropolitano System (JMS). Among the main methodologies employed in this study are descriptive statistics analysis, seasonal, interannual, and decadal variabilities, Standardized Precipitation and Runoff Indices for precipitation and flow series; the evaluation of future water demand behavior in scenarios of population, industrial, and irrigation growth using an exponential growth model; the assessment of precipitation, flow, and temperature variation patterns using data from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) models compared to observed data from the Global Precipitation Climatology Centre and Climatic Research Unit. Additionally, analyses of projections and their possible impacts associated with climate change were considered, considering scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5; the evaluation of the impact of climate change on water availability in the JMS using a Water Allocation Management Information System (SIGA) based on CMIP6 model data, considering present and future periods for the aforementioned scenarios. In the analyses mentioned above, it was found that extreme drought and rainfall events are already a reality and may become more frequent in the coming decades. Additionally, analyzing the phases of Pacific and Atlantic Ocean climate oscillations revealed their influence, along with sea surface temperature, on precipitation patterns in the state of Ceará. Examining ETS model projections for water demand in different scenarios revealed significant similarities in results in some sectors and basins. Projections also indicated a continuous increase in consumptive demand over time for some areas. Climate change will have significant implications in the last three decades of the 21st century, especially under high greenhouse gas emission scenarios, necessitating mitigation efforts. The SIGA model stood out with a solid performance in simulating monthly volumes of the water system. Variations in reservoir levels over decades were observed, with periods of scarcity interspersed with availability, raising concerns about water supply. CMIP6 models revealed significant variations in reservoir storage, highlighting the sensitivity of some models to different scenarios. Simulations under future scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 indicated significant variations in

storage volumes and demand fulfillment, emphasizing the importance of considering multiple factors in water resources management.

Keywords: Jaguaribe-Metropolitano; climate change; water resources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da RHBM e das bacias dos reservatórios Banabuiú, Castanhão e Orós.	36
Figura 2 - Boxplot da precipitação média mensal proveniente dos dados da FUNCEME para o período de 1975 a 2020.	45
Figura 3 - TSO de Morlet da série temporal de precipitação do Banabuiú (a) Série temporal da Precipitação Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.	48
Figura 4 - TSO de Morlet da série temporal de precipitação do Castanhão (a) Série temporal da Precipitação Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.	49
Figura 5 - TSO de Morlet da série temporal de precipitação do Orós (a) Série temporal da Precipitação Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.	50
Figura 6 - TSO de Morlet da série temporal de precipitação da RHBM (a) Série temporal da Precipitação Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.	51
Figura 7 - TSO de Morlet da série temporal de Vazão do Banabuiú (a) Série temporal da Vazão Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.	52
Figura 8 - TSO de Morlet da série temporal de Vazão do Castanhão (a) Série temporal da Vazão Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.	53
Figura 9 - TSO de Morlet da série temporal de Vazão do Orós (a) Série temporal da Vazão Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.	54
Figura 10 - TSO de Morlet da série temporal de Vazão da RHBM (a) Série temporal da Vazão Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.	55
Figura 11 - Anomalias da TSM referente ao ONI de 2015-2018. As linhas nas cores vermelho e azul são os limiares positivos e negativos, respectivamente.	56

Figura 12 - Anomalia da TSM referente ao TNAI e TSAI, para o trimestre MAM nos anos a)1972 b)1975 c)1982 d)1988 e)1998 f)2007 g)2015 e h)2018. De acordo com a média climatológica trimestral de MAM de 1891 a 2019. Unidade em °C.	60
Figura 13 - Anomalia da TSM referente a região NINO3.4, para o trimestre MAM nos anos a)1972 b)1975 c)1982 d)1988 e)1998 f)2007 g)2015 e h)2018. De acordo com a média climatológica trimestral de MAM de 1891 a 2019. Unidade em °C.	61
Figura 14 - Distribuição espacial de anomalias de precipitação no Ceará e nas bacias dos reservatórios Banabuiú, Castanhão, Orós e na RHBM em a)1972 b)1975 c)1982 d)1988 e)1998 f)2007 g)2015 e h)2018.....	62
Figura 15 - Índice SPI na escala SPI-12 para a) Banabuiú b) Castanhão c) Orós e d) RHBM, no período de 1975 a 2020.....	63
Figura 16 - Índice SPI na escala SPI-24 para a) Banabuiú b) Castanhão c) Orós e d) RHBM, no período de 1975 a 2020.....	64
Figura 17 - Índice SRI na escala SRI-12 para a) Banabuiú b) Castanhão c) Orós e d) RHBM, no período de janeiro de 1975 a dezembro de 2022.	66
Figura 18 - Índice SRI na escala SRI-24 para a) Banabuiú b) Castanhão c) Orós e d) RHBM, no período de janeiro de 1975 a dezembro de 2022.	66
Figura 19 - Mapa de localização das bacias dos reservatórios representativos do Sistema Jaguaribe-Metropolitano.	76
Figura 20 - Cenários de projeções de demandas consuntivas anuais para o setor da Irrigação em a) Aracoiaba b) Banabuiú c) Castanhão d) Gavião e) Orós f) Pacajus g) Pacoti e h) Riachão, para o período de 2018 a 2050.....	82
Figura 21 - Cenários de projeções de demandas consuntivas anuais para o setor de Abastecimento Humano em a) Aracoiaba b) Banabuiú c) Castanhão d) Gavião e) Orós f) Pacajus g) Pacoti e h) Riachão, para o período de 2018 a 2050.....	85
Figura 22 - Cenários de projeções de demandas consuntivas anuais para o setor da Indústria em a) Aracoiaba b) Banabuiú c) Castanhão d) Gavião e) Orós f) Pacajus g) Pacoti e h) Riachão, para o período de 2018 a 2050.....	88
Figura 23-Esquemática do funcionamento do modelo SMAP mensal.	98
Figura 24 - Emissões anuais futuras de CO2 de acordo com os cinco cenários SSP.....	102
Figura 25 - Diagrama de Taylor com os valores de Correlação, Desvio Padrão (mm) e Raiz do Erro Quadrático Médio (mm) para cada modelo participante do CMIP6 em relação a precipitação observada do GPCC para (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f)Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão. O círculo vazio no eixo das abcissas representa o conjunto de observações.....	107
Figura 26 - Gráfico boxplot da precipitação média anual considerando a série de dados do GPCC e os modelos participantes do CMIP6 para o período de 1891 a 2014 para (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão.	109

Figura 27 - Precipitação climatológica do GPCC e dos modelos do CMIP6 para (A) Aracoiaba (B) Banabuiú (C) Castanhão (D) Gavião (E) Orós (F) Pacajus (G) Pacoti (H) Riachão.....	112
Figura 28 - Medianas (%) das Anomalias de precipitações médias anuais do conjunto de modelos do CMIP6 para as bacias Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão para os cenários SSP2-4.5 (barra hachurada) e SSP5-8.5 (barra em cor cinza).	113
Figura 30 - Tendência da precipitação (mm ano-1) para o período de 2015 a 2100 em Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão para os cenários a) SSP2-4.5 e b) SSP5-8.5.....	116
Figura 31 - Medianas (%) das Anomalias de vazões médias anuais do conjunto de modelos do CMIP6 para Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão para os cenários SSP2-4.5 (barra hachurada) e SSP5-8.5 (barra em cor cinza).....	117
Figura 32 - Anomalias (%) de vazões médias anuais dos modelos do CMIP6 para (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão para os cenários SSP2-4.5 (barra hachurada) e SSP5-8.5 (barra em cor cinza).....	119
Figura 33 - Tendência da vazão (m ³ /s.ano) para o período de 2015 a 2100 em Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão para os cenários a) SSP2-4.5 e b) SSP5-8.5.....	120
Figura 34 - Medianas (°C) das Anomalias de vazões médias anuais do conjunto de modelos do CMIP6 para Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão para os cenários SSP2-4.5 (barra hachurada) e SSP5-8.5 (barra em cor cinza).....	122
Figura 35 - Anomalias (°C) das temperaturas médias anuais dos modelos do CMIP6 para as bacias (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão para os cenários SSP2-4.5 (barra hachurada) e SSP5-8.5 (barra em cor cinza).	123
Figura 36 - Tendência da temperatura (°C ano-1) para o período de 2015 a 2100 em Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão para os cenários a) SSP2-4.5 e b) SSP5-8.5.....	124
Figura 37 - Desenho esquemático da rede de fluxo do Sistema Jaguaribe-Metropolitano....	137
Figura 38 – Comparação entre os volumes simulados e observados no Sistema Hídrico Jaguaribe Metropolitano, no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2022.....	140
Figura 39 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório de Aracoiaba no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.....	140
Figura 40 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório de Banabuiú no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.....	142
Figura 41 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório do Castanhão no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.	143
Figura 42 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório do Gavião no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.	144

Figura 43 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório do Orós no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.	145
Figura 44 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório de Pacajus no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.....	146
Figura 45 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório de Pacoti no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.....	147
Figura 46 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório do Riachão no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.....	147
Figura 47 - Garantias de oferta hídrica associadas a diferentes valores de vazão dos reservatórios (a) Aracoíaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão.	150
Figura 48 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório de Aracoíaba no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.	153
Figura 49 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório de Banabuiú no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.	155
Figura 50 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório do Castanhão no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.	157
Figura 51 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Gavião no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.	159
Figura 52 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório do Orós no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.....	161
Figura 53 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório de Pacajus no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.	163
Figura 54 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório do Pacoti no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.....	164
Figura 55 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Riachão no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.....	166
Figura 56 - Garantias de oferta hídrica associadas a diferentes valores de vazão para todos os modelos (BCC-CSM2-RM, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0) nos reservatórios (a) Aracoíaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão.	168

Figura 57 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório de Aracoiaba no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050.....	170
Figura 58 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Banabuiú no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050.	172
Figura 59 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Castanhão no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050.	175
Figura 60 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Gavião no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050.	177
Figura 61 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Orós no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050.....	180
Figura 62 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório de Pacajus no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050.	182
Figura 63 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório de Pacoti no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050.....	183
Figura 64 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Riachão no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050.....	185
Figura 65 - Garantias de oferta hídrica associadas a diferentes valores de vazão para todos os modelos (BCC-CSM2-RM, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0) nos reservatórios (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão no cenário SSP2-4.5.....	187
Figura 66 - Garantias de oferta hídrica associadas a diferentes valores de vazão para todos os modelos (BCC-CSM2-RM, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0) nos reservatórios (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão no cenário SSP5-8.5.....	188

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Eventos ENOS durante os regimes das fases quentes (+) e frias (-) da ODP e OMA.	41
Tabela 2 - Associação entre os valores de SPI e as categorias de umidade/seca.....	42
Tabela 3 - Classificação de secas a partir dos valores de SRI.	43
Tabela 4 - Pluviosidade Máxima, Média e Mínima diária para Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM.	44
Tabela 5 - Pluviosidade Máxima, Média e Mínima mensal para Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM.	44
Tabela 6 - Estatística das Precipitações Anuais em Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM.	44
Tabela 7 - Informações contendo aspectos físicos e climáticos das bacias hidrográficas representativas do sistema Jaguaribe-Metropolitano.	77
Tabela 8 – Taxa média de crescimento anual (%) das demandas consuntivas no setor da Irrigação para os reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano.....	83
Tabela 9 - Taxa média de crescimento anual (%) das demandas consuntivas no setor do Abastecimento Humano para os reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano....	86
Tabela 10 - Taxa média de crescimento anual (%) das demandas consuntivas no setor da Indústria para os reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano.	89
Tabela 11 - Modelos globais do Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) utilizados e suas respectivas instituições/agências / países de origem e resolução espacial. .	100
Tabela 12 - Volumes máximos e mínimos dos reservatórios que compõe o Sistema Jaguaribe-Metropolitano.	133
Tabela 13 - Valores totais de demanda hídrica (m ³ /s), por estrutura física de fornecimento de água, do Sistema Jaguaribe-Metropolitano.	134
Tabela 14 - Valores das demandas de referência (m ³ /s) referentes aos centros de demanda, por estrutura física de fornecimento de água, do Sistema Jaguaribe-Metropolitano.....	135
Tabela 15 - Classificação de prioridades definidas para as demandas do Sistema Jaguaribe-Metropolitano.	138
Tabela 16 - Percentual de atendimento no tempo (Atendimento Total (100%), Atendimento Parcial (0-100%) e Não Atendimento (0%)) das demandas de abastecimento humano e irrigação pelo reservatório de Aracoiaba para os modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0.....	152
Tabela 17 - Percentual de atendimento no tempo (Atendimento Total (100%), Atendimento Parcial (0-100%) e Não Atendimento (0%)) das demandas de abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação pelo reservatório de Aracoiaba para o modelo BCC-CSM2-	

MR.	154
Tabela 18 - Percentual de atendimento no tempo (Atendimento Total (100%), Atendimento Parcial (0-100%) e Não Atendimento (0%)) das demandas de abastecimento humano e irrigação pelo reservatório do Orós para o modelo BCC-CSM2-MR.	160
Tabela 19 - Informações de Início, Fim, Duração, SPI Médio e Categoria dos eventos de seca de maior duração, durante os anos de 1975 e 2020, na escala SPI-12 para as bacias Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM.	214
Tabela 20 Informações de Início, Fim, Duração, SPI Médio e Categoria dos eventos de seca de maior duração, durante os anos de 1975 e 2020, na escala SPI-24 para as bacias Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM.	222
Tabela 21 - Informações de Início, Fim, Duração, SRI Médio e Categoria dos eventos de seca de maior duração na escala SRI-12 para as bacias Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM. ...	223
Tabela 22 - Informações de Início, Fim, Duração, SRI Médio e Categoria dos eventos de seca de maior duração na escala SRI-24 para as bacias Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM. ...	224
Tabela 23 - Parâmetros calibrados do modelo SMAP mensal.....	225
Tabela 24 - Valores do coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe e coeficiente de correlação de Pearson para as séries calibradas e validadas.	225

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIC	<i>Akaike's Information Criterion</i>
ANA	Agência Nacional das Águas
APA	Área de Proteção Ambiental
APP	Área de Preservação Permanente
ATN	Atlântico Tropical Norte
AR	Autoregressão
AR6	<i>Sixth Assessment Report</i>
ARIMA	<i>Autoregressive Integrated Moving Average</i>
BESF	Bacia Estendida do Rio São Francisco
BIC	Schwarz's Bayesian Information Criterion
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CE	Estado do Ceará
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i>
CRU	<i>Climatic Research Unit</i>
CV	Coefficiente de Variação
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DP	Dipolo Positivo
DN	Dipolo Negativo
DV	Desvio Padrão
ENOS	El Niño Oscilação Sul
ETP	Evapotranspiração Potencial
ETS	<i>Exponential Smoothing State Space Model</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GEE	Gases do Efeito Estufa
GPCC	<i>Global Precipitation Climatology Centre</i>
I	Ordem De Diferenciação
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MA	Ordem de Média Móvel
MAM	Março-Abril-Maio
MapBiomass	Projeto Brasileiro de Mapeamento Anual de Uso e Cobertura do Solo
MCG	Modelos Climáticos Globais
MK	Mann-Kendall
NEB	Nordeste do Brasil
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NSE	Eficiência de Nash-Sutcliffe
OA	Oceano Atlântico
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
OL	Ondas de Leste
OMA	Oscilação Multidecadal do Atlântico
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
ONI	<i>Oscillation Niño Index</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
OP	Oceano Pacífico Equatorial
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PDSI	Índice de Precipitação de Palmer
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
PRODETURIS	Programa de Desenvolvimento do Turismo em Zona Prioritária do Litoral do Ceará
R	Coeficiente de Correlação de Pearson
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
SIGA	Sistema de Informação para Gerenciamento da Alocação de Água
SMAP	<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>
SPI	<i>Standardized Precipitation Index</i>
ST	Séries Temporais
SRI	<i>Standardized Precipitation Index</i>
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

TAS	Temperatura do Ar próximo à Superfície
TNAI	Atlântico Tropical Norte
TSAI	Atlântico Tropical Sul
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
TSO	Transformada Simples em Ondaleta
UCS	Uso e Cobertura do Solo
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Alto Nível
WCRP	<i>World Climate Research Program</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	24
1.1	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS.....	28
1.2	OBJETIVO GERAL.....	29
1.3	QUESTÃO CIENTÍFICA.....	30
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	30
2	ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DAS BACIAS METROPOLITANAS E NAS BACIAS DOS RESERVATÓRIOS BANABUIÚ, CASTANHÃO E ORÓS	32
2.1	INTRODUÇÃO	32
2.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
2.2.1	Região de Estudo	35
2.2.2	Dados utilizados.....	37
2.2.3	Estatísticas descritivas.....	38
2.2.4	Variabilidade sazonal.....	39
2.2.5	Variabilidades interanual e decadal.....	39
2.2.6	Variabilidade Interdecadal e Multidecadal do clima associada a eventos ENOS	40
2.2.7	SPI e SRI.....	41
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
2.3.1	Análise das estatísticas descritivas	44
2.3.1.1	Regime pluvial	44
2.3.1.2	Análise da variabilidade sazonal	45
2.3.1.3	Análise da variabilidade interanual, decadal e tendência	46
2.3.1.3.1	<i>Precipitação</i>	<i>46</i>
2.3.1.3.2	<i>Vazão.....</i>	<i>51</i>
2.3.1.3.3	<i>Eventos associados de ENOS, ODP e OMA.....</i>	<i>56</i>
2.3.1.4	Análise do SPI e SRI	63
2.4	CONCLUSÃO	69
3	ANÁLISE DA DEMANDA HÍDRICA NOS SETORES DE IRRIGAÇÃO, ABASTECIMENTO HUMANO E INDÚSTRIA NO HIDROSSISTEMA JAGUARIBE: PERSPECTIVAS PARA O FUTURO.....	71
3.1	INTRODUÇÃO	71
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	75
3.2.1	Área de estudo	75
3.2.2	Dados utilizados.....	77
3.2.3	Modelos estatísticos para previsão de crescimento da demanda hídrica.....	78
3.2.3.1	Modelo ETS.....	78

3.2.4	Cenários de demandas consuntivas.....	80
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	80
4	AVALIAÇÃO DAS PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS RESERVATÓRIOS QUE CONSTITUEM O SISTEMA JAGUARIBE- METROPOLITANO.....	93
4.1	INTRODUÇÃO.....	93
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	96
4.2.1	Região de estudo.....	96
4.2.2	Dados utilizados.....	96
4.2.2.1	Dados observacionais.....	96
4.2.2.2	Modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure).....	97
4.2.2.3	Projeto Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6).....	100
4.2.2.3.1	<i>Cenários de projeção de emissões de Gases de Efeito Estufa.....</i>	<i>101</i>
4.2.3	Correção estatística.....	102
4.2.4	Análise das projeções.....	104
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	106
4.3.1	Avaliação dos Modelos.....	106
4.3.1.1	Avaliação dos modelos do CMIP6.....	106
4.3.1.2	Análise da Precipitação no período histórico.....	108
4.3.2	Análise das projeções.....	113
4.3.2.1	Precipitação.....	113
4.3.2.2	Vazão.....	117
4.3.2.3	Temperatura.....	121
4.4	CONCLUSÃO.....	126
5	IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO SISTEMA JAGUARIBE- METROPOLITANO.....	129
5.1	INTRODUÇÃO.....	129
5.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	132
5.2.1	Dados utilizados.....	132
5.2.1.1	Oferta.....	132
5.2.1.1.1	<i>Vazões.....</i>	<i>132</i>
5.2.1.1.2	<i>Evaporação e Cota-Área-Volume.....</i>	<i>133</i>
5.2.1.1.3	<i>Volumes máximos e mínimos.....</i>	<i>133</i>
5.2.2	Demandas.....	133
5.2.3	Sistema de Informação para Gerenciamento da Alocação de Água (SIGA) ...	136
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	139
5.3.1	Simulação no SIGA utilizando dados observacionais para o século XX.....	139

5.3.1.1	Avaliação do modelo SIGA.....	139
5.3.1.2	Volume hídrico dos reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano	140
5.3.1.2	Garantia da oferta hídrica	148
5.3.2	Simulação utilizando modelos do CMIP6 para o século XX.....	151
5.3.2.1	Volume hídrico dos reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano	152
5.3.2.2	Garantia da oferta hídrica	167
5.3.3	Simulação utilizando modelos do CMIP6 para o século XXI	169
5.3.3.1	Volume hídrico dos reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano	169
5.4	CONCLUSÃO	190
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	192
	REFERÊNCIAS	195
	ANEXOS	208
	APÊNDICES	212

1 INTRODUÇÃO GERAL

A água é um recurso natural que torna possível a vida no planeta Terra, sendo indispensável para sobrevivência do homem e ecossistemas. É sabido que o mundo está em constante mudança, a qual se associa a processos de âmbitos social e natural em escala global que condicionam e transformam a realidade local como, por exemplo, o crescimento da população, a globalização e as mudanças climáticas que evidenciam que alterações estão ocorrendo rapidamente em escala planetária (IPCC, 2021; Fernandes *et al.*, 2019; Steffen *et al.*, 2018). Além disso, a crescente demanda por água devido ao aumento populacional e ao desenvolvimento econômico tem levado a uma pressão crescente sobre os recursos hídricos disponíveis. A gestão sustentável da água tornou-se uma preocupação importante em todo o mundo, especialmente em áreas onde a escassez de água já é uma realidade, e a compreensão das mudanças climáticas e seus efeitos sobre os recursos hídricos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação (United Nations, 2021; IPCC, 2021; Hoekstra; Mekonnen, 2012).

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), a escassez de água e as mudanças nos recursos hídricos têm impactos significativos em diversas esferas (ONU, 2017). A falta de água e as secas afetam principalmente os setores da agricultura, silvicultura, energia e abastecimento de água potável (WHO, 2008). As atividades que dependem intensamente do uso de água, como agricultura irrigada e geração de energia hidrelétrica, por exemplo, sofrem com a alteração dos regimes de fluxo e redução anual da disponibilidade de água (IPCC, 2014). Além disso, a ameaça às zonas úmidas e ecossistemas aquáticos afeta os setores que dependem dos bens e serviços que eles fornecem, tais como a regulação hídrica, a purificação da água, o habitat para fauna e flora, entre outros (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Quando essas áreas são ameaçadas ou degradadas, esses bens e serviços são afetados, o que pode prejudicar os setores que dependem deles, como, por exemplo, a pesca e o turismo de natureza (WWF, 2018). Dessa forma, as consequências das mudanças nos recursos hídricos afetam vários setores econômicos de maneira significativa (FAO, 2018).

A oferta e demanda por água são condicionadas pela mudança do clima e da economia, que proporcionam incertezas associadas ao futuro. Para o Estado do Ceará, estas incertezas são marcadas principalmente pela variabilidade espaço-temporal do regime de chuvas, a predominância de rios intermitentes e as altas taxas de evaporação da água (Cid, 2017). Nesse contexto, surge a gestão adaptativa que além de orientar ações a serem tomadas no ambiente de complexidade e incerteza, promovendo, portanto, instrumentos como a

prospecção estratégica (Godet, 1991; 2012) e o planejamento baseado em cenários (Van Der Heijden, 2005), tem como um dos seus principais objetivos proporcionar a segurança hídrica.

Atuando nos níveis micro e macro da sociedade, a segurança hídrica se constitui como base para o desenvolvimento das seguranças alimentar, energética e ambiental e requer a colaboração interdisciplinar, de forma a construir e legitimar um modelo de gestão de recursos hídricos (UNESCO, 2014). No processo de escolha e configuração dos instrumentos dessa gestão, faz-se necessário reconhecer os padrões de variabilidade climáticas concernentes a cada região hidrográfica, bacia ou local de estudo. Essa variabilidade associa-se ao grau de severidade dos eventos extremos de secas e inundações (IPCC, 2014). Dessa forma, o estudo das mudanças climáticas torna-se relevante para o setor de recursos hídricos uma vez que possibilita a compreensão das modificações do padrão médio de ocorrência dos processos hidrológicos e seus modos de variação e afeta a configuração dos instrumentos de gestão, tais como, a outorga de direito de uso (WMO, 2016).

A outorga está prevista na Lei 9433/97 e, apresenta-se sensível aos modos de variabilidade climática, pois o volume outorgável está diretamente associado ao regime de vazões (BRASIL, 1997). As demandas para atividades de irrigação e abastecimento urbano também se apresentam sensíveis quanto a modificações nas variáveis climáticas, tais como a temperatura (Lima *et al.*, 2015). Eventos extremos, tais como secas, por exemplo, também interferem na (re)alocação e transferência dos recursos hídricos entre os diversos setores usuários (UNESCO, 2014).

No contexto da gestão dos recursos hídricos, compreender os processos hidrológicos e seu comportamento é um dos maiores desafios na hidrologia (Pereira, 2017). Conforme ressalta Tucci (2001), é preciso entender a dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas, levando em conta as interações entre a água, o solo, a vegetação e a atmosfera, para promover uma gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos. Além disso, segundo Cunha (2013), é fundamental monitorar o comportamento dos sistemas naturais, como as bacias hidrográficas, para prever sua resposta a eventos extremos e mudanças no uso do solo. Esse monitoramento pode ser realizado por meio da análise das variáveis hidrológicas, como precipitação, evapotranspiração, vazão, entre outras, e da compreensão das interações entre elas.

O hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano, localizado no estado do Ceará, é um exemplo de sistema hídrico que tem sido objeto de diversos estudos hidrológicos e de gestão de recursos hídricos (Estácio, 2020; Ribeiro; Lopes; Freitas, 2019; Araújo; Oliveira; Carvalho, 2018; Lira *et al.*, 2018; Souza Filho *et al.*, 2016; Souza Filho, 2018; Sabóia, 2016; Cid, 2017;

Silveira, 2014; Pinheiro, 2013; Gondim, 2009). Essa região é responsável por suprir as demandas hídricas de mais de 4 milhões de habitantes, incluindo a capital do estado, Fortaleza, e cidades adjacentes.

Nesse sentido, diversas pesquisas foram conduzidas com o propósito de examinar os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos na região em foco deste trabalho. Alguns destes estudos utilizaram os resultados provenientes dos cenários e modelos de circulação geral utilizados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Essas abordagens incluíram desde a integração desses resultados em modelos hidrológicos, bem como a criação de cenários hipotéticos para simular possíveis impactos das alterações climáticas.

Gondim (2009), por exemplo, avaliou os impactos das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação na Bacia do Jaguaribe, no Ceará, utilizando o sistema integrado de modelagem regional *Providing Regional Climates for Impacts Studies* (PRECIS) com o modelo climático regional *Hadley Regional Model 3, with Providing Regional Climates for Impacts Studies* (HadRM3P). Foram empregadas climatologias de 1961 a 1990 e projeções climáticas futuras. O método de Penman-Monteith foi utilizado para estimar a evapotranspiração de referência. As mudanças climáticas projetadas indicaram aumento na demanda de água para irrigação devido ao aumento da evapotranspiração e à redução da precipitação pluvial. O aumento da necessidade hídrica bruta média foi estimado em 30% a 31% para 2040, conforme cenários do Quarto Relatório de Avaliação (AR4).

Sabóia (2016), por sua vez, avaliou o impacto dos cenários de mudanças climáticas em sistemas de drenagem urbana em uma sub-bacia do Rio Cocó, em Fortaleza, Ceará. Utilizou dados de precipitação de seis modelos de circulação global do CMIP5 e os extrapolou para a cidade. Projetou novas equações de intensidade-duração-frequência (IDF) usando o Método da Correspondência de Quantis Equidistantes com base nas projeções RCP4.5 e RCP8.5. Essas projeções foram inseridas no programa *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) para calcular vazão e volume escoado. Os resultados indicaram grandes aumentos nas vazões e volumes escoados, com o cenário RCP8.5 apresentando valores mais elevados do que o RCP4.5.

Silveira (2014) desenvolveu um sistema de planejamento em múltiplas escalas temporais e espaciais, aplicando-o ao setor elétrico brasileiro e ao sistema Jaguaribe-Metropolitano do Estado do Ceará. O estudo considerou escalas temporais de curtíssimo prazo, curto prazo e médio/longo prazo. O autor utilizou simulações de precipitação de modelos atmosféricos para prever vazões de curtíssimo prazo, modelos estocásticos e estatísticos para o curto prazo, e dados do CMIP5 para o longo prazo. O sistema de previsão numérica demonstrou

eficiência na detecção de chuvas de menor intensidade, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil.

O relatório do Projeto FORTALEZA 2040 trouxe os dados de vazões futuras produzidos no trabalho de Silveira (2014) para a região do Jaguaribe e Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e considerou três modelos climáticos globais do CMIP5 para o cenário de forçante radioativa RCP4.5 (Souza Filho *et al.*, 2016). Além disso, propôs, de forma *ad hoc*, cenários de demandas futuras para as regiões supracitadas com base no crescimento populacional de Fortaleza e no consumo per capita de água pela população da RMF. Para a Região do Jaguaribe, consideraram os cenários de demandas constantes, crescimento anual de 1% e a adoção do cenário proposto pela ANA para 2025 como estimativa para 2040. A operação e simulação do sistema de abastecimento foram realizadas no modelo Acquanet desenvolvido pelo laboratório de Sistema de Apoio à Decisão da Escola Politécnica da USP. As simulações mostraram os níveis críticos dos reservatórios, bem como as falhas e os riscos associadas ao abastecimento de Fortaleza para os diferentes cenários de demandas levantados.

No projeto CEARÁ 2050, o estudo setorial apresentou um balanço hídrico das Regiões Hidrográficas do Ceará utilizando as informações do Pacto das Águas (Souza Filho, 2018). Como resultados, as Regiões Hidrográficas Metropolitanas e Baixo Jaguaribe apareceram em situação de maior estresse hídrico. A bacia do Acaraú também se mostrou em situação de estresse. Observou-se a bacia do Alto Jaguaribe em situação confortável aparente, uma vez que a parcela significativa da oferta se localiza no Reservatório Orós, no exutório desta região hidrográfica.

Mais recentemente, Estácio (2020) propôs uma estratégia de regionalização baseada no método *K-Nearest-Neighbor* para avaliar o impacto das incertezas associadas aos parâmetros de modelos hidrológicos e mudanças climáticas na disponibilidade hídrica do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano, no Ceará, utilizando oito Modelos Climáticos Globais (MCGs) do projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados fase 6 (CMIP6) para representar o clima futuro. A regionalização permitiu calcular vazões com NSE de 0.67. Metade dos GCMs projetou aumento significativo da disponibilidade hídrica para 2021-2050, enquanto a outra metade previu diminuição ou manutenção.

De acordo com Souza Filho (2018), a região abrangida pelo hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano apresenta uma complexa rede hidrográfica, com uma grande variação espacial e temporal nas precipitações e nos regimes de vazão. Portanto, o estudo dessas variáveis e suas interações é essencial para a formulação de políticas públicas que visem

garantir a disponibilidade hídrica para as diversas demandas, como a irrigação e o abastecimento urbano.

1.1 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS

O sistema hídrico de uma região, é condicionado pelo clima, relevo, tipo de solo, uso e ocupação do solo, entre outras características locais (Serreti; Martins; Alves, 2015; Montenegro *et al.*, 2019). A cobertura vegetal também desempenha um papel fundamental no ciclo hidrológico, influenciando o balanço hídrico e a disponibilidade de água (Albuquerque *et al.*, 2018). Além disso, a urbanização e a ocupação desordenada das áreas próximas aos corpos d'água podem ter impactos negativos no sistema hídrico local, como o aumento do escoamento superficial e a diminuição da infiltração de água no solo (Coutinho *et al.*, 2017).

Ressalta-se que o estado das variáveis que constituem o ciclo hidrológico é determinado também, em parte, pela combinação dos fenômenos meteorológicos em multiescalas, que condicionam os modos de variação dos regimes de vazões, precipitações, entre outras variáveis (Silveira, 2019). De outra forma, a retirada da cobertura vegetal do solo, agravada por atividades como agropecuária, por exemplo, contribui para impermeabilização dos solos, que de acordo com Marengo *et al.* (2009), é um dos fatores que influencia diretamente no ciclo hidrológico, gerando menos infiltração, aumento do escoamento superficial e a ocorrência de eventos extremos. Assim, a compreensão das interações entre as variáveis hidrológicas e meteorológicas é fundamental para a gestão sustentável dos recursos hídricos em uma determinada bacia hidrográfica, especialmente em regiões onde há uma alta demanda por água, como é o caso do Nordeste brasileiro.

Dito isso, o presente estudo se destaca ao introduzir contribuições científicas e técnicas inovadoras na análise dos recursos hídricos na região em foco. Diferenciando-se dos estudos anteriores, esta pesquisa incorporou dados provenientes do CMIP6, ampliando o leque de modelos e cenários climáticos considerados. A inclusão do CMIP6 possibilitou uma análise mais robusta das projeções climáticas, considerando as últimas atualizações e avanços na modelagem climática. Uma outra inovação relevante foi a utilização de dados de calibração atualizados, baseados nas vazões mais recentes disponibilizadas pela COGERH (2022). Isso contribuiu para uma modelagem mais precisa, alinhada com as condições hidrológicas mais recentes da região, superando as limitações observadas nos estudos anteriores.

Ao contrário dos estudos anteriores que adotaram abordagens mais arbitrárias na projeção de demanda, esta pesquisa implementou uma metodologia fundamentada em séries

temporais. A análise de tendências e padrões históricos permitiu uma projeção mais precisa das demandas futuras, considerando as complexidades e dinâmicas do sistema hídrico. Destaca-se também a implementação de uma operação atualizada da rede, levando em consideração restrições físicas, novas demandas e os parâmetros atualizados dos reservatórios. A integração do Sistema de Informação para Gerenciamento da Alocação de Água (SIGA) proporcionou uma gestão mais eficiente, considerando múltiplos aspectos, como demandas crescentes e mudanças nas condições hidrológicas. Além disso, como contribuição técnico-científica, sugere-se o desenvolvimento de uma ferramenta/metodologia que integre a análise de impactos atuais e futuros na disponibilidade hídrica do sistema Jaguaribe-Metropolitano.

Dessa forma, o reconhecimento das complexas interações entre os elementos do sistema hídrico, aliado às contribuições específicas desta pesquisa, pode fornecer uma base sólida para a tomada de decisões na gestão dos recursos hídricos na região do Nordeste brasileiro, mais especificamente no Estado do Ceará. Essa compreensão mais aprofundada das dinâmicas locais é essencial para a formulação e implementação eficaz de políticas públicas que visem garantir a disponibilidade hídrica para diversas demandas, desde a irrigação até o abastecimento urbano, em um cenário de uma rede hidrográfica com complexidade técnica-política (Souza Filho, 2018).

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo é analisar o impacto do crescimento populacional, industrial e de irrigação, juntamente com as emissões de gases de efeito estufa, nas condições hídricas do hidrossistema Jaguaribe Metropolitano. Além disso, busca-se avaliar como as mudanças climáticas afetarão a disponibilidade hídrica do sistema em diferentes cenários, tanto no presente quanto no futuro, com o objetivo de contribuir para o aprimoramento do processo de planejamento e programação da operação desse sistema.

1.3 QUESTÃO CIENTÍFICA

Partindo do que foi exposto anteriormente, levantaram-se as seguintes questões científicas:

- a) qual é a relação entre as séries temporais de precipitação e vazão e fenômenos atmosféricos, tais como *El Niño*, *La Niña*, TSM Pacífico e Dipolo Atlântico, nas principais bacias do hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano? E como a variabilidade interanual e decadal afeta o regime de precipitação nas principais bacias do estado do Ceará?
- b) como o comportamento futuro da demanda hídrica em cenários de crescimento populacional, industrial e de irrigação afetará a disponibilidade hídrica no hidrossistema Jaguaribe Metropolitano?
- c) qual é o possível impacto das emissões de gases de efeito estufa no regime de precipitação, temperatura e vazão das bacias dos reservatórios que compõem o hidrossistema Jaguaribe Metropolitano, considerando as tendências atuais de emissões e as projeções futuras?
- d) como as mudanças climáticas afetarão a disponibilidade hídrica do sistema Jaguaribe-Metropolitano nos períodos presente e futuro, considerando diferentes cenários climáticos futuros?

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente tese está estruturada em seis capítulos, cada um contribuindo de maneira significativa para a compreensão e avanço do tema abordado. No primeiro capítulo, Introdução Geral, delineiam-se os principais pontos da pesquisa, desde sua temática até seus objetivos e contribuições. Os capítulos subsequentes, dois ao cinco, assumem a forma de artigos científicos, refletindo uma linha de pensamento contínua e progressiva. No segundo capítulo, intitulado “Análise da variabilidade climática na Região Hidrográfica das Bacias Metropolitanas e nas bacias dos reservatórios Banabuiú, Castanhão e Orós”, são analisadas as séries temporais de precipitação e vazão para as bacias dos reservatórios Banabuiú, Castanhão, Orós e Região Hidrográfica das Bacias Metropolitanas (RHBM), bem como avalia a sua relação e a influência que estes sofrem de alguns fenômenos climáticos, com o propósito de identificar a existência de variabilidade interanual e decadal e os impactos causados por estes sobre o regime de precipitação no estado do Ceará e sobre suas principais bacias. O terceiro capítulo,

“Análise da demanda hídrica nos setores de irrigação, abastecimento humano e indústria no Hidrossistema Jaguaribe: perspectivas para o futuro”, avalia o comportamento futuro da demanda hídrica em cenários de crescimento populacional e industrial e da irrigação, de forma a fornecer informações importantes para o planejamento e gestão dos recursos hídricos no estado do Ceará. O quarto capítulo, “Avaliação das projeções de mudanças climáticas nos reservatórios que constituem o sistema Jaguaribe-Metropolitano, avalia a capacidade de alguns modelos do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados – Sexta Fase (CMIP6) em representar as características da precipitação observada e analisa as projeções resultantes destes modelos, considerando dois cenários de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs) e tendências socioeconômicas (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para o século XXI. O quinto capítulo, “Impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica do sistema Jaguaribe-Metropolitano”, avalia o impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica de todo o Sistema Jaguaribe-Metropolitano nos períodos presente e futuro (curto, e médio prazo) para os dois cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, considerando o possível crescimento da demanda hídrica nos cenários futuros. Este artigo foi submetido ao *Journal of Water and Climate Change*. Por fim, o sexto capítulo apresenta a conclusão geral do trabalho, juntamente com recomendações para pesquisas futuras.

2 ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DAS BACIAS METROPOLITANAS E NAS BACIAS DOS RESERVATÓRIOS BANABUIÚ, CASTANHÃO E ORÓS

2.1 INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil (NEB), em especial o Estado do Ceará (CE), apresenta grande parte do seu território inserido em clima semiárido, caracterizado pela ampla variabilidade espaço-temporal das suas precipitações, juntamente com as altas temperaturas e altas taxas de evapotranspiração, apresentando eventos extremos, como episódios de secas severas e chuvas torrenciais; o que acarreta em impactos significativos nos reservatórios da região. Os padrões climáticos desempenham um papel crucial na ocorrência dessas mudanças no regime de precipitação, especialmente durante o período chuvoso, na região do NEB.

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal sistema atmosférico influenciador das chuvas atuante sobre o norte do NEB/CE (Reboita *et al.*, 2014). Sua localização, no entanto, é influenciada pelo gradiente meridional de anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), que é resultado de um padrão de anomalias de TSM presente no Oceano Atlântico (AO). A esse padrão denomina-se Dipolo do Atlântico Tropical caracterizado por suas duas vertentes: Dipolo Positivo (DP), quando ocorrem anomalias positivas no Atlântico Tropical Norte e anomalias negativas no Atlântico Tropical Sul; Dipolo Negativo (DN), quando ocorrem anomalias positivas no Atlântico Tropical Sul e negativas no Atlântico Tropical Norte (Nobre; Shukla, 1996). As áreas doravantes denominadas TNAI (Índice do Atlântico Tropical Norte) e TSAI (Índice do Atlântico Tropical Sul) se referem à região associada ao padrão de Dipolo do Atlântico Tropical, nas áreas compreendidas entre 0 – 20 °S e 10 °E – 30 °W e entre 5 °N – 23,5 °N e 15 °W – 57,5 °W, respectivamente.

No entanto, vários estudos citam também a influência de fenômenos atuantes na região do Oceano Pacífico Equatorial (OP) como possíveis responsáveis pela ocorrência ou não ocorrência de precipitação (Tedeschi; Collins, 2016; Tedeschi; Grimm; Cavalcanti, 2016), são eles: o ENOS (El Niño - Oscilação Sul) e Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). O ENOS pode ser definido como uma grande oscilação acoplada de interação oceano-atmosfera de grande escala. Quando caracterizado por anomalias positivas da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM) sobre o OP, além do enfraquecimento dos ventos alísios de oeste, a componente oceânica é denominada-se El Niño. Um padrão oposto é observado em períodos de La Niña, com anomalias negativas de TSM no OP e intensificação

dos ventos alísios de oeste. Os episódios desses fenômenos duram em média de 9 a 12 meses (NOAA, 2017). Todavia, mesmo sendo raros, eles podem durar mais de um ano – foram registrados eventos ENOS com 18 meses de duração e de La Niña com 33 meses (NOAA, 2017). Segundo Trenberth e Hoar (1997), a região chave para interações acoplado oceano-atmosfera para o ENOS se encontra mais a oeste (5N - 5S, 170W - 120W) – região do índice Niño 3.4. Essa região é frequentemente monitorada utilizando o *Oscillation Niño Index* (ONI), que é calculado a partir das médias trimestrais das anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nessa área específica (Alizadeh-Choobari, 2017; Singh; Gnanaseelan; Chowdary, 2017).

A ODP é outro fenômeno atuante na região do Pacífico, mas esse de mais baixa frequência - com ciclos entre fases positivas e negativas (Anomalias de TSM positivas e negativas, respectivamente) geralmente com duração de 20 a 30 anos (Mantua *et al.*, 1997). Esta oscilação apresenta uma correlação positiva com a TSM nas áreas NIÑOS clássicas (Niño3.4, Niño3, Niño4, Niño1+2) – com possíveis modulações nas chuvas no NEB/Ceará durante a pré-estação (dezembro/janeiro) ou no início da estação chuvosa (fevereiro) (Mantua *et al.*, 1997).

De outra forma, atuando no Oceano Atlântico Norte, a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) identifica-se como uma variação cíclica da corrente oceânica e atmosférica em larga escala que ocorre com um período estimado de 50-70 anos. Segundo Enfield, Mestas-Nuñez e Trimble (2001) a OMA tem como características períodos de cerca de 40 anos em uma fase quente (anomalias positivas de TSM), seguidos por períodos aproximados de 20 anos em uma fase fria (anomalias negativas de TSM). A redução da precipitação nos Estados Unidos e o aumento na região do Oeste Europeu, juntamente com as alterações no regime de chuvas no nordeste brasileiro, no Sahel africano e na ocorrência de furacões no Atlântico, foram associados à variabilidade climática regional multidecadal relacionada à Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) (Enfield, Mestas-Nuñez; Trimble, 2001; Folland *et al.*, 2001; Gray *et al.*, 2003; Sutton; Hodson, 2005). No Brasil, a AMO em sua fase quente implica um deslocamento da ZCIT para o norte de sua posição climatológica do trimestre março a maio e, portanto, uma redução na precipitação do NEB. À medida que o ciclo das fases AMO prossegue, o padrão de temperatura eventualmente se inverte, forçando uma ZCIT anômala ao sul localizada mais próxima do NEB e, portanto, décadas mais úmidas (Knight; Folland; Scaife, 2006).

Com o propósito de avançar no entendimento dos fatores dinâmicos associados aos modos de variação do regime de chuvas no NEB, estudos como os de Hastenrath e Heller

(1977), Hastenrath (1978), Moura e Shukla (1981), Pezzi e Cavalcanti (2001), Saravanan e Chang (2000), Giannini *et al.* (2004), Ferreira e Mello (2005), Lucena, Servain e Gomes Filho (2011), Silva, Galvêncio e Nobrega (2011), Silva (2013), Silva (2017), Pinheiro *et al.* (2018), Rocha, Souza Filho e Silva (2019), Lima e Lira (2021) e Silva *et al.* (2021) investigaram a relação entre os padrões anômalos de TSM do OA e OP com o clima desta região.

Especialmente sobre o Ceará, Pinheiro *et al.* (2018) investigaram como eventos El Niño de curta e longa duração podem afetar a dinâmica atmosférica no Atlântico Tropical Norte (ATN), como isso pode impactar na variabilidade interanual da TSM sobre o oceano e qual a resposta sobre o regime de chuvas no Estado do Ceará. Os autores identificaram anomalias positivas de TSM sobre o ATN, quando em eventos de longa duração, propiciando um regime de chuvas abaixo da média no Estado e uma maior severidade dos eventos de seca. De outra forma, o ATN apresentou anomalias de TSM próximas a zero quando em eventos de menor duração do El Niño, contribuindo para a composição das anomalias de precipitação também próximas do zero.

Rocha, Souza Filho e Silva (2019) analisaram a relação entre a precipitação média do Reservatório Orós e os índices ODP e OMA utilizando, para tanto, a análise de *change points* e a transformada de ondeletas. Os autores identificaram uma capacidade preditiva da precipitação a partir de um modelo baseado nos índices analisados. Observaram ainda que, os fenômenos de ODP e OMA quando ocorrem simultaneamente em fases positivas (negativas) resultam em uma previsibilidade com menor variabilidade da precipitação, apontando valores abaixo (acima) da média esperada. Esses resultados corroboram sobre a influência conjunta das variações de TSM sobre os OA e OP nas chuvas médias da região centro-sul do Ceará.

Mais recentemente, Lima e Lira (2021) discutiram a relação da variabilidade climática com os desastres naturais identificados no Estado do Ceará entre os anos de 1991 a 2019. A partir das análises de dados e mediante o uso da estatística multivariada, os autores constataram uma correlação direta entre o quantitativo de desastres naturais e os fenômenos ENOS e as condições (des)favoráveis às chuvas no Oceano Atlântico Tropical, influenciando assim nas condições de chuva que ocorrem no Estado do Ceará. Desse modo, os autores apontaram que a variabilidade climática é uma característica associada, principalmente, ao regime de chuvas na região.

No entanto, observa-se que a maioria dos estudos supracitados investigaram quais escalas e oscilações exercem influência sobre a variabilidade pluviométrica da região do NEB, de modo que um estudo específico a nível de bacia se tornou uma lacuna a ser preenchida. Desse modo, o objetivo deste capítulo foi analisar as séries temporais de precipitação e vazão

para as bacias dos reservatórios Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM, bem como avaliar a sua relação e a influência que estes sofrem dos fenômenos climáticos supracitados, com o propósito de identificar a existência de variabilidade interanual e decadal e os impactos causados por estes sobre o regime de precipitação no estado do Ceará e sobre suas principais bacias.

A análise e compreensão dos diversos modos de variação em diferentes escalas temporais se faz necessário uma vez que colabora para a mitigação dos riscos associados à segurança hídrica bem como a ocorrência de eventos extremos hidrológicos e seus impactos sobre o estado do Ceará. Souza Filho e Moura (2006) reforçam que a tomada de decisão quanto ao planejamento e a gestão dos recursos hídricos estão condicionados ao conhecimento desses padrões de variabilidade climática.

Esse trabalho é dividido em quatro seções. Nesta primeira seção, é feita uma introdução acerca do tema definido para este estudo, expondo as justificativas do desenvolvimento desta pesquisa e os objetivos. Na seção seguinte, o material e métodos utilizados serão apresentados. A seção três trará os resultados obtidos e discussão. As conclusões serão abordadas na seção quatro.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada neste capítulo pode ser descrita em sete etapas, são elas: (I) descrição da região de estudo, (II) descrição dos dados utilizados, (III) estatísticas descritivas, (IV) variabilidade sazonal, (V) variabilidade interanual e decadal, (VI) variabilidade interdecadal e multidecadal do clima associada a eventos ENOS e (VII) SPI e SRI. Dessa forma, os próximos tópicos dissertam sobre as etapas supracitadas.

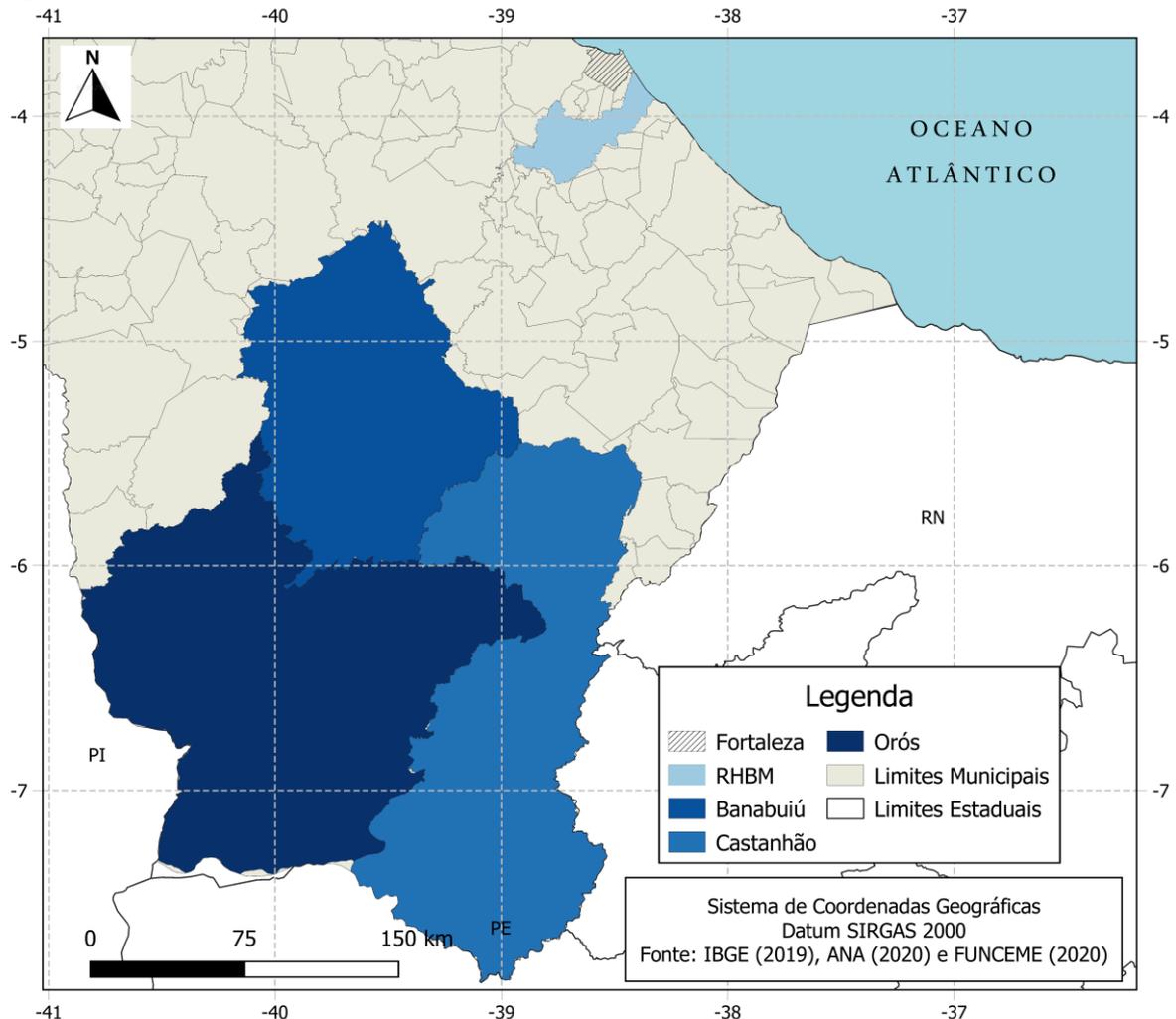
2.2.1 Região de Estudo

A área de estudo compreende a Região Hidrográfica das Bacias Metropolitanas (RHBM)¹ e as bacias dos reservatórios Banabuiú, Castanhão e Orós – a Figura 1 apresenta o mapa de localização da região de estudo. As bacias dos reservatórios Banabuiú, Castanhão e Orós estão associadas às sub-bacias do rio Jaguaribe (Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe e

¹ No texto, quando lido Região Hidrográfica das Bacias Metropolitanas (RHBM) refere-se ao setor que compreende os reservatórios Pacoti e Riachão. A escolha desses reservatórios é respaldada pela disponibilidade consistente e confiável de dados hidrológicos, garantindo uma análise sólida e abrangente e ainda por serem geograficamente estratégicos para a região metropolitana.

Banabuiú). Estas sub-bacias compõem o maior sistema de água de interesse do Estado do Ceará, juntas somam uma capacidade de acumulação de 10.241 hm³. (Silva *et al.*, 2019).

Figura 1 - Localização da RHBM e das bacias dos reservatórios Banabuiú, Castanhão e Orós.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os reservatórios supracitados constituem também o principal sistema de reservatórios do Estado do Ceará: o sistema Jaguaribe-Metropolitano; responsável pelo abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). As sub-bacias do rio Jaguaribe se integram com a RMF, por meio de um importante sistema de transferência hídrica do Ceará: o Eixão das Águas; que atende às demandas dos usuários agrícolas e implementa o sistema próprio de abastecimento da RMF composto por cinco reservatórios: Gavião; Pacoti, Riachão, Pacajus e Aracoiaba – atendendo às demandas do abastecimento humano e indústrias (ARCE, 2016; Silva *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2019).

A bacia do reservatório Banabuiú drena uma área de 14.244 km². Essa bacia engloba 17 açudes monitorados, o que lhe confere o maior nível de açudagem entre todas as regiões hidrográficas do Jaguaribe, sendo o açude Banabuiú a terceira reserva hídrica mais importante da grande bacia do Jaguaribe. O total acumulado é de 1.601.000.000 m³ (SRH, 2022). A bacia do reservatório Castanhão localiza-se na região semiárida setor sudoeste do Estado do Ceará. Sua bacia hidrográfica tem área de 44.806 km² e localiza-se na região hidrográfica do Médio Jaguaribe – possuindo capacidade de acumulação de 6.700.000.000 m³, com o rio Jaguaribe sendo o de maior expressão nesta bacia. O Orós, por sua vez, abrange uma área de drenagem de 24.960 km², o que corresponde aproximadamente a 16,77% do território cearense. Localizada a montante do açude Orós, sua bacia é composta por 24 municípios e apresenta a capacidade de acumulação de águas superficiais de 1.940.000.000 m³. Todas as bacias supracitadas possuem clima do tipo Tropical Quente Semiárido, com temperaturas médias anuais em torno dos 27 °C para Banabuiú e Castanhão e 28°C para Orós. Nesta, as precipitações médias anuais encontram-se entre 500 mm e 700 mm, naquelas a média pluviométrica anual é de 725,4 mm e 742,6 mm, respectivamente (ARCE, 2016).

Dentro da Região Hidrográfica das Bacias Metropolitanas (RHBM), o estudo ocorreu no setor que compreende os reservatórios Pacoti e Riachão, que somam, aproximadamente, uma área de 1.107 km² e capacidade de acumulação de 427.900.000 hm³. O reservatório Pacoti está localizado no município de Horizonte e teve sua barragem construída pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), de forma a contribuir para o abastecimento d'água em Fortaleza junto ao reservatório Riachão, formando um sistema integrado. Essa região hidrográfica possui uma pluviosidade anual de 1.606,6 mm e temperatura média anual de 27,3 °C. Segundo a classificação de Köppen, sua região climática é do tipo AW' com clima tropical chuvoso, quente e úmido, com chuvas de verão e outono (COGERH, 2011).

2.2.2 Dados utilizados

Para este estudo, os dados de precipitação foram selecionados observando principalmente a disponibilidade e a consistência das séries históricas. Foram utilizados os dados pluviométricos da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) compreendendo o período de janeiro de 1975 a dezembro de 2020 com grade de resolução horizontal de aproximadamente 0,2°, tomando as estações pluviométricas com séries contendo o mínimo de 10 anos de dados para todo o Estado do Ceará. A precipitação média nas bacias foi interpolada através do método Ponderação pelo Inverso da Distância, do inglês

Inverse Distance Weighting (IDW) – mais informações sobre sua definição e abordagem metodológica podem ser encontradas em Cerón *et al.* (2021). Também utilizaram-se as climatologias de precipitação do *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC) de janeiro de 1901 a dezembro de 2019², em uma grade regular com resolução espacial horizontal de 1,0° para Banabuiú, Castanhão e Orós e de 0,5° para RHBM, obtidas a partir do sítio de dados <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcc.html>, sendo séries temporais longas o suficiente para identificar modos de variabilidade climática de baixa frequência na região de estudo (Schneider *et al.*, 2011).

Já para as séries de vazão, foram utilizadas as séries mensais de vazões de referência afluentes aos reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH, 2022). Estes foram obtidos a partir do sítio de dados: <https://portal.cogerh.com.br/definicao-das-vazoes-oficiais-dos-reservatorios-monitorados-pela-cogerh> e compreende o período de janeiro de 1911 a dezembro de 2022.

2.2.3 Estatísticas descritivas

Dentre as estatísticas descritivas utilizadas neste estudo, tem-se a média (\bar{x}) que descreve a amostra de N valores x_i que compõe a série, como um único valor que representa o centro da distribuição dos dados e a mediana, que, por sua vez, atua como uma medida de posição e representa o valor que é superado em 50% dos pontos da amostra. O Desvio Padrão (DV), por sua vez, atua como uma medida de dispersão, indicando o grau de uniformidade dos valores de uma amostra em torno da média. Por fim, o Coeficiente de Variação (CV) relaciona o desvio padrão e a média, medindo a variabilidade dos valores em torno da média – mais informações e equacionamento ver Collischonn e Dornelles (2013).

Segundo Fox (1981), a Raiz do Erro Quadrático Médio (do inglês *root-mean-square error* – RMSE) trata-se de uma medida de diferença média. É uma medida de erro muito utilizada no tratamento estatístico, pois apresenta uma melhor sensibilidade no que tange ao crescimento de desvios entre séries (quando comparado com o Erro Absoluto Médio, por exemplo), fornecendo informações relevantes para prevenção de erros. O RMSE é computado através da soma dos quadrados das diferenças entre os resultados estimados e observados, como mostrado na equação 1:

² Período disponível no momento de produção deste capítulo.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \psi_i)^2} \quad (1)$$

Quando a medida do erro se aproxima de zero, há uma maior semelhança entre as séries estimada e medida.

2.2.4 Variabilidade sazonal

Sazonalidade de uma série temporal ocorre quando existe um padrão periódico regular e estável no tempo (sazonalidade determinística) ou quando a componente periódica da série apresenta variação ao longo do tempo (caracterizando assim a sazonalidade do tipo estocástica) (Milone; Angelini, 1995; Morettin; Tolo, 1987). Para este capítulo, a sazonalidade foi determinada através de rotina programada em linguagem R (ver Apêndice). Este calcula a climatologia ao agrupar os dados por mês e calcular a média da precipitação para cada mês. Isso fornece uma representação da média histórica ou padrão climático para cada mês ao longo de um período de tempo especificado pelos dados. Para tanto, utilizou-se a média mensal das precipitações acumuladas.

2.2.5 Variabilidades interanual e decadal

Para a análise da variabilidade interanual e decadal das séries temporais de precipitação e vazão, foi realizado o cálculo das médias anuais, médias móveis de 10 anos e a Transformada Simples em Ondaleta (TSO).

No cálculo da pluviosidade média anual foi realizado o somatório das médias mensais de precipitação. De outro modo, para a vazão média anual considerou-se a média dos valores mensais. Em seguida, calculou-se a média móvel de 10 anos de forma a suavizar os dados, permitindo uma melhor visualização da direção da tendência das variáveis analisadas. Todos os cálculos supracitados bem como os de TSO que será descrito a seguir foram realizados em linguagem R (ver Apêndice).

A análise de *Wavelet* por meio da TSO é uma ferramenta padrão para decompor uma série em um espaço tempo-frequência e detectar variações de tempo-frequência (Torrence e Compo, 1998). Os dados médios anuais de precipitação e vazão foram analisados utilizando a metodologia da TSO do tipo mãe de *Morlet*, mediadas nas regiões das bacias, durante o período de janeiro de 1901 a dezembro de 2016, com o intuito de verificar a variabilidade dessas

variáveis. A equação 2 apresenta a TSO mãe de *Morlet* utilizada nesse estudo:

$$W_{j,k} \left(\frac{t-k}{j} \right) = \frac{-1}{\sqrt{j}} \int_{t=-\infty}^{+\infty} f(t) e^{i\omega_0 \left(\frac{k-t}{j} \right)} e^{-1/2 \left(\frac{k-t}{j} \right)^2} dt \quad (2)$$

onde $W_{j,k}$ é a TSO da função mãe de *Morlet*, “k” é o fator de translação, t é o tempo, “j” é denominado fator de escalamento e ω_0 é uma frequência adimensional – valor que determina a forma do sinal modulador da Função Ondaleta base de *Morlet* – para este trabalho utilizou frequência de corte igual a 6, que é a sugerida por Torrence e Compo (1998).

2.2.6 Variabilidade Interdecadal e Multidecadal do clima associada a eventos ENOS

Nessa análise foram utilizados os dados de precipitação obtidos através do GPCC³ de janeiro de 1901 a dezembro de 2019. Calculou-se as anomalias de precipitação a partir das diferenças entre a média trimestral (março-abril-maio – MAM) do ano do evento e a média trimestral (MAM) climatológica de janeiro de 1901 a dezembro de 2019. Valores positivos de anomalia significam que a precipitação no trimestre MAM, do ano analisado, foi superior à normal climatológica trimestral. Para situações de valores negativos de anomalia, ocorre o contrário.

Analisou-se também a ocorrência simultânea de eventos ODP e OMA para o estado do Ceará, especialmente sobre as bacias hidrográficas analisadas neste capítulo, abrangendo todas as suas distintas fases, adotando, para tanto, os critérios utilizados por Andreoli e Kayano (2005) e Silva *et al.* (2011). Para a escolha dos anos dos eventos, considerou-se a duração dos eventos ENOS optando por eventos longos de *El Niño* e *La Niña*. Seguindo, portanto, os eventos de ENOS citados por Souza e Reboita (2021).

Assim, a Tabela 1 apresenta os anos escolhidos, os eventos associados e suas respectivas fases de aquecimento/resfriamento.

³ No momento da elaboração deste capítulo/trabalho, a série de dados utilizada representava a mais extensa disponível para análise.

Tabela 1- Eventos ENOS durante os regimes das fases quentes (+) e frias (-) da ODP e OMA.

Ano	Evento ENOS	Fase da ODP	Fase da OMA
1972	El Niño	-	-
1975	La Niña	-	-
1982	El Niño	+	-
1988	La Niña	+	-
1998	La Niña	+	+
2007	La Niña	-	+
2015	El Niño	+	+
2018	El Niño	-	+

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.7 SPI e SRI

O Índice de Precipitação Padronizada (SPI, do inglês *Standardized Precipitation Index*) é uma medida que quantifica as condições de seca ou chuva em uma determinada área em relação ao seu histórico de precipitação. Ele é calculado com base na distribuição de probabilidades da precipitação observada durante um determinado período de tempo, geralmente um mês, três meses, seis meses ou um ano. O SPI é expresso em unidades de desvio padrão em relação à média histórica de precipitação, o que permite comparar as condições de seca ou chuva entre diferentes regiões e períodos. Um SPI negativo indica condições de seca, enquanto um SPI positivo indica condições de chuva acima da média (Mckee; Doesken; Kleist, 1993, 1995).

O SPI pode ser calculado em diferentes escalas de tempo (Albuquerque, 2010; Zargar *et al.*, 2011):

- a) O SPI de 1 mês (SPI-1) reflete condições de curto prazo e pode ser aplicado a alterações na umidade do solo e na agricultura;
- b) o SPI de 3 meses (SPI-3) reflete condições de médio e curto prazo tendo grande aplicação na análise de umidade do solo;
- c) o SPI de 6 meses (SPI-6) e 9 meses (SPI-9) apontam tendências de médio prazo nos padrões de precipitação. Este último é um bom indicador de impactos significativos de seca na agricultura;
- d) o SPI de 12 meses (SPI-12) ou escalas superiores reflete os padrões de precipitação a longo prazo, geralmente vinculados às vazões médias, níveis de água de reservatórios, e níveis de água subterrânea.

Seu algoritmo de cálculo fundamenta-se no registro de chuvas de longo prazo, se ajustando a uma distribuição de probabilidade (Fernandes *et al.*, 2009). Essa distribuição é

computada aplicando a seguinte função densidade de probabilidade $g(x)$ (Thom, 1966):

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

em que a é um parâmetro de forma, β é um parâmetro de escala, x é o valor de precipitação e Γ é a função gama. Para a equação 10, considera-se ainda: $a > 0$; $\beta > 0$ e $x > 0$. Os valores de SPI são resultados da aplicação do inverso da distribuição normal padronizada (Ψ) da função cumulativa $G(x)$, em que esta é obtida integrando-se a equação 3, conforme mostra a equação 4 e assumindo os novos parâmetros $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$ e A , computados através das equações 5, 6 e 7 respectivamente:

$$G(x) = \int_0^x \frac{x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}}}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \quad (4)$$

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

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

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (7)$$

em que n trata do número de observações de precipitação, \bar{x} é a média da amostra de dados. Ψ^{-1} é o inverso da função de probabilidade normal padronizada com média zero e variância um, o que resulta nos valores de SPI (Guttman, 1999).

Neste trabalho, o SPI foi calculado, em linguagem de programação Python, escolhendo-se as escalas temporais 12 meses (SPI-12) e 24 meses (SPI-24). Os trabalhos de Guttman (1999) e Fernandes *et al.* (2009) trazem mais detalhes sobre o algoritmo de cálculo do índice SPI. Os valores de SPI podem ser interpretados para categorizar a seca ou umidade, de acordo com McKee, Doesken e Kleist (1993, 1995) conforme os intervalos mostrados na Tabela 2:

Tabela 2 - Associação entre os valores de SPI e as categorias de umidade/seca.

SPI	Categoria
≤ -2.0	Seca Extrema
-1,5 a -1,99	Seca Severa
-1,0 a -1,49	Seca Moderada
-0,99 a 0,99	Normal
1,0 a 1,49	Umidade Moderada
1,5 a 1,99	Umidade Severa
≥ 2.0	Umidade Extrema

Fonte: Adaptado de McKee *et al.* (1993, 1995).

Seguindo outros trabalhos, neste estudo uma sequência de valores negativos de SPI indicará uma condição de seca, bem como uma sequência de valores positivos indicará um período de umidade (Aghakouchak *et al.*, 2015; Brito *et al.*, 2018).

O cálculo do Índice de Escoamento Padronizado (do inglês *Standardized Runoff Index* – SRI), é computado da mesma forma que o SPI, utilizando, no entanto, dados mensais de vazão (Shukla; Wood, 2008) e em diferentes escalas de tempo. Segundo Fernandes (2009), na análise do SRI valores positivos indicam uma vazão maior do que a média ou a mediana, ao passo que valores negativos indicam vazões menores do que os apresentados utilizando essas métricas estatísticas. Em outras palavras, o SRI é um índice adimensional em que valores negativos indicam seca e valores positivos indicam períodos úmidos, assim como considerado para o SPI. Ambos determinando, então, a intensidade, magnitude e duração de secas. A partir de Martins *et al.* (2014), têm-se a classificação de secas a partir dos valores de SRI mostrado na Tabela 3:

Tabela 3 - Classificação de secas a partir dos valores de SRI.

	Categoria
$SRI \geq 2$	Umidade Extrema
$1,5 \leq SRI < 2$	Umidade Moderada
$1,0 \leq SRI < 1,5$	Ligeiramente Úmido
$-1 < SRI < 1$	Normal
$-1,5 < SRI \leq -1$	Seca Leve
$-2 < SRI \leq -1,5$	Seca Moderada
$SRI \leq -2$	Seca Extrema

Fonte: Adaptado de Zhu *et al.* (2018).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Análise das estatísticas descritivas

2.3.1.1 Regime pluvial

O regime de chuvas em nível diário e mensal das bacias analisadas foi apresentado por meio de valores mínimos, médios e máximos. Nas Tabelas 4 e 5 apresentam-se as médias, máximas e mínimas das séries pluviométricas diárias e mensais, respectivamente, para cada bacia. A Tabela 6, por sua vez, apresenta as principais estatísticas da série pluviométrica anual. As séries analisadas abrangem o período de janeiro de 1975 a dezembro de 2020.

Tabela 4 - Pluviosidade Máxima, Média e Mínima diária para Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM.

Precipitação (mm)	Banabuiú	Castanhão	Orós	RHBM
Máxima	59,151600	56,171978	57,829941	89,04
Média	1,824021	2,287943	1,870373	3,00
Mínima	0	0	0	0

Fonte: FUNCEME.

Tabela 5 - Pluviosidade Máxima, Média e Mínima mensal para Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM.

Precipitação (mm)	Banabuiú	Castanhão	Orós	RHBM
Média	55,520302	69,641335	56,931177	91,51
Máxima	393,506070	429,184314	445,839850	475,99
Mínima	0	0	0	0

Fonte: FUNCEME.

Tabela 6 - Estatística das Precipitações Anuais em Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM.

Precipitação (mm)	Banabuiú	Castanhão	Orós	RHBM
Média (mm)	666,24	835,69	683,17	1098,1
Desvio Padrão (mm)	247,26	244,65	224,98	365,70
Coefficiente de Variação (%)	37,11	29,27	32,93	33,30
Máxima (mm)	1508,28	1781,45	1617,65	2069,0
Mínima (mm)	225,08	460,51	344,95	425,1

Fonte: FUNCEME.

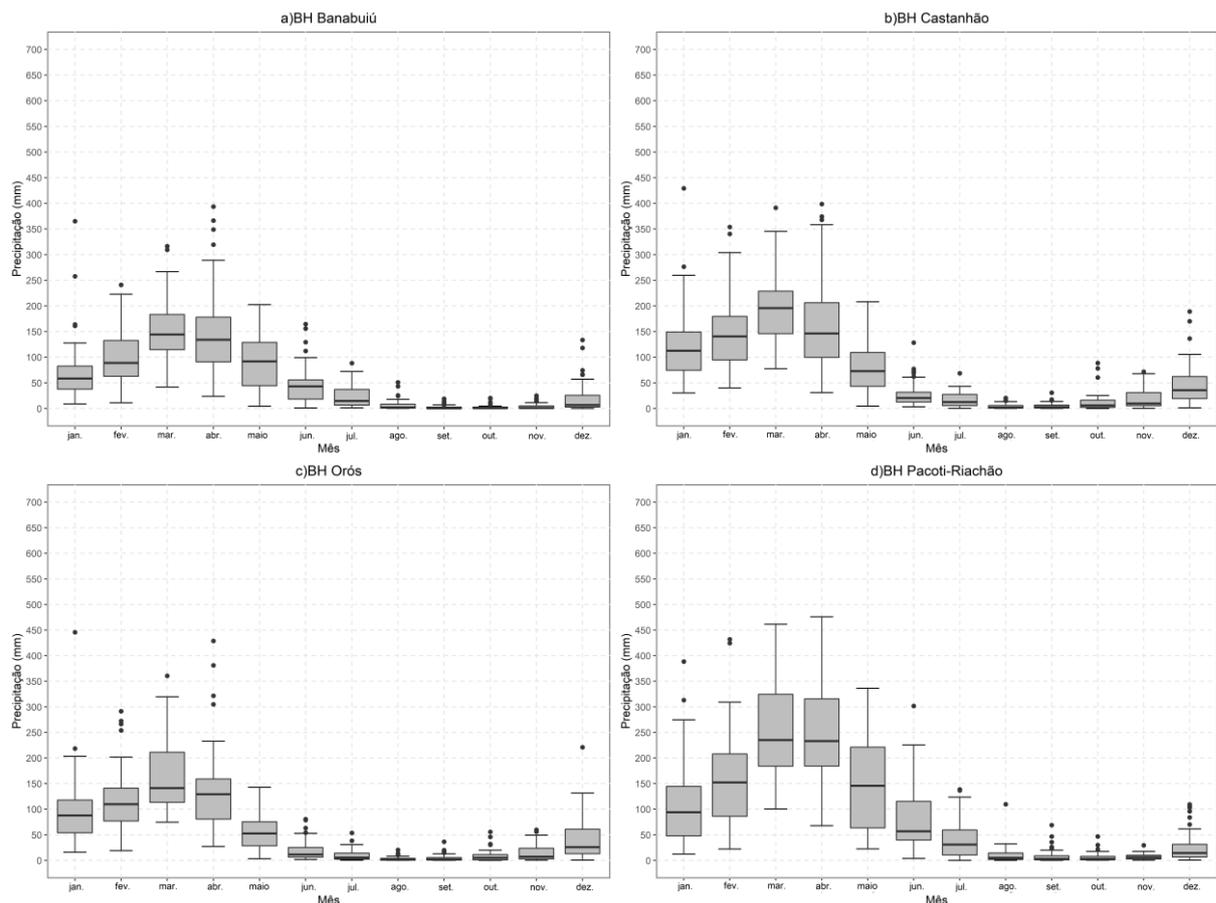
Observa-se que Banabuiú, Castanhão e Orós apresentam regimes pluviométricos diários e mensais similares. Na análise das estatísticas anuais, obteve-se valores elevados na série histórica de RHBM, seguida do Castanhão, e menores em Banabuiú. A análise dos valores dos coeficientes de variação demonstra um comportamento regular, com percentual médio de

CV de 33,15%, sendo que o maior valor foi determinado em Banabuiú e o menor CV foi em Castanhão. Assim, a dispersão dos dados se mostrou próxima da homogeneidade em relação à média anual nas bacias analisadas.

2.3.1.2 Análise da variabilidade sazonal

A Figura 2 apresenta o gráfico *boxplot* da precipitação média mensal nas bacias dos reservatórios a) Banabuiú, b) Castanhão, c) Orós e d) RHBM considerando as séries de dados da FUNCEME para o período de 1975 a 2020, fornecendo informações de posição, dispersão, assimetria, caudas e observações extremas ou *outliers*.

Figura 2 - Boxplot da precipitação média mensal proveniente dos dados da FUNCEME para o período de 1975 a 2020.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Todas as bacias apresentaram um ciclo sazonal de precipitação bem definido, com o período chuvoso se estendendo de fevereiro a maio e o período considerado seco no segundo semestre, o qual caracteriza-se pela sua baixa variabilidade principalmente nos meses de agosto a outubro. Características que em suma, associa-se ao período característico da influência da

Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que é o principal sistema atmosférico influenciador das chuvas atuante sobre o norte do NEB/CE – modificado, em parte, pela Temperatura da Superfície do oceano Atlântico Tropical – associado ao Gradiente inter-hemisférico (Reboita; Santos, 2014; Pontes Filho *et al.*, 2020). Precipitações consideradas como discrepantes (*outliers*) foram identificadas para a maioria dos meses, evidenciando a alta irregularidade pluviométrica ao longo do ano. O trimestre mais seco ocorre entre agosto e outubro, e o trimestre mais chuvoso entre março e maio, modulado, principalmente, pelo posicionamento latitudinal da ZCIT. Além desta, os Vórtices Ciclônicos de Alto Nível (VCAN), que atuam geralmente em dezembro e janeiro, e as Ondas de Leste (OL), que ocorrem comumente em maio, junho e julho, formam os principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região (Uvo *et al.*, 1998; Reboita; Santos, 2014).

Observou-se no período entre agosto e outubro, os menores valores dos percentis dos quantis de 25%, inferiores a 11 mm, para os dados de todas as bacias, com um mínimo de 0,02 mm no mês de setembro no Banabuiú. De outro modo, entre janeiro a maio a mediana obtida é superior a 50 mm, com destaque a maior concentração das chuvas em tal período, no mês de março, com 144,39 mm, 195,80 mm e 141,42 mm para Banabuiú, Castanhão e Orós, respectivamente, e com 235,3 mm na RHBM. Os maiores valores absolutos de pluviosidade ocorreram nos meses de fevereiro, março e abril, o pico do período chuvoso, com registros superiores a 240 mm para Banabuiú, Castanhão e Orós e 400 mm para RHBM, enquanto que o mês de outubro apresenta o menor máximo total em Banabuiú, Castanhão e Orós (18,80 mm, 20,51 mm e 20,30 mm, respectivamente).

2.3.1.3 Análise da variabilidade interanual, decadal e tendência

2.3.1.3.1 Precipitação

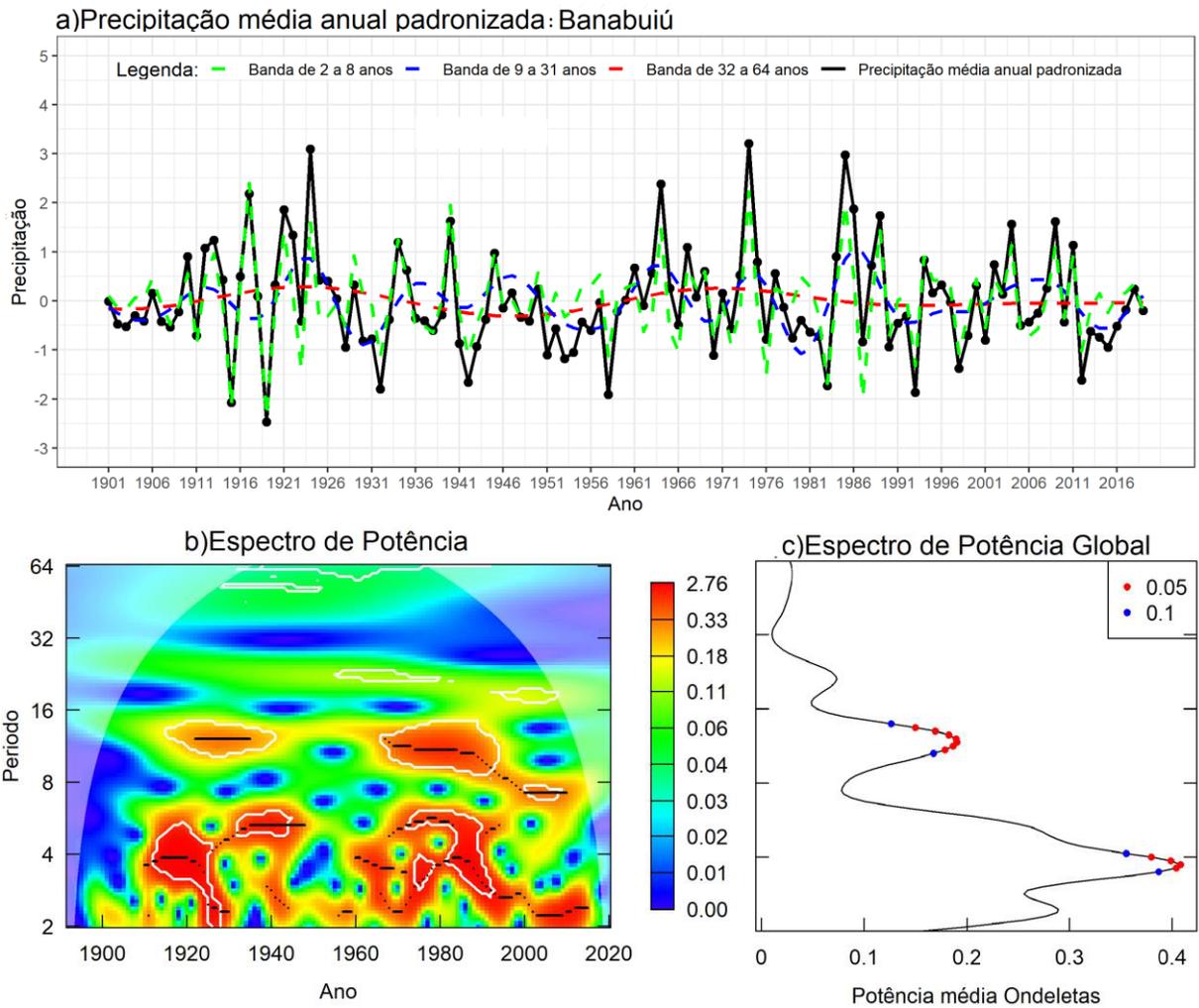
As Figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam os gráficos da análise de Ondaletas do tipo *Morlet* para a precipitação nas bacias dos reservatórios Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM, respectivamente. O cone em formato de “U” em cor mais destacada observado nas Figuras 3(b), 4(b), 5(b) e 6(b), chama-se de cone de influência e garante que os valores contidos dentro dele possuem 95% de confiança estatística. As Figuras do Espectro de potência mostram várias bandas de energia principalmente nas escalas anual a interanual (2–6 anos e 7–15 anos). Analisando a potência média das Ondaletas é possível observar, em todas as bacias, uma influência de bandas de frequências entre 10 a 14 anos, com nível de significância de 0,05. Além de 56 a 64 anos na RHBM e Orós e em uma frequência menor entre 3 e 6 anos em

Banabuiú, Castanhão e Orós. Rocha (2018) analisando a potência média das Ondeletas do SPI 12 (Figura 21), relativo à precipitação média da bacia da estação de Iguatu (tomando aqui para referência o reservatório do Orós), também identificou com o mesmo nível de significância, a influência de bandas de frequências entre os períodos apontados acima.

A banda de frequência entre 2 a 6 anos apresentou os maiores níveis de potência para todas as bacias analisadas na década de 10 e indo até 1940 em Banabuiú, Castanhão e Orós – período concomitante com o apontado por Rocha (2018). Fatores remotos que controlam a precipitação podem estar associados às variações interdecenais, como por exemplo, a ocorrência do fenômeno ENOS que possui frequência de 3 a 7 anos. Já a banda de frequência entre 7 a 15 anos apresentou uma influência moderadamente intensa entre 1970 a 2000 – também concordante com os resultados apontados por Rocha (2018). Resultados semelhantes foram apontados também por Rocha, Sousa e Silva (2019) que analisaram a relação entre a precipitação média e os índices AMO e PDO do reservatório Orós através da metodologia *change point* na análise do SPI, juntamente com a ferramenta TSO e entre outras.

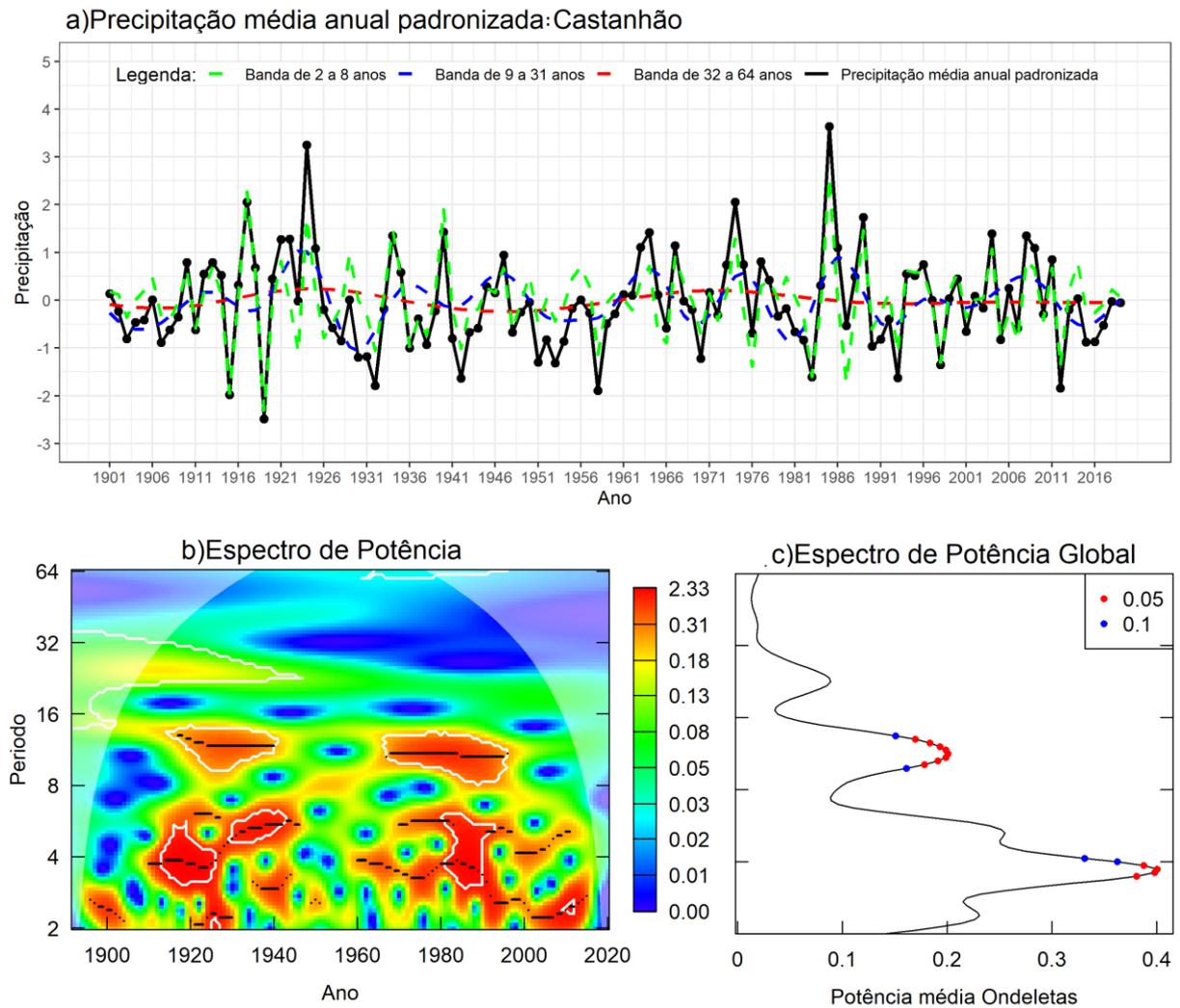
Um menor valor de nível de energia foi apontado no intervalo de 1901 a 1940 na banda de 16 a 32 anos em Castanhão e na RHBM e na banda de 48 a 64 anos em Orós. Associando estes períodos de oscilação a padrões decadais e multidecais de variabilidade, respectivamente. Nas figuras analisadas, a banda de alta frequência de 2 a 8 anos apresentou maior intensidade em alguns anos, foram eles: 1917, 1974, e 1985.

Figura 3 - TSO de Morlet da série temporal de precipitação do Banabuiú (a) Série temporal da Precipitação Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.



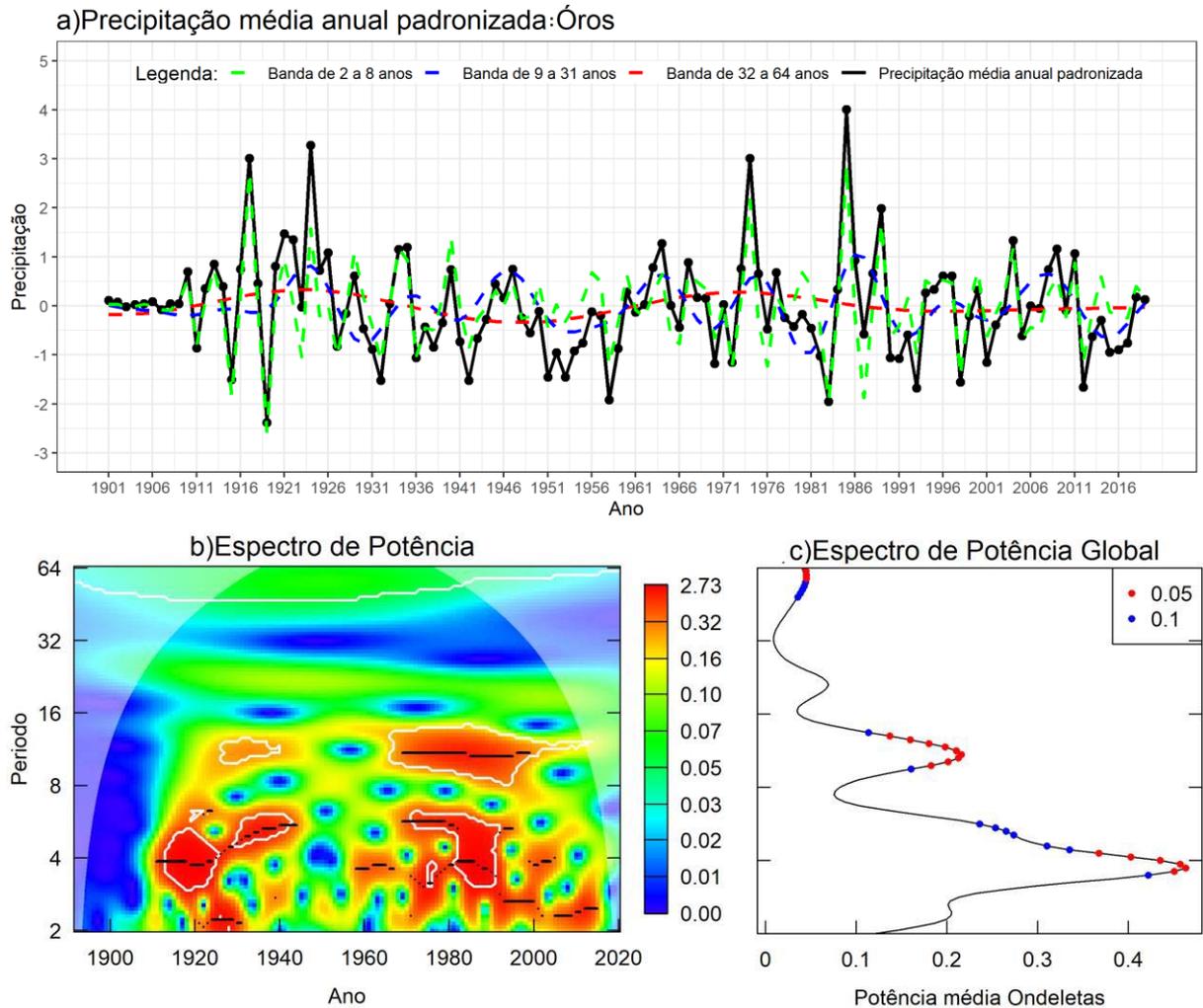
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4 - TSO de Morlet da série temporal de precipitação do Castanhão (a) Série temporal da Precipitação Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.



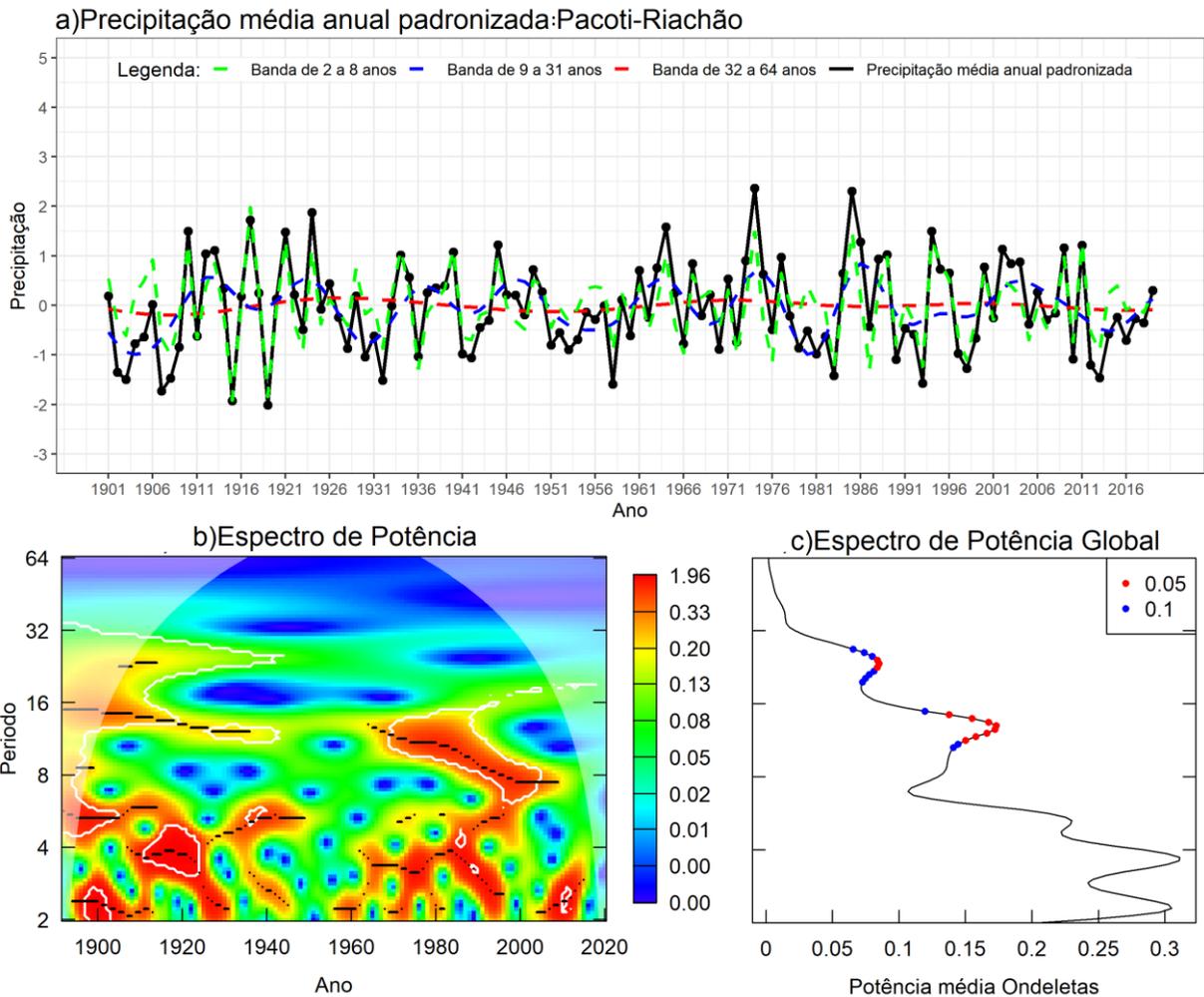
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5 - TSO de Morlet da série temporal de precipitação do Orós (a) Série temporal da Precipitação Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6 - TSO de Morlet da série temporal de precipitação da RHBM (a) Série temporal da Precipitação Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.



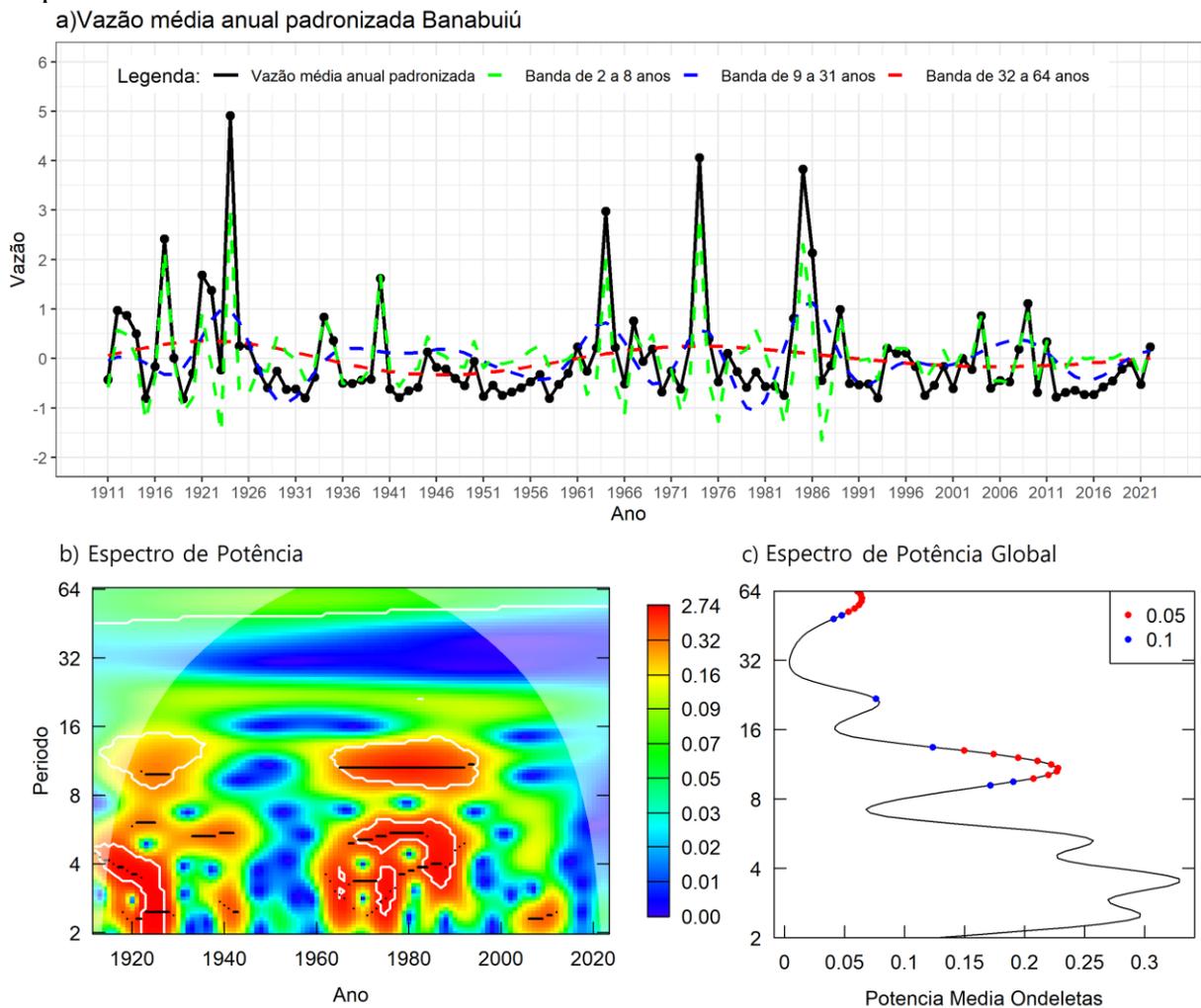
Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3.1.3.2 Vazão

As Figuras 7, 8, 9 e 10 apresentam os gráficos da análise de Ondas de Morlet para a vazão em Banabuiú, Castanhão, Orós e na RHBM, respectivamente. As Figuras do Espectro de potência mostram várias bandas de energia com níveis elevados de energia nas escalas anual e interanual (2 a 8 anos) e decadal (8 a 16 anos). Analisando a potência média das Ondas de Morlet é possível observar, em todas as bacias, uma influência de bandas de frequências entre 8 a 16 anos, com nível de significância de 0,05. Além de 40 a 64 anos em Banabuiú e Orós, de 20 a 24 no Castanhão e de 20 a 28 e de 48 a 64 anos na RHBM. A banda de frequência entre 2 a 8 anos apresentou os maiores níveis de potência para todas as bacias analisadas na década de 20 e entre as décadas de 70 a 90 (à exceção da RHBM). E considerando a banda de

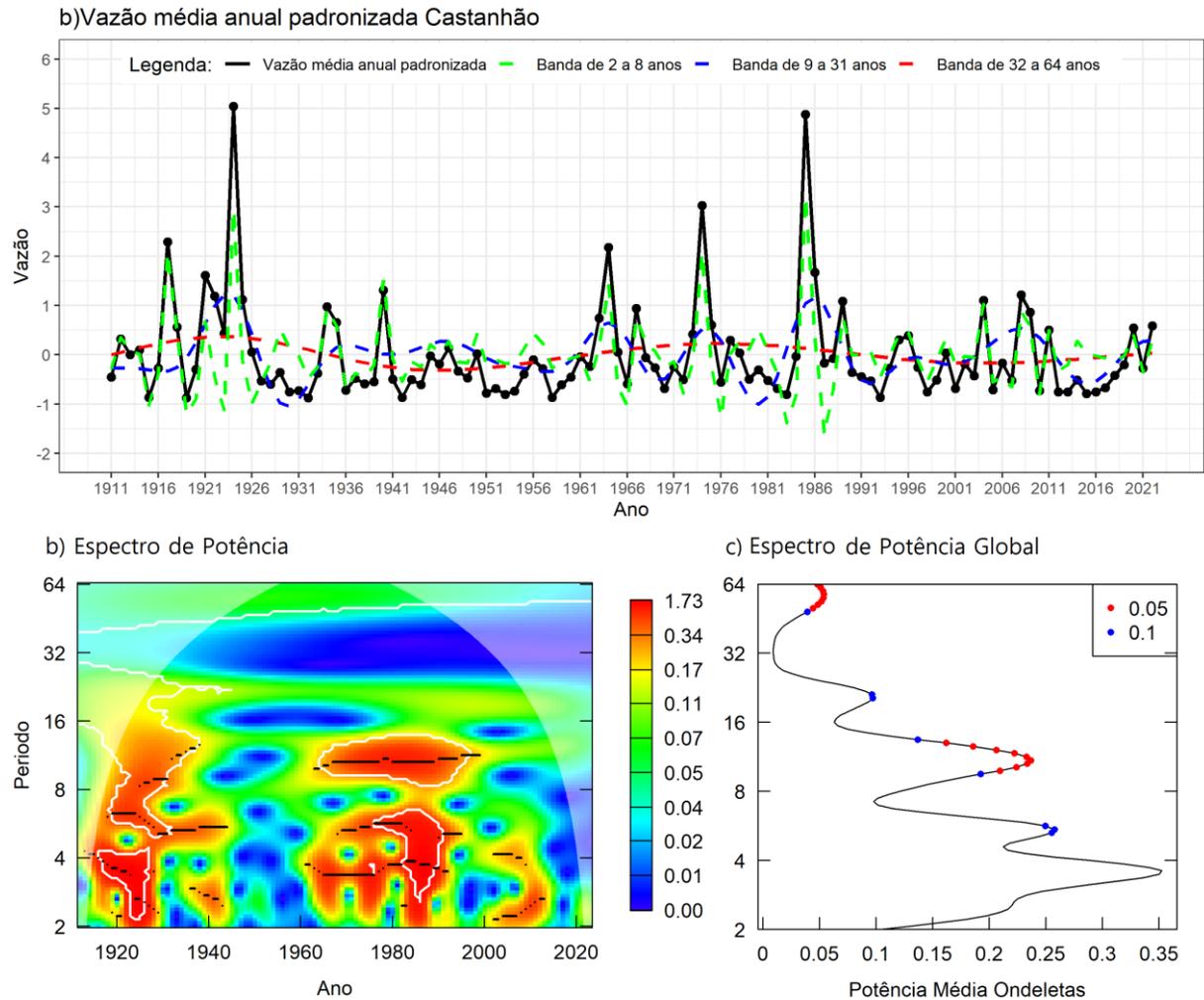
frequência entre 8 a 16 anos, picos significativos de potência na RHBM foram apontados entre a década de 70 e os anos 2000 ao passo que para as demais bacias foi apontado entre 1960 e 1990. Já as bandas de frequências superiores a 16 anos identificadas no espectro de potência, apresentaram uma influência moderadamente fraca entre 1930 e 1980. Nas figuras 7(a), 8(a), 9(a) e 10(a) a banda de alta frequência de 2 a 8 anos apresentou maiores picos espectrais em alguns anos, alguns destes são os mesmos apontados na seção anterior na análise da precipitação: 1917, 1974 e 1985.

Figura 7 - TSO de Morlet da série temporal de Vazão do Banabuiú (a) Série temporal da Vazão Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.



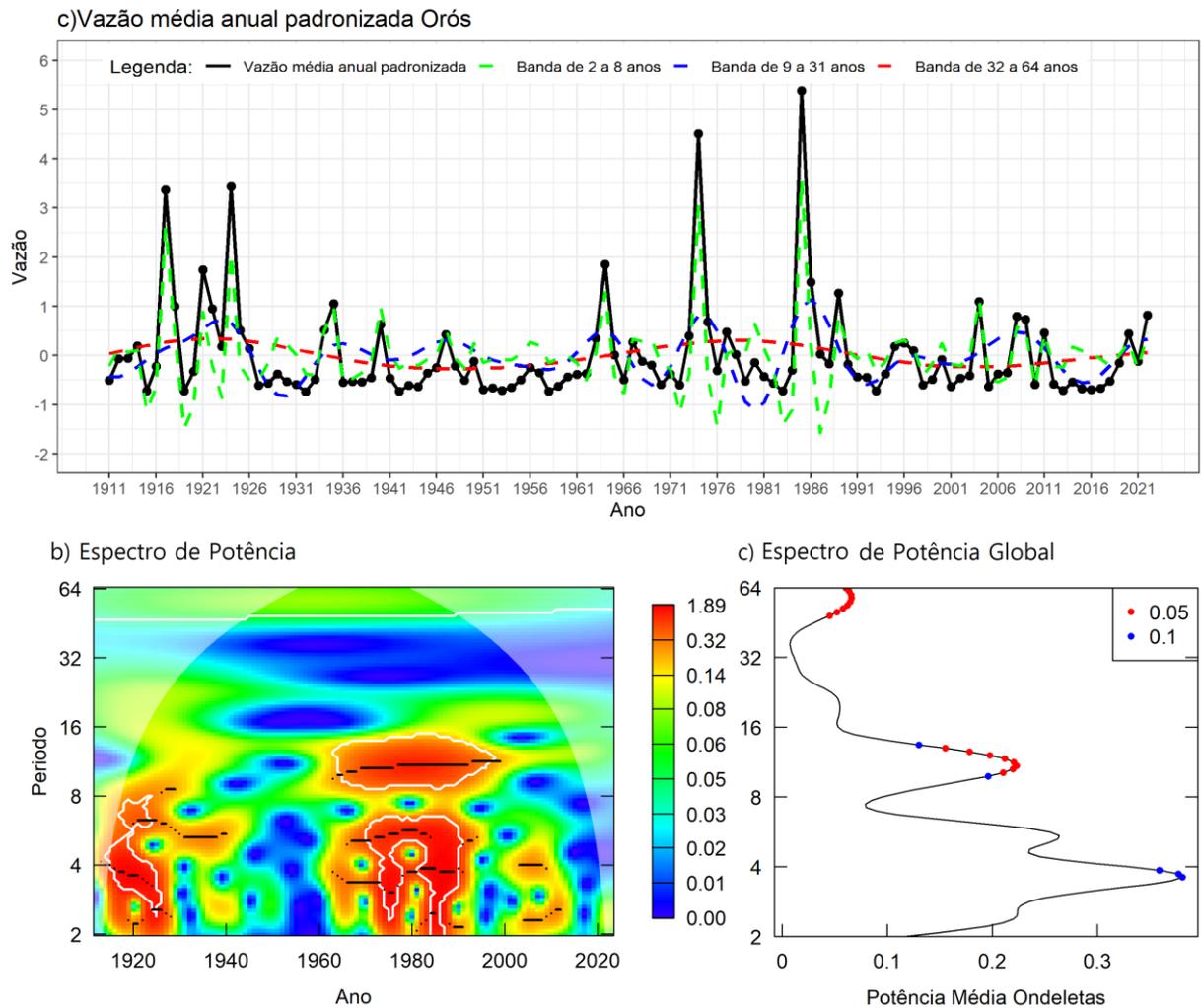
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8 - TSO de Morlet da série temporal de Vazão do Castanhão (a) Série temporal da Vazão Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.



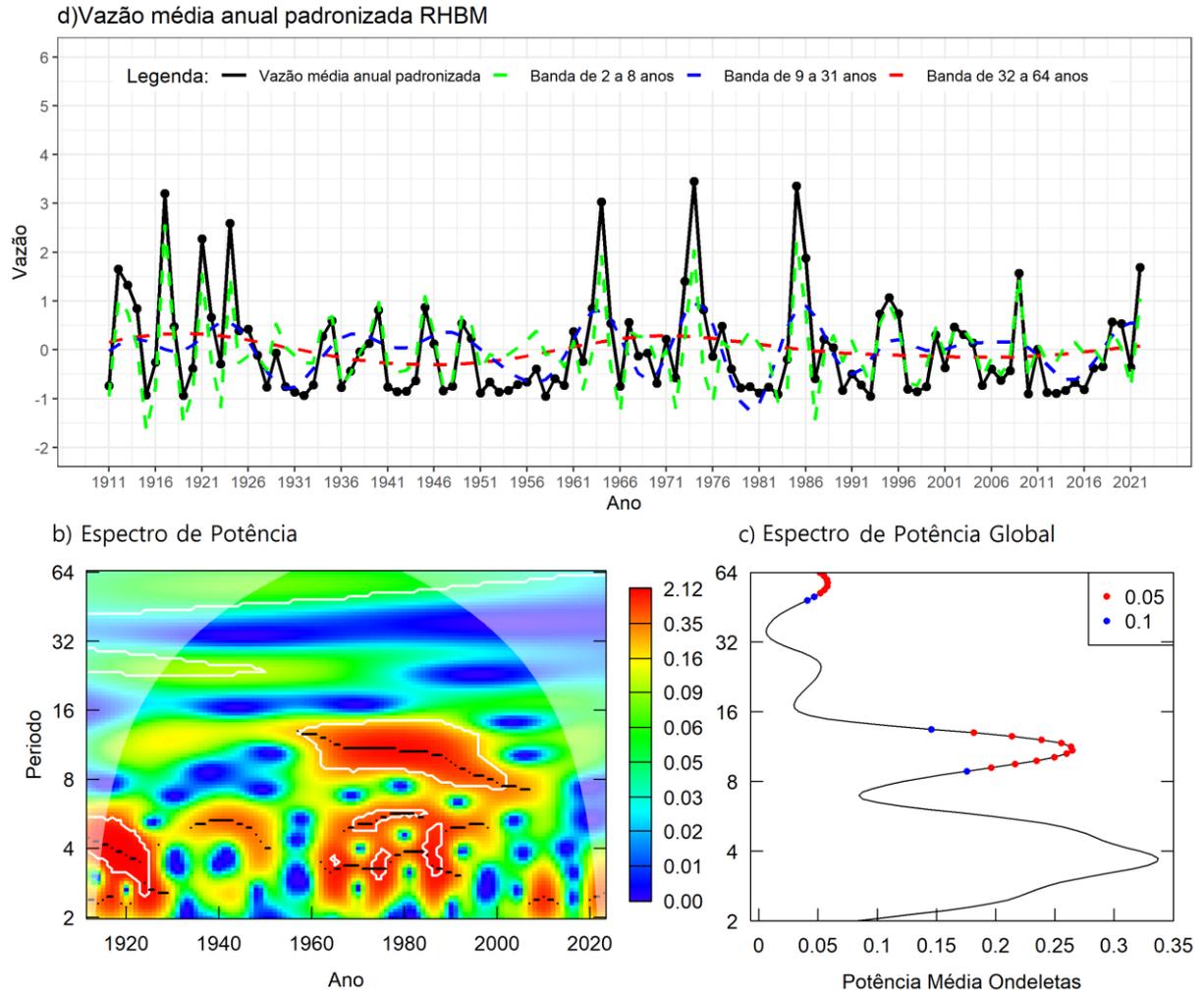
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 9 - TSO de Morlet da série temporal de Vazão do Orós (a) Série temporal da Vazão Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 - TSO de Morlet da série temporal de Vazão da RHBM (a) Série temporal da Vazão Média Anual Padronizada; (b) Espectro de potência da Wavelet, usando a Wavelet de Morlet. O x eixo é a localização da Wavelet no tempo. O eixo y é o período da Wavelet em anos; (c) Espectro de Potência Global.



Fonte: Elaborada pelo autor.

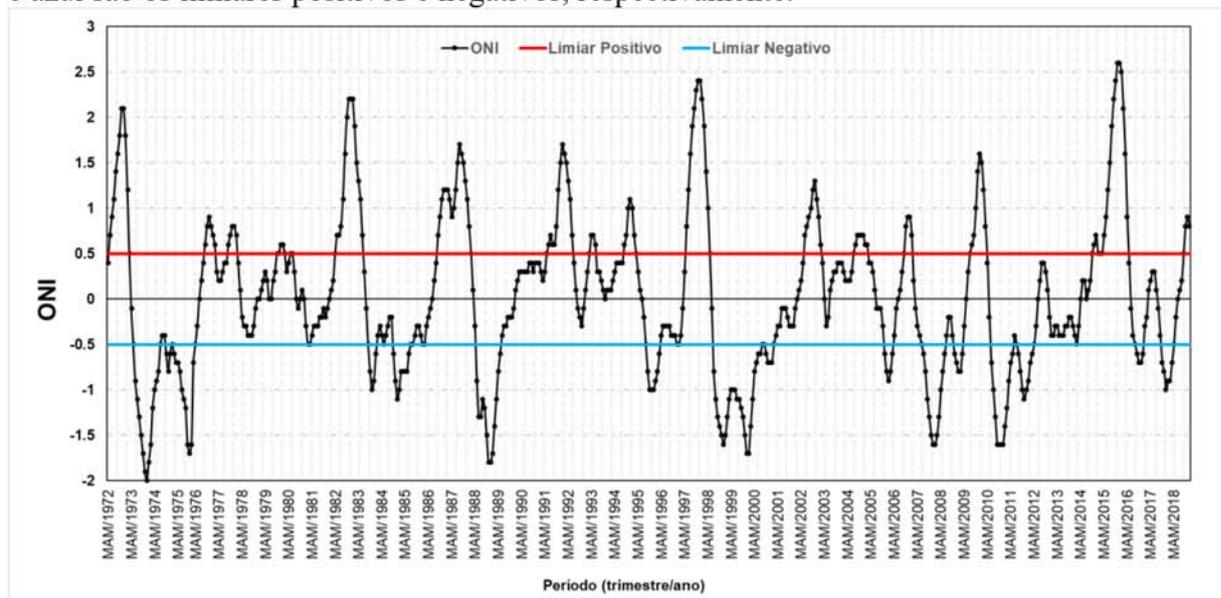
2.3.1.3.3 Eventos associados de ENOS, ODP e OMA

O *Oceanic Niño Index* (ONI) é usado para definir a fase da Oscilação do Sul El Niño (ENSO). É uma medida de quão anormalmente quente ou frio o Oceano Pacífico equatorial do centro ao leste é comparado ao "normal", suavizado por vários meses para reduzir ruídos e picos. Este índice simples é usado para identificar a fase do ENSO que possui teleconexões significativas em todo o mundo (Souza; Reboita, 2021).

Para obter o ONI, utiliza-se a temperatura média da superfície do mar na região NINO3.4 para cada mês e, em seguida, calculam a média com valores dos meses anteriores e seguintes. Essa média de três meses consecutivos é comparada a uma média de 30 anos. A diferença observada em relação à temperatura média nessa região - mais quente ou mais fria - é o valor do ONI para a estação de três meses (Souza; Reboita, 2021).

A Figura 11 apresenta os valores do ONI para o período trimestral de março a maio de 1972-2018.

Figura 11 - Anomalias da TSM referente ao ONI de 1972-2018. As linhas nas cores vermelho e azul são os limiares positivos e negativos, respectivamente.



Fonte: Adaptado do NOAA (2021).

A Figura 12 apresenta a anomalia da TSM no trimestre MAM, em relação à média climatológica trimestral de MAM de 1891 a 2019, nos anos a)1972 b)1975 c)1982 d)1988 e)1998 f)2007 g)2015 e h)2018 para as regiões TNAI e TSAI. De outro modo, a Figura 13 apresenta a anomalia da TSM no trimestre MAM, em relação à média climatológica trimestral de MAM de 1891 a 2019, nos anos a)1972 b)1975 c)1982 d)1988 e)1998 f)2007 g)2015 e

h)2018 para a região NINO3.4 e a Figura 14 apresenta as distribuições espaciais de anomalias das médias trimestrais de precipitação, entre os meses MAM, em relação à média climatológica trimestral, nos anos de (a) 1972, (b) 1975, (c) 1982, (d) 1988, (e) 1998, (f) 2007, (g) 2015 e (h) 2018 para as bacias dos reservatórios Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM (polígonos com linha de contorno na cor preto) e no Ceará (polígonos com linha de contorno na cor cinza). Os anos de 1972 e de 1998, especialmente este último, apresentaram os valores mais críticos de anomalias negativas de precipitação, abrangendo a totalidade das bacias analisadas e o estado do Ceará.

A Figura 14(a) ilustra o padrão sazonal de MAM da anomalia de precipitação associado ao evento de El Niño, que ocorreu simultaneamente às fases negativas da ODP e OMA em 1972. Observou-se um déficit pluviométrico com anomalias negativas fracas possivelmente justificadas, sobretudo, pelas fases iguais dos eventos supracitados aliado a ocorrência do El Niño, que apesar de ter sido classificado como de categoria forte no ano analisado, apresentava-se no período de decaimento após o pico. O que pode ser evidenciado pelas anomalias positivas da TSM entre +0,5 e +1,0 identificadas na região NINO3.4 – Figura 13(a). Da mesma forma, o ONI apresentou-se entre 0 e 0,5 (Figura 11). Na Figura 12 observa-se anomalias negativas no TNAI e anomalias positivas no TSAI. Isso caracteriza um fraco gradiente de norte para sul, que ajuda a ZCIT a se deslocar mais para o sul. A combinação de um El Niño forte e um dipolo do Atlântico negativo pode ter impactado em fracas anomalias negativas de precipitação. Resultados semelhantes foram apontados por Silva (2013), que observou a diminuição da precipitação mesmo sendo fase ODP fria e a amenização de anomalias mais severas que poderiam ocorrer em anos de El Niño no Estado do Ceará para o ano de 1972.

Para o ano 1975 – Figura 14(b) – identificou-se uma maior variabilidade espacial das chuvas especialmente sobre as bacias analisadas. Constatou-se precipitações um pouco acima da média histórica em grande parte do estado, com exceção de grande parte das bacias do Banabuiú, Orós e Sul do Castanhão. A maior atividade convectiva pode ter ocorrida pela forte atuação da La Niña em conjunto com padrão de dipolo promovido no campo de anomalia de TSM caracterizado por anomalias negativas no TNAI – ver Figura 12(b). A ocorrência de anomalias positivas de precipitação também pode estar associada com a fase negativa da OMA, onde a junção das mesmas fases frias com La Niña e OMA negativa, sugerem um aumento considerável nas chuvas médias.

A Figura 14(c) mostra o padrão sazonal de MAM em 1982 da anomalia de precipitação associado ao evento de El Niño, que ocorreu simultaneamente às fases positiva da

ODP e negativa da OMA. Em relação ao fenômeno ENOS, foram identificadas condições de aquecimento no Oceano Pacífico Equatorial, o que indica a maior contribuição da configuração deste sobre a escassez de chuvas no norte do NE. De acordo com a NOAA, o ONI apresentou o valor de +0,5, enfatizada por anomalias positivas de TSM, da ordem de +0,5 a +1,0 °C sobre a região NINO3.4 – Figura 13(c). Pinheiro et al. (2018) também identificaram maiores anomalias de TSM nesta região em anos de ocorrência de eventos El Niño. Anomalias de precipitação entre -60 e 20 mm foram observadas em grande parte do Estado do Ceará e se mostraram distintamente distribuídas. A ODP em sua fase quente deveria, no entanto, agir construtivamente ao evento de El Niño, promovendo anomalias negativas mais intensas do que o observado em todo o Estado (Gershunov; Barnett, 1998). Essa fraca inibição de chuvas sobre a região, pode ter sua causa associada à atuação da fase fria da OMA.

Considerando o conjunto de fases de La Niña com a ODP positiva e a OMA negativa no ano de 1988 – Figura 14(d), esta configuração possivelmente contribuiu para anomalias positivas em praticamente todo o Estado do Ceará. Resultados similares foram encontrados por Silva (2013) que concordando com a Teoria de Gershunov e Barnett (1988), a junção das mesmas fases frias com La Niña e OMA negativa, promoveram o maior aumento nas chuvas médias anuais do Ceará, nos casos analisados. Observou-se anomalias enfraquecidas, indicando anomalias entre -20 e 60 mm em grande parte das bacias analisadas. Isso pode estar associado a ocorrência da ODP em sua fase positiva que contribui para a diminuição da precipitação, uma vez que estava em uma fase oposta ao do ENOS.

O ano 1998 – Figura 14(e) – se destacou como um ano de seca severa em todo o Estado do Ceará. Para o trimestre MAM, identificou-se anomalias entre -40 e -100 mm nas regiões das bacias, chegando inclusive a ultrapassar os 100 mm abaixo da média histórica em outras regiões, principalmente na Zona Norte e Região Metropolitana. Essas anomalias negativas tão intensas podem ser explicadas pela ocorrência simultânea das fases positivas da OMA e ODP aliada às condições de aquecimento no Oceano Pacífico Equatorial – em que a região NINO3.4 registrou anomalias de TSM de até 3 °C – Figura 13(e) – e ONI de 1,0 (Figura 11), fatores que colaboraram para a amenização da El Niño de categoria forte (0).

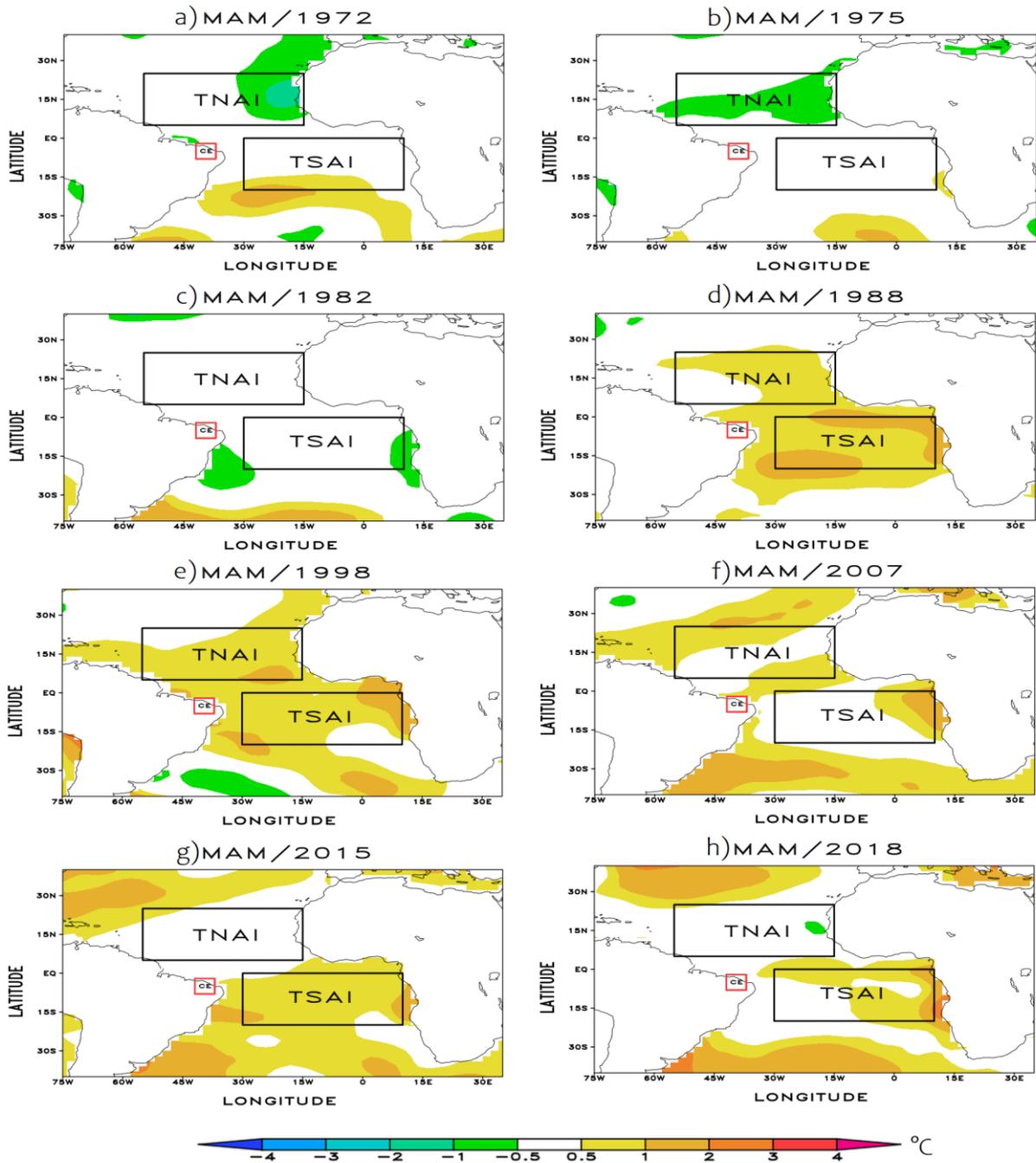
As precipitações em MAM de 2007 foram também menores, especialmente sobre a totalidade das bacias do Orós, Castanhão e grande parte da RHBM – Figura 14(f). Observou-se a ocorrência da ODP na sua fase quente e OMA na fase fria, com anomalias negativas de precipitação entre 20 e 80 mm. A ODP positiva pode ter colaborado para a redução da precipitação ao passo que o evento ENOS e OMA agiam em caráter construtivo. O padrão observado também pode estar associado a configuração de gradiente inter-hemisférico positivo,

com TNAI mais anormalmente positivo que o TSAI (Figura 12), pode ter contribuído para uma posição da ZCIT mais ao norte da sua posição climatológica.

No ano de 2015 se estabeleceu a ocorrência do evento El Niño (0) com as fases quentes da ODP e da OMA, apresentando uma considerável redução da precipitação em MAM em grande parte do Estado do Ceará (à exceção de algumas regiões, tais como parte do Centro-Sul, Cariri e uma pequena porção do Inhamuns e em termos de bacia: grande parte do Orós e Castanhão) – ver Figura 14(g). Na área compreendida pelas bacias, observou-se anomalias de precipitação entre 20 a 80 mm abaixo da média histórica, e alcançando valores inferiores a - 100 mm em uma pequena região da Zona Norte do Estado. Apesar dos eventos supracitados estarem em fases iguais, o que deveria provocar anomalias negativas e mais intensas de chuvas em todo o Estado, isto não foi totalmente observado. Fato que pode estar associado ao gradiente meridional de TSM nas áreas tropicais do Oceano Atlântico com condições anômalas de aquecimento no TSAI – ver Figura 12(g).

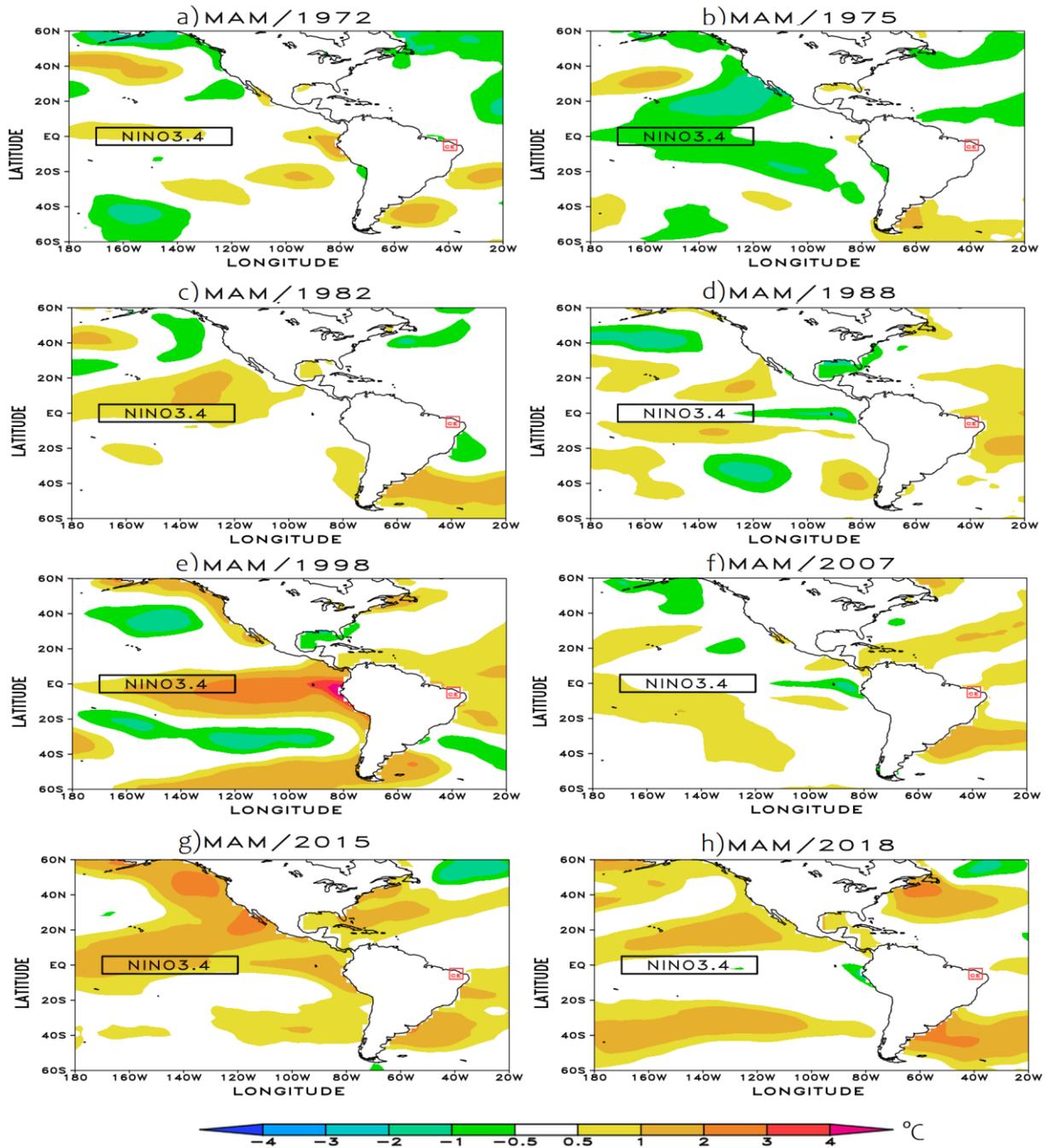
Para MAM de 2018 – Figura 14(h) – identificou-se uma maior variabilidade espacial das chuvas especialmente sobre as bacias analisadas. Essa variabilidade espacial da anomalia de precipitação pode ser explicada pelas fases opostas dos eventos de El Niño, e ODP (-) e OMA (+), os quais agiram “destrutivamente”, o que pode ter provocado anomalias fracas e mal definidas. Constatou-se precipitações ligeiramente acima da média histórica em partes do Sertão Central e Vale do Jaguaribe. A ocorrência de anomalias positivas de precipitação pode estar associada com a fase negativa da ODP, promovendo um aumento nas chuvas médias. Para o restante do Estado, especialmente a Zona Norte, Região Metropolitana, Centro-Sul e Cariri, observou-se anomalias negativas. Estas chuvas mostraram-se mais fracas, em módulo, o que pode estar relacionado com a atuação da ODP em sua fase fria, aliado ao posicionamento da ZCIT possivelmente mais ao sul, conforme padrão de dipolo promovido no campo de anomalia de TSM caracterizado por anomalias positivas no TSAI – ver Figura 12(h).

Figura 12 - Anomalia da TSM referente ao TNAI e TSAI, para o trimestre MAM nos anos a)1972 b)1975 c)1982 d)1988 e)1998 f)2007 g)2015 e h)2018. De acordo com a média climatológica trimestral de MAM de 1891 a 2019. Unidade em °C.



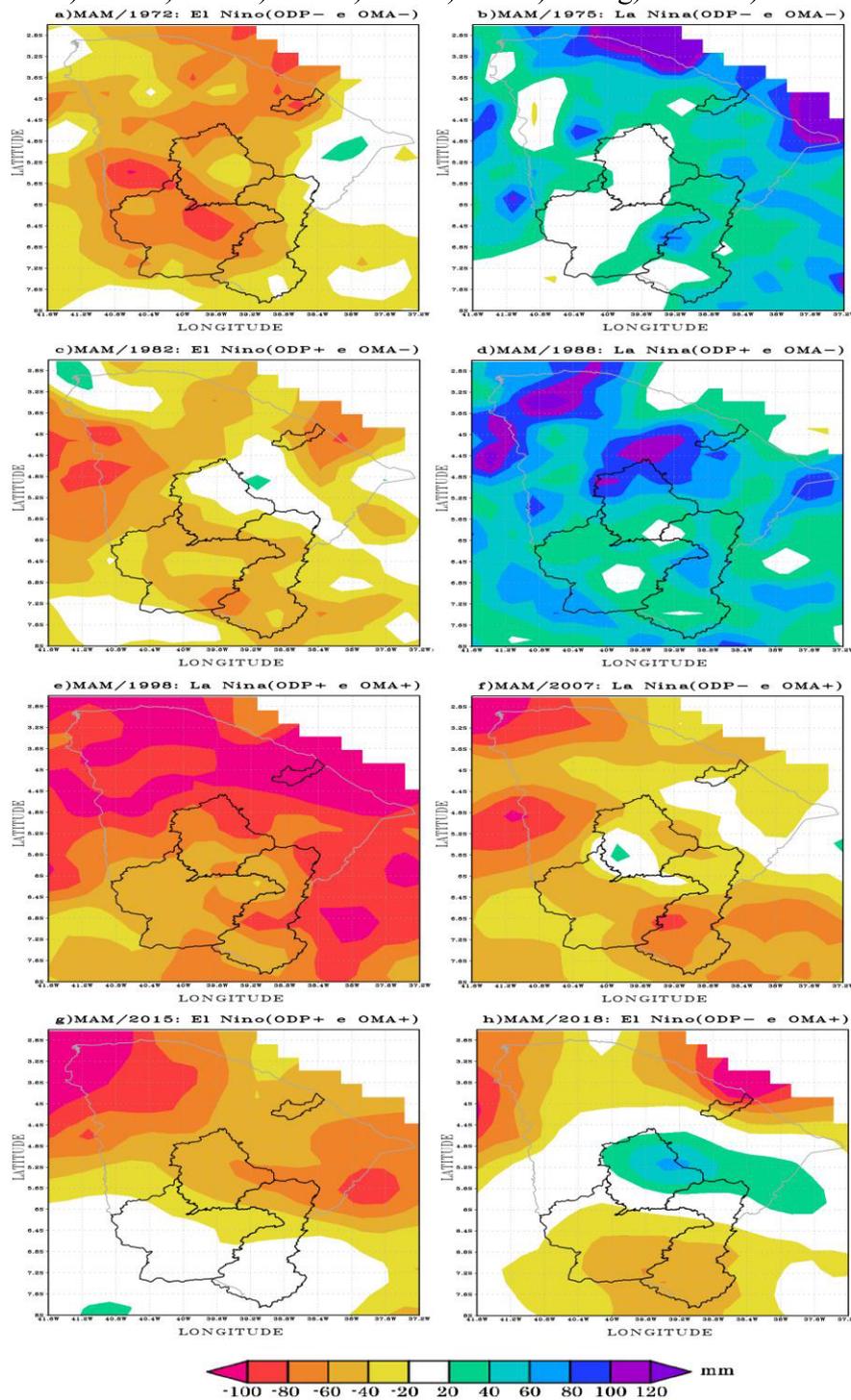
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 13 - Anomalia da TSM referente a região NINO3.4, para o trimestre MAM nos anos a)1972 b)1975 c)1982 d)1988 e)1998 f)2007 g)2015 e h)2018. De acordo com a média climatológica trimestral de MAM de 1891 a 2019. Unidade em °C.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14 - Distribuição espacial de anomalias de precipitação no Ceará e nas bacias dos reservatórios Banabuiú, Castanhão, Orós e na RHBM em a)1972 b)1975 c)1982 d)1988 e)1998 f)2007 g)2015 e h)2018.



Fonte: Elaborada pelo autor.

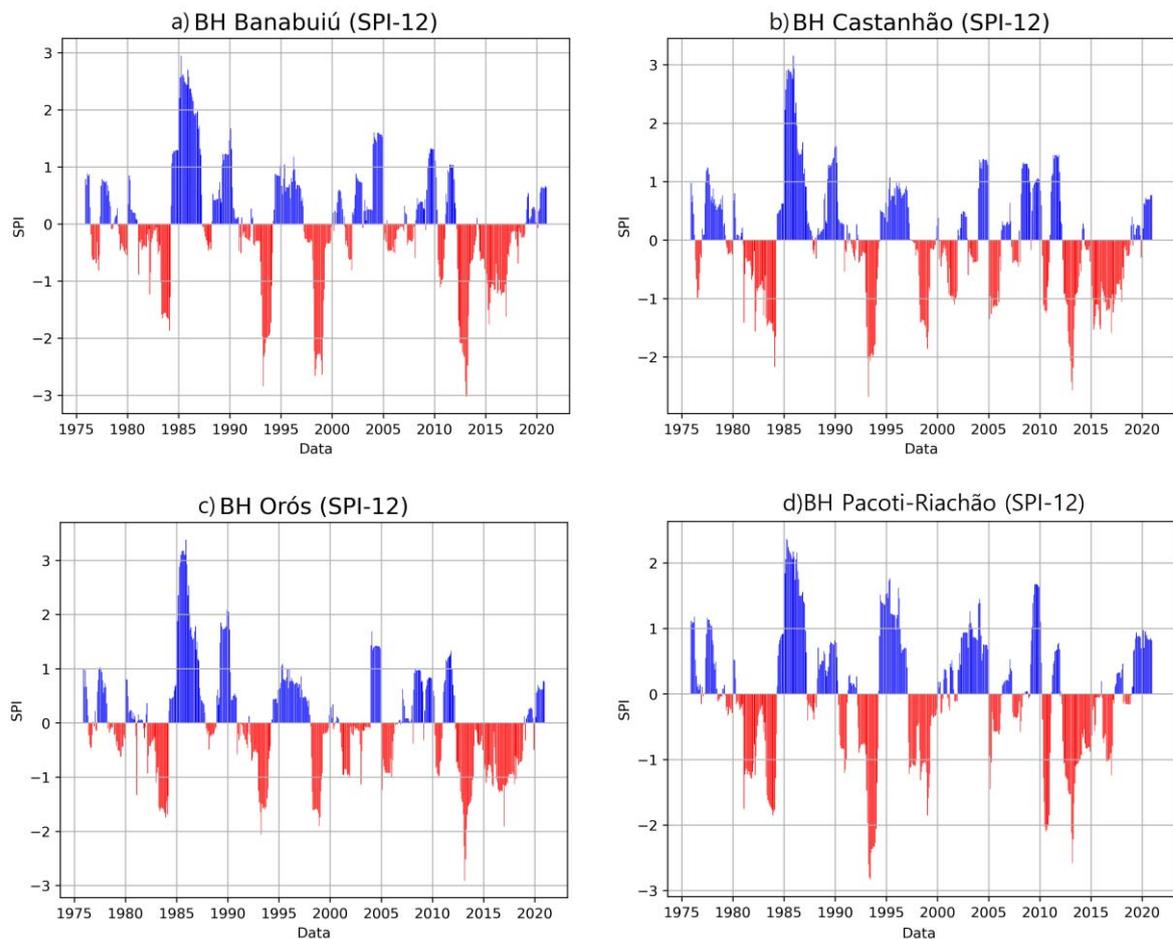
Todos esses resultados estão em conformidade com pesquisas anteriores, as quais indicam que a anomalia positiva da TSM provoca o deslocamento da ZCIT para uma posição mais ao norte (Nobre; Shukla, 1996, Lucena *et al.*, 2011). Como resultado, ocorre uma

diminuição da precipitação durante a estação chuvosa no norte do NEB. Além desse fator, observou-se também, em casos de anomalia positiva de precipitação, o predomínio de eventos ENOS que, em conjunto com esse gradiente, atua no sentido de reduzir as chuvas sobre a estação chuvosa da região. De outro modo, as variações sazonais nas anomalias de precipitação destacam a considerável influência do gradiente meridional negativo sobre os padrões de precipitação. Isso se justifica pela posição mais ao sul da ZCIT, o que favorece a ocorrência de precipitação sobre o NEB, principalmente.

2.3.1.4 Análise do SPI e SRI

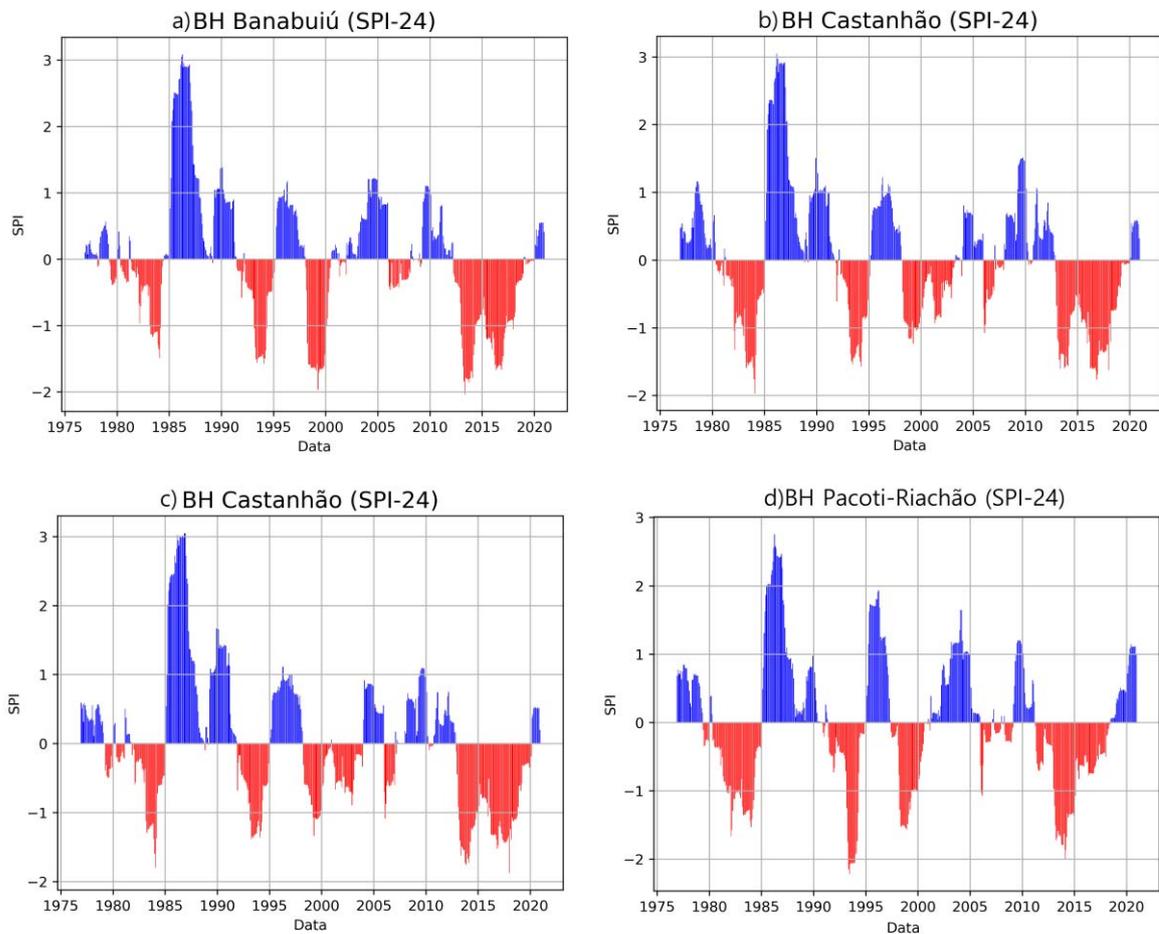
As Figuras 15 e 16 apresentam, respectivamente, o índice SPI de 12 meses (SPI-12) e 24 meses (SPI-24) para Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM no período de 1975 a 2020.

Figura 15 - Índice SPI na escala SPI-12 para a) Banabuiú b) Castanhão c) Orós e d) RHBM, no período de 1975 a 2020.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 - Índice SPI na escala SPI-24 para a) Banabuiú b) Castanhão c) Orós e d) RHBM, no período de 1975 a 2020.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para períodos nos quais verificou-se eventos extremos na Figura 15, observou-se uma suavização desses episódios ao passo de aumento da escala temporal para SPI-24, mostrado na Figura 16, em virtude da própria metodologia que se associa a média móvel, segundo Mckee *et al.* (1993).

Episódios de maior intensidade e duração foram bem definidos nestas escalas. O que facilitou a identificação de uma acentuada variabilidade interanual na escala de 12 meses, sendo o período de 2012 a 2020 o que apresentou uma maior frequência de eventos em situação de déficit de precipitação. Hiera, Lima Júnior e Zanella já haviam apontando em seu estudo, através da análise da tendência na precipitação do Estado do Ceará, que a década de 2010 se destaca das demais (no período compreendido entre 1974 a 2016) pela intensa redução na precipitação média do Estado. Nascimento *et al.* (2017) também verificaram a significativa variabilidade interanual em escalas menores e a presença de seca severa e seca moderada em períodos concomitantes aos apontados neste trabalho para a mesma região de estudo e,

sugeriram uma revisão das medidas de controle de abastecimento de água dos reservatórios. Esse é também o período seco mais longo já registrado, conforme reportado na literatura recente (Marengo *et al.*, 2020; Pontes Filho *et al.*, 2020). Pontes Filho *et al.* (2020) apontaram também como principais causas para a ocorrência desse evento e sua persistência, uma série de combinação de anomalias de alta e baixa frequência da TSM, conforme identificado e descrito para alguns desses anos na seção 2.3.2.3.3. Ao passo que Nascimento *et al.* (2017) apontam que a ODP e a AMO também afetam significativamente o regime de precipitações no Ceará.

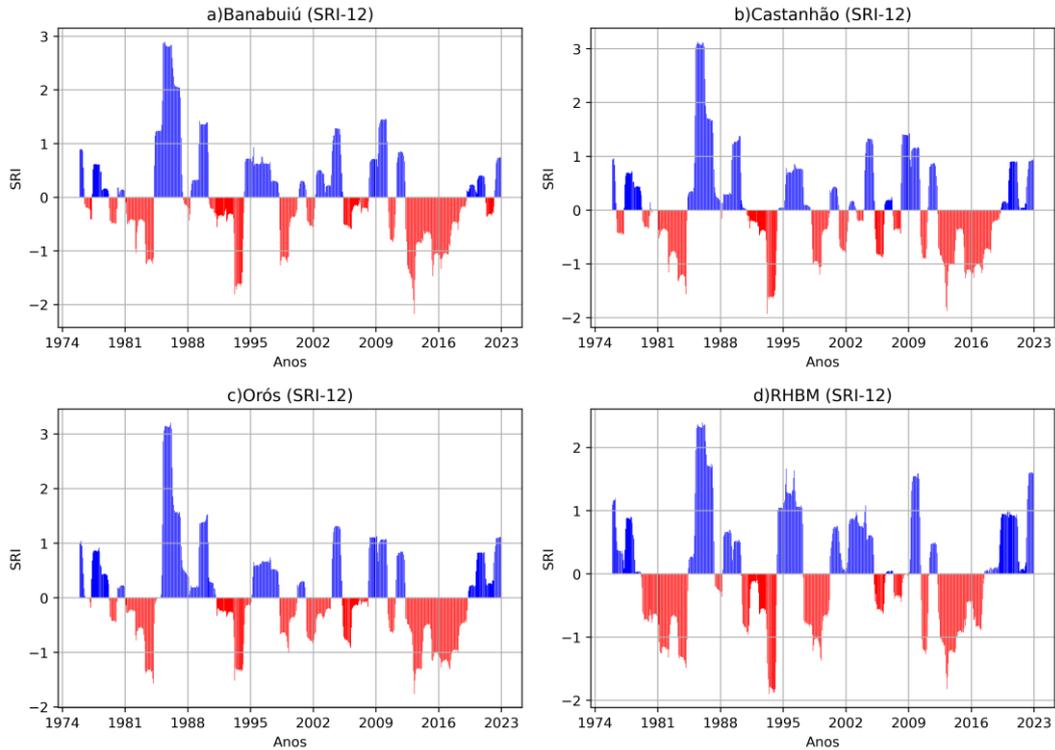
Os valores de SPI-12 apontaram eventos de até -3,02 (fevereiro/2013), -2,67 (abril/1993), -2,90 (março/2013) e -2,83 (junho/1993) nas bacias do Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM, respectivamente. Para a escala de 24 meses, os valores de SPI ainda indicam situação de déficit hídrico, no entanto de menor intensidade, sendo os eventos mais intensos obtidos de -1,56 (dezembro/1998), -1,96 (fevereiro/1984), -1,87 (janeiro/2018) e -1,57 (fevereiro/1994) no Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM, respectivamente. Em ambas escalas, os eventos extremos supracitados se categorizaram em secas severas e extremas, conforme a classificação apresentada na Tabela 2.

Todas as bacias identificaram secas severa, extrema ou moderada nos períodos compreendidos entre 1983-1984, 1993-1994 e 1998-1999, anos nos quais estiveram sobre a atuação de fenômenos El Niño - Oscilação Sul. Resultados semelhantes a estes foram apresentados anteriormente no estudo de Pontes Filho *et al.* (2020) que apontou alguns desses anos como de ocorrência de eventos extremos de seca. Os autores associaram este fato aos sistemas de teleconexões do ENOS e a circulação no Atlântico, que afetam de maneira uniforme todas as bacias, dificultando a transferência de água entre as regiões hidrográficas.

De outra forma, os eventos de maior duração de déficit hídrico no SPI-12 foram apontados em Banabuiú, Orós e RHBM com períodos de 14, 16 e 20 meses, respectivamente, e no SPI-24 em Castanhão, Orós e RHBM com períodos de 29, 31 e 27 meses, respectivamente.

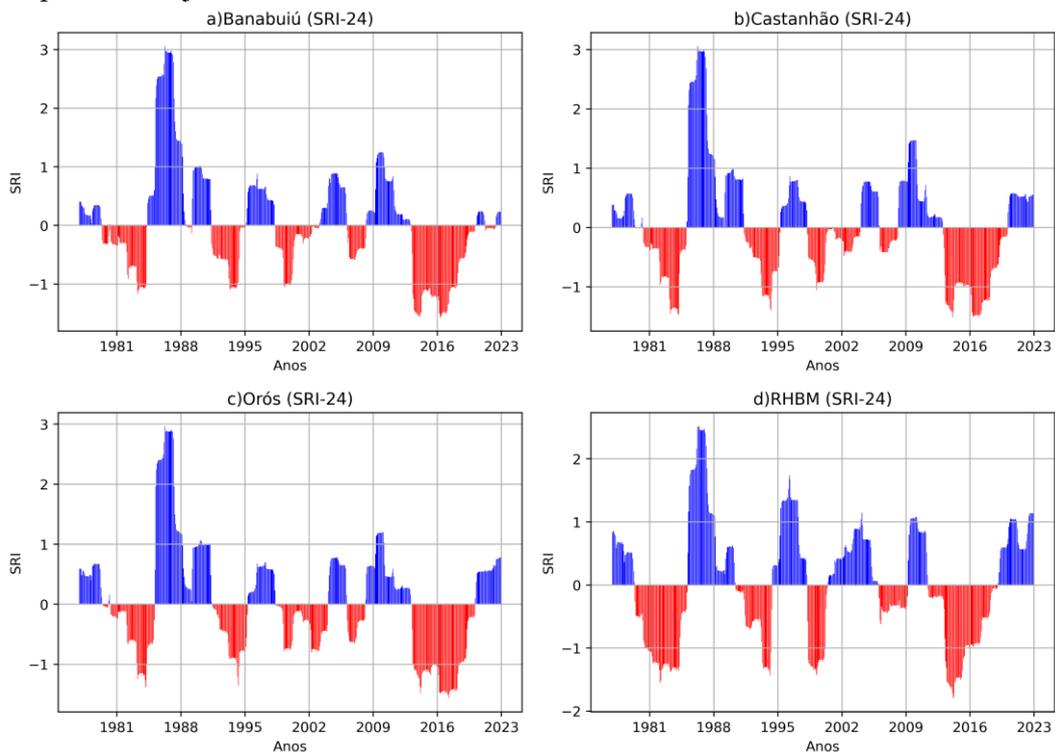
A análise dos eventos de seca a partir do SRI, foi realizada utilizando os critérios de classificação apresentados na Tabela 3, a qual mostra a classificação das secas em quatro categorias – ligeira, moderada, severa e extrema, baseando-se nos valores de SRI mensal. As Figuras 17 e 18 apresentam, respectivamente, o índice SRI de 12 meses (SRI-12) e 24 meses (SRI-24) no período de 1975 a 2022 para (a) Banabuiú, (b) Castanhão, (c) Orós e (d) RHBM.

Figura 17 - Índice SRI na escala SRI-12 para a) Banabuiú b) Castanhão c) Orós e d) RHBM, no período de janeiro de 1975 a dezembro de 2022.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 - Índice SRI na escala SRI-24 para a) Banabuiú b) Castanhão c) Orós e d) RHBM, no período de janeiro de 1975 a dezembro de 2022.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim como observado para o SPI, identificou-se uma atenuação na intensidade dos eventos de seca/umidade para a escala temporal de 24 meses quando comparado ao SRI-12. Também observou-se a menor variabilidade interanual destes eventos nesta escala. Além disso, também identificou-se o período de 2011 a 2020 como o mais longo a registrar eventos em situação de déficit de precipitação. Gonçalves (2019) também identificou para o mesmo índice e na mesma escala (12 meses) uma queda acentuada dos valores do SRI entre os anos de 2011 a 2018, justificando-a pelas baixas precipitações desse período no Estado.

A observação de uma atenuação na intensidade desses eventos em uma escala temporal mais longa pode indicar uma maior capacidade de recuperação ou suavização das condições climáticas ao longo de um período mais extenso. Isso pode ser interpretado como uma adaptação natural do sistema hídrico às variações climáticas. Por um lado, pode indicar uma maior previsibilidade, facilitando o planejamento. Por outro lado, uma estabilidade prolongada pode indicar a persistência de padrões climáticos indesejados, como secas prolongadas.

Os valores de SRI-12 apontaram eventos de até -1,98 (agosto a dezembro/2016), -1,37 (abril/2015), -6,20 (dezembro/2001) e -2,06 (novembro/2016) nas bacias do Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM, respectivamente. Para a escala de 24 meses, os episódios mais extremos obtidos foram de -1,93 (abril/2017), -1,65 (abril/2016), -1,46 (fevereiro/2017) e -1,76 (janeiro/2017) em Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM, respectivamente. Em ambas escalas, os eventos extremos supracitados se categorizaram em secas moderadas, severas e extremas, conforme a classificação apresentada na Tabela 3. Em relação ao SRI-12, as bacias identificaram concomitantemente classificações de severidade variando entre seca moderada a seca extrema nos períodos compreendidos entre 1982-1984 (à exceção de RHBM), 1992-1994 e 1998-1999 (à exceção de Banabuiú) e a partir de 2010 até o presente momento, períodos que sofreram influência de fenômenos ENOS. Na sequência de meses de eventos secos analisados para o SRI-24, não foi identificado a categoria de seca extrema. As bacias identificaram secas nos períodos concomitantes compreendidos entre 1983-1984 (à exceção de RHBM), 1991-1996, 1998-2003, 2006-2008 e a partir de 2011 até o presente, períodos nos quais estiveram sobre a atuação de fenômenos El-Niño Oscilação Sul.

Eventos de maior duração de déficit hídrico no SRI-12 foram apontados em Banabuiú, RHBM e Castanhão com períodos de 115, 114 e 92 meses, respectivamente. Enquanto que no SRI-24 foram apontados na RHBM, Banabuiú e Castanhão com períodos de 116, 104 e 83 meses, respectivamente. Em ambas escalas, estes eventos foram identificados a partir do ano 2010 perdurando até o presente momento. Também observou-se um maior

quantitativo de eventos secos em Orós, totalizando nove e seis eventos ao longo das séries temporais analisadas de SRI-12 e SRI-24, respectivamente.

No apêndice é possível encontrar tabelas contendo maiores informações de Início, Fim, Duração, SPI e SRI Médios e Categoria dos eventos de seca de maior duração identificados para cada bacia durante o período analisado nas escalas 12 e 24 meses.

2.4 CONCLUSÃO

Este capítulo objetivou investigar como se dão os regimes pluviométricos e fluviométricos e quais escalas e oscilações exercem influência sobre a variabilidade pluviométrica do estado do Ceará, especificamente sobre as bacias dos reservatórios Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM. Para isto, dados mensais e anuais de precipitação e vazão foram utilizados nas análises das principais estatísticas descritivas e na investigação das variabilidades sazonal, interanual, interdecadal e multidecadal das séries de dados supracitadas.

Nas análises dos dados de precipitação verificaram-se regimes pluviométricos diários e mensais similares em três das quatro bacias. Por outro lado, no regime anual, RHBM deteve valores elevados para média, desvio padrão, máxima e mínima, ao passo que Banabuiú apresentou a menor média e as menores precipitações máxima e mínima. A dispersão dos dados se mostrou próxima da homogeneidade, em relação à média anual, de acordo com o coeficiente médio de variação de 33,15%.

Quanto à análise da sazonalidade, todas as bacias apresentaram um ciclo sazonal de precipitação bem definido. O trimestre mais seco ocorre entre agosto e outubro, e o trimestre mais chuvoso entre março e maio, modulado, principalmente, pelo posicionamento latitudinal da ZCIT. Identificou-se também uma alta irregularidade pluviométrica ao longo do ano. Quanto à análise da variabilidade (inter)anual, a análise de Ondaletas para as séries de precipitação e vazão identificou uma forte influência de eventos com alta frequência entre 2 a 6 anos, tais como fenômeno ENOS, e entre 7 e 15 anos, onde pode-se especular que esse sinal seja representativo da influência do Oceano Atlântico. Além disso, padrões decadais e multidecadais de variabilidade também foram identificados, o que indica a influência de eventos ODP e OMA sobre o regime pluviométrico das bacias analisadas.

A ocorrência simultânea entre as fases iguais ou opostas dos eventos de ODP, OMA e ENOS mostraram efeitos combinados na distribuição anômala da chuva sobre algumas regiões. Um maior déficit pluviométrico, por exemplo, foi identificado durante a ocorrência de eventos ENOS quando associados às fases quentes da ODP e OMA (como observado em 1998 e 2015); El Niños mostraram efeitos amenizados quando sob fases negativas e/ou contrárias da ODP e OMA (como mostrado em 1972, 1982 e 2018); La Niñas tiveram anomalias positivas (negativas) de precipitação quando associadas à OMA em sua fase fria (quente), ao passo que, a associação das mesmas fases de La Niña e ODP promoveram diminuição nas chuvas, quando estão nas suas fases positivas, e aumento nas chuvas, quando se encontram na fase negativa dos dois eventos (como identificado nos anos 1975, 1988, 1998 e 2007).

Através do cálculo do SPI e SRI, observou-se uma acentuada variabilidade interanual desses índices. Uma maior ocorrência de eventos de seca foi identificada entre os anos de 2012 a 2018 para o SPI e de 2011 a 2020 para o SRI, com melhor representação na escala interanual para ambos os índices, considerando-se a intensidade e duração. Os eventos extremos de seca identificados pela análise do SPI se categorizaram em secas severas e extremas. Além disso, se constatou uma relação entre os períodos desses eventos e os períodos que registraram a ocorrência de fenômenos ENOS, o que reforça, na maioria dos casos analisados, a influência dos eventos de circulação de grande escala sobre a região de estudo. Os eventos de maior duração de déficit hídrico no SPI-12 foram apontados em Banabuiú, Orós e na RHBM. Em relação ao SRI-12, as bacias identificaram concomitantemente classificações de severidade variando entre seca moderada a seca extrema. Eventos de maior duração de déficit hídrico foram apontados em Banabuiú, RHBM e Castanhão.

Este capítulo sugere, como resultado, que eventos extremos de secas e chuvas já são uma realidade e que podem se tornar cada vez mais frequentes nas próximas décadas. Além disso, investigou-se o padrão de comportamento para fases de ENOS, ODP e OMA e constatou-se a influência desses eventos e da resposta da anomalia de TSM e seus impactos nos padrões de precipitação no estado do Ceará. Esses resultados instigam o acompanhamento climático dos referidos eventos de forma a subsidiar o planejamento, previsão e/ou mitigação dos efeitos de eventos intensos de seca sobre a referida região, e ecossistema, bem como o consequente avanço de secas meteorológicas para secas agrícola e hidrológica, fornecendo também condições básicas para a tomada de decisões, diante das frequentes variações sazonais e interanuais do clima.

3 ANÁLISE DA DEMANDA HÍDRICA NOS SETORES DE IRRIGAÇÃO, ABASTECIMENTO HUMANO E INDÚSTRIA NO HIDROSSISTEMA JAGUARIBE: PERSPECTIVAS PARA O FUTURO

3.1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a manutenção da vida em nosso planeta e é fundamental para diversas atividades humanas, como a produção de alimentos, a geração de energia, a manufatura de produtos e muitas outras. No entanto, o aumento do consumo em função do crescimento populacional e industrial tem gerado conflitos pelo seu uso. Esses conflitos são impulsionados também pelo desenvolvimento econômico, uma vez que a água é um recurso fundamental para diversas atividades econômicas, como agricultura, indústria e turismo.

Ritchie e Roser (2018) apontam que a população mundial se aproximará de 10 bilhões nos próximos 30 anos, e uma proporção significativa desse crescimento ocorrerá nos países em desenvolvimento. Hoje, mais da metade da população mundial vive em áreas urbanas, particularmente em cidades altamente densas; até 2050, mais de dois terços da população viverão em áreas urbanas. Com base nos fatos de que os suprimentos de água doce disponíveis na Terra permanecerão os mesmos, sendo distribuídos de forma desigual, essas áreas urbanas sofrerão com estresse hídrico, aumentando os conflitos entre os usuários, particularmente entre os setores urbano, agrícola e industrial (Niva *et al.*, 2020; Flörke; Schneider; McDonald, 2018).

Uma vez que a escassez de água se refere à falta de recursos de água doce para atender à demanda de água, a escassez aguda e crônica afeta 4 bilhões de pessoas em todo o mundo, um número que provavelmente aumentará nos próximos anos devido ao crescimento populacional (Tzanakakis; Paranychianakis; Angelakis, 2020). A região do Ceará, assim como outras áreas do Nordeste brasileiro, sofre com períodos de escassez hídrica, o que pode afetar a disponibilidade de água para consumo humano, irrigação e outros usos.

A escassez hídrica é um dos principais desafios enfrentados pelo estado do Ceará em relação ao uso da água. Nesse sentido, os estudos realizados sobre a demanda hídrica são fundamentais para compreender e gerir melhor os recursos hídricos disponíveis no estado, garantindo o abastecimento da população e a preservação dos ecossistemas. Para lidar com a escassez hídrica, é necessário entender como a demanda de água varia ao longo do tempo e do espaço, identificar as principais fontes de consumo de água e desenvolver estratégias para gerir a demanda e conservar os recursos hídricos. Além disso, é importante avaliar o impacto das

mudanças climáticas e dos processos de desertificação na disponibilidade de água e na demanda hídrica.

Alguns estudos realizados sobre a demanda hídrica no estado do Ceará fornecem informações cruciais para orientar políticas públicas e ações para mitigar a escassez hídrica. Souza Neto e de Souza (2018), por exemplo, analisaram o comportamento da demanda hídrica urbana em Fortaleza, capital do estado do Ceará. Para isso, foram coletados dados mensais de consumo de água fornecidos pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), no período de janeiro a dezembro de 2015. A análise dos dados foi feita utilizando técnicas estatísticas. Os resultados mostraram a relação entre fatores como temperatura, umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica, dia da semana e horário com o consumo de água na cidade. As conclusões obtidas a partir da análise dos dados indicaram que as condições climáticas têm forte influência sobre o consumo de água em Fortaleza e que a adoção de medidas de gestão da demanda hídrica se faz necessária para garantir a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos na região.

O estudo de Mendonça *et al.* (2019) buscou analisar o estresse hídrico na região Nordeste do Brasil, utilizando o estado do Ceará como estudo de caso. A metodologia utilizada consistiu em análise de dados de precipitação e evapotranspiração para avaliar a disponibilidade hídrica na região, e em análise de dados de consumo de água para avaliar a demanda hídrica. Foram utilizados dados de precipitação e evapotranspiração de longo prazo (de 1981 a 2010) para calcular o Índice de Precipitação de Palmer (PDSI), que indica o grau de seca na região. Além disso, foram coletados dados de consumo de água em diferentes setores, como abastecimento urbano, irrigação e indústria. Os resultados indicaram que a região Nordeste do Brasil apresenta um alto grau de estresse hídrico, com períodos frequentes de seca e baixa disponibilidade hídrica. No caso do Ceará, o consumo de água é liderado pelo setor de irrigação, seguido pelo abastecimento urbano e pela indústria. O estudo apontou a necessidade de políticas públicas voltadas para a gestão da demanda de água e para a promoção do uso sustentável dos recursos hídricos na região.

O estudo realizado por Filho, Lucena e Souza Neto em 2019 teve como objetivo avaliar a vulnerabilidade do sistema hídrico de uma região do semiárido cearense, utilizando indicadores físicos e socioeconômicos. Para isso, foram realizadas análises de dados secundários de diversas fontes, como a ANA, o IBGE e a CAGECE. Foram utilizados indicadores como a disponibilidade hídrica per capita, a relação entre demanda e oferta hídrica, a vulnerabilidade socioeconômica e o índice de seca meteorológica para avaliar a vulnerabilidade do sistema hídrico. Os resultados indicaram uma elevada vulnerabilidade do

sistema hídrico, principalmente em relação à disponibilidade hídrica per capita e à relação entre demanda e oferta hídrica. Os autores ressaltam a importância de considerar não apenas os aspectos físicos, mas também os socioeconômicos na avaliação da vulnerabilidade do sistema hídrico, e sugerem que as informações obtidas podem contribuir para a gestão integrada dos recursos hídricos e para a adoção de medidas de adaptação à escassez de água.

Os estudos realizados por Mendonça *et al.* (2019) e Souza Neto e de Souza (2018) abordam o tema da demanda hídrica no Estado do Ceará, considerando a influência dos perímetros irrigados e das atividades econômicas na região. Os perímetros irrigados são uma das principais formas de uso da água no Estado do Ceará, e o seu crescimento tem impactos diretos na demanda hídrica da região. O estudo da demanda hídrica e da gestão dos recursos hídricos se torna ainda mais importante diante desse cenário, especialmente em períodos de escassez hídrica, que podem comprometer tanto o abastecimento humano quanto a produção agrícola.

Os perímetros irrigados no Ceará surgiram como parte de uma política nacional para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Nordeste brasileiro, implementada pelo governo federal na década de 1950. Em 1952, foi criada a Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), que tinha como objetivo promover o desenvolvimento econômico da região. A partir daí, foram criados diversos projetos de irrigação em todo o Nordeste, incluindo o Ceará (IPEA, 2010; Ferreira, 2011).

O primeiro projeto de irrigação do Ceará foi o Perímetro Irrigado de Pentecoste, inaugurado em 1954. Em seguida, foram implantados outros perímetros irrigados, como o de Morada Nova, em 1956, e o de Jaguaribe-Apodi, em 1963 (Ferreira, 2011). Os perímetros irrigados foram construídos com o objetivo de desenvolver a agricultura na região semiárida do Ceará, proporcionando uma alternativa para a produção de alimentos em uma área onde as condições climáticas são muito adversas. A irrigação permitiu o cultivo de diversas culturas, como frutas, legumes, verduras e grãos, tornando-se uma fonte importante de renda para os agricultores locais (Bezerra, 2017).

Ao longo dos anos, novos perímetros irrigados foram sendo implantados no Ceará, como o Perímetro Irrigado de Tabuleiro de Russas, o Perímetro Irrigado de São Gonçalo do Amarante e o Perímetro Irrigado de Cinturão Verde de Fortaleza. Esses projetos contribuíram para o desenvolvimento da agricultura na região, gerando emprego e renda para a população local. Os novos perímetros irrigados implantados no Ceará foram uma resposta à crescente demanda por alimentos e ao aumento da produtividade agrícola na região. O Perímetro Irrigado de Tabuleiro de Russas, por exemplo, foi criado em 1986 com o objetivo de desenvolver a

fruticultura na região, principalmente a produção de melão e melancia. Já o Perímetro Irrigado de São Gonçalo do Amarante, criado em 2001, teve como objetivo principal a produção de frutas, como abacaxi e banana, além de hortaliças e grãos. O Perímetro Irrigado de Cinturão Verde de Fortaleza, por sua vez, foi criado em 1977 com o objetivo de fornecer alimentos para a capital do estado. O projeto consistia em produzir hortaliças e frutas na área próxima à cidade, para evitar a importação desses produtos de outras regiões. Com o passar dos anos, o projeto foi expandido e hoje é responsável pela produção de diversas culturas, como tomate, pimentão, couve-flor, manga e acerola (Bezerra, 2017; CODEVASF, 2023).

Todos esses projetos de irrigação contribuíram para o desenvolvimento da agricultura na região e para a geração de emprego e renda para a população local. Além disso, eles também permitiram a diversificação da produção agrícola no Ceará, tornando-o menos dependente de uma única cultura ou de fatores climáticos imprevisíveis. O crescimento dos perímetros irrigados é um fator importante a ser considerado no estudo da demanda hídrica do estado do Ceará, uma vez que a irrigação consome uma quantidade significativa de água. Com o aumento dos perímetros irrigados, há um aumento na demanda por água para a irrigação, o que pode impactar negativamente o abastecimento de água para outras atividades, como consumo humano e industrial, além de afetar os ecossistemas locais.

De acordo com o IPECE (2020), a projeção de crescimento populacional do estado do Ceará é de 10,7 milhões de habitantes até 2050, o que representa um aumento de cerca de 32% em relação à população estimada em 2020. Já em relação ao crescimento industrial, segundo a Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC), o estado apresentou um crescimento de 4,4% na produção industrial em 2020, apesar dos impactos da pandemia de COVID-19. A expectativa é que haja uma retomada do crescimento industrial nos próximos anos, impulsionada por investimentos em infraestrutura e novos negócios em setores como tecnologia, energias renováveis e turismo.

Considerando o crescimento populacional e industrial acima projetado para o estado do Ceará até 2050, uma lacuna científica que pode ser investigada é a avaliação do impacto desses fatores no comportamento futuro da demanda hídrica. É importante destacar que, mesmo com a existência de perímetros irrigados, a demanda por água tende a aumentar à medida que a população e a atividade industrial crescem. Além disso, como discutido no Capítulo 2 desta tese, a disponibilidade de água no estado do Ceará é afetada por fatores climáticos, como a ocorrência de secas, o que pode afetar a capacidade de abastecimento de água para consumo humano, agricultura e indústria.

Portanto, este capítulo tem como objetivo avaliar o comportamento futuro da

demanda hídrica em cenários de crescimento populacional e industrial e da irrigação, de forma a fornecer informações importantes para o planejamento e gestão dos recursos hídricos no estado do Ceará visando o desenvolvimento sustentável da região. Além disso, esse estudo pode ainda apoiar a tomada de decisão em relação ao uso da água e a implementação de políticas públicas voltadas para o aumento da eficiência hídrica e o uso sustentável dos recursos hídricos no estado.

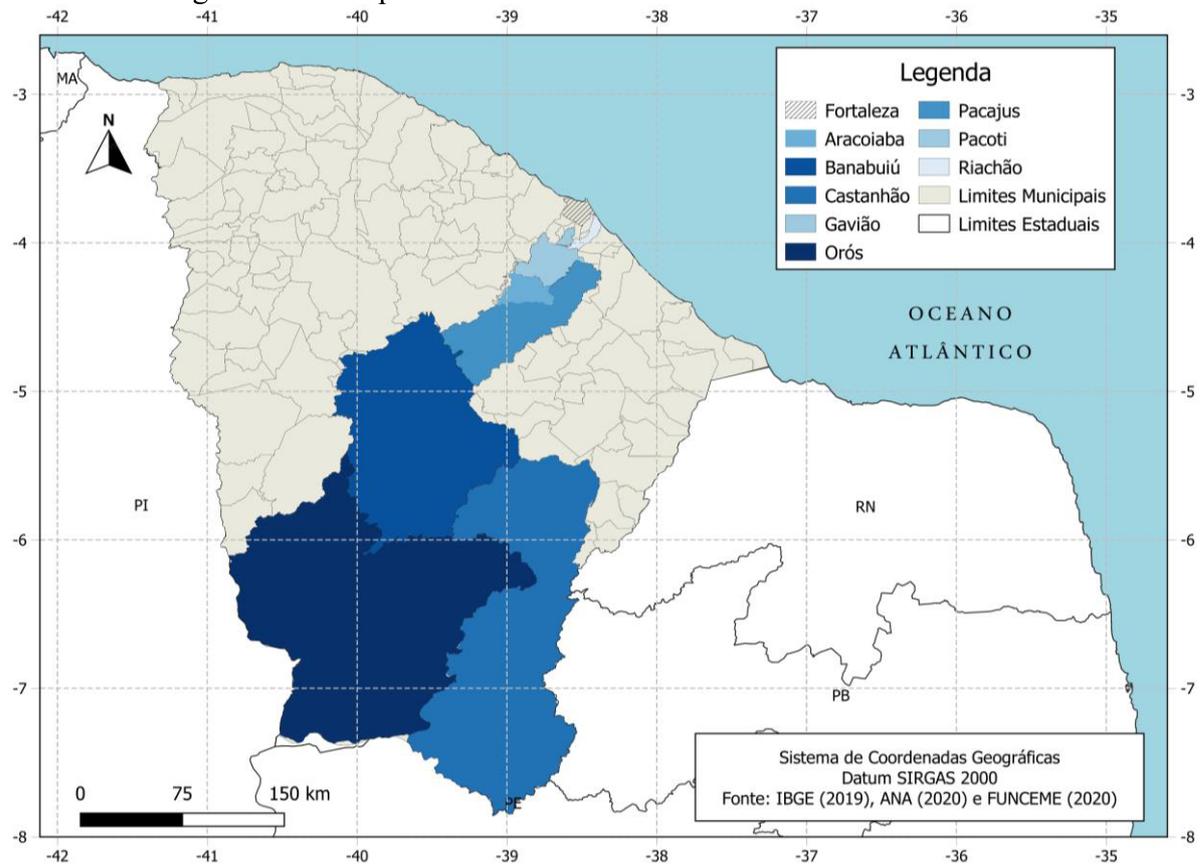
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada neste capítulo pode ser descrita em quatro etapas, são elas: (I) breve descrição da área de estudo, (II) descrição dos dados utilizados, (III) descrição dos modelos estatísticos utilizados para previsão de crescimento da demanda hídrica e (IV) cenários de demandas consuntivas. Dessa forma, os próximos tópicos dissertam sobre as etapas supracitadas.

3.2.1 Área de estudo

Neste capítulo a área de estudo compreenderá as bacias dos reservatórios que constituem o sistema de abastecimento de água bruta Jaguaribe-Metropolitano, localizado no Estado do Ceará. São elas: Aracoiaba, Gavião, Pacajus, Pacoti e Riachão – fazendo parte da região hidrográfica das Bacias Metropolitanas – e Banabuiú, Castanhão e Orós – que integram a grande Bacia do Jaguaribe. As referidas bacias são mostradas na Figura 19.

Figura 19 - Mapa de localização das bacias dos reservatórios representativos do Sistema Jaguaribe-Metropolitano.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Informações de capacidade de acumulação, área de drenagem, municípios integrantes e clima foram apresentadas no capítulo 2 para as bacias do Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM. A Tabela 7 apresenta resumidamente as informações supracitadas para todas as bacias a serem analisadas no presente capítulo.

Tabela 7 - Informações contendo aspectos físicos e climáticos das bacias hidrográficas representativas do sistema Jaguaribe-Metropolitano.

Bacias	Área de drenagem (km ²)	Capacidade de acumulação (m ³)	Número de municípios drenados	Clima	Temperatura média anual (T) °C	Pluviosidade média anual (mm)
Aracoiaba	588,6	170.700.000	9	Aw'	16 °C < T < 27 °C	Entre 900 e 1.600
Banabuiú	14.249	2.755.909.000	15	Bsh	27 °C	725,4
Castanhão	19.805	6.860.905.600	36	Bsh	27 °C	742,6
Gavião	97,12	32.900.000	3	Aw'	19 °C < T < 29 °C	Entre 1.200 e 1.400
Orós	24.639	1.940.000.000	27	Bsh	28 °C	Entre 500 e 700
Pacajus	4.492,34	232.000.000	18	Aw'	26,3 °C	806,6
Pacoti	1.080	380.000.000	13	Aw'	27,3 °C	1.606,6
Riachão	33,68	46.950.000	1	Aw'	27,3 °C	1.606,6

Fonte: Adaptado de COGERH (2010; 2011; 2017). O clima Aw' segue a classificação climática de Köppen-Geiger, caracterizado como tropical chuvoso, quente e úmido, com estação chuvosa concentrada no outono. O clima Bshw é definido como Tropical Quente Semiárido, apresentando regime de chuva irregular e deficiência hídrica de baixa.

3.2.2 Dados utilizados

Os dados utilizados neste estudo referem-se à demanda hídrica média anual da vazão de retirada (em m³/s) no período de 1961 a 2017 para três categorias de consumo: irrigação, abastecimento urbano e indústria. Foi realizada a agregação das demandas municipais para obter a demanda total por bacia hidrográfica. Os dados supracitados referem-se aos dados da demanda hídrica dos municípios brasileiros, compilados pela ANA no período de 1931 a 2017. O documento está disponível no formato XLSX e contém diversas abas com informações sobre a demanda hídrica por município e por setor. A tabela se refere à demanda hídrica por município e por categoria de uso (Irrigação, Abastecimento Humano, Indústria e outros) em metros cúbicos por segundo (m³/s) para cada ano. A demanda hídrica representa a quantidade de água necessária para atender a demanda de cada setor em determinado período de tempo.

Os dados presentes no arquivo foram obtidos por meio de diversas fontes, como planos estaduais e municipais de recursos hídricos, relatórios de outorgas de direito de uso da água, entre outros documentos. É importante destacar que os valores apresentados no arquivo são estimativas, podendo haver variações devido a fatores como mudanças nas atividades econômicas dos municípios e mudanças climáticas. O arquivo pode ser utilizado para análises e estudos relacionados à gestão dos recursos hídricos no Brasil, permitindo uma visão geral da demanda hídrica dos municípios ao longo de décadas (SNIRH, 2023).

3.2.3 Modelos estatísticos para previsão de crescimento da demanda hídrica

O uso de modelos estatísticos para prever o crescimento de demanda hídrica é importante para auxiliar no planejamento e gestão de recursos hídricos em diferentes regiões. Esses modelos são capazes de analisar dados históricos da demanda hídrica e identificar tendências e padrões que podem influenciar o consumo de água no futuro. Além disso, os modelos estatísticos permitem a realização de análises mais precisas e sofisticadas do que simplesmente extrapolar a tendência atual da demanda. Eles podem levar em conta fatores como mudanças climáticas, crescimento populacional, desenvolvimento econômico e sazonalidade, que podem afetar significativamente a demanda hídrica (Wong; Woo, 2019; Shamsuddin; Harun, 2018).

Neste trabalho foi utilizado o modelo ETS (*Exponential Smoothing State Space Model*) que é uma técnica de previsão de séries temporais frequentemente utilizada para prever o crescimento da demanda hídrica (Nascimento, 2023; Silva *et al.*, 2021, Groppo, 2019).

3.2.3.1 Modelo ETS

O modelo ETS é uma técnica de previsão de séries temporais que pode ser usada para prever valores futuros com base em padrões observados no passado. Ele funciona usando uma média móvel ponderada das observações passadas para estimar o próximo valor na série temporal. A aplicação dos métodos de suavização exponencial envolve a utilização de pesos decrescentes exponencialmente, direcionando-se das observações mais recentes para as mais antigas. Neste método, é necessário determinar um ou mais parâmetros de suavização, e essa decisão é crucial para estabelecer os pesos atribuídos a cada observação (Bacci, 2007).

Os modelos de suavização exponencial utilizados neste trabalho foram:

- a) ETS (A, A, N) – Aditivo em Erro (A), Aditivo na Tendência (A), Sem Sazonalidade (N);
- b) ETS (M, M, N) – Multiplicativo em Erro (M), Multiplicativo na Tendência (M), Sem Sazonalidade (N);
- c) ETS (M, A, N) – Multiplicativo em Erro (M), Aditivo na Tendência (A), Sem Sazonalidade (N);
- d) ETS (M, N, N) – Multiplicativo em Erro (M), Sem Tendência (N), Sem Sazonalidade (N);
- e) ETS (A, N, N) – Aditivo em Erro (A), Sem Tendência (N), Sem Sazonalidade

(N);

f) ETS (M, Md, N) – Multiplicativo em Erro (M), Multiplicativo na Tendência (Md), Sem Sazonalidade (N).

Hyndman *et al.* (2008) utilizam a seguinte formulação geral do modelo com a primeira equação denominada equação de medida e a segunda equação de transição:

$$y_t = w(v_{t-1}) + r(v_{t-1})\varepsilon_t, \quad (8)$$

$$v_t = f(v_{t-1}) + g(v_{t-1})\varepsilon_t \quad (9)$$

onde v_t é o vetor de estado, contendo os componentes das séries (nível, tendência e sazonal), $w(\cdot)$ é a medida, $r(\cdot)$ é o erro, $f(\cdot)$ é a transição e $g(\cdot)$ são as funções de persistência. Dependendo dos tipos de componentes, essas funções podem ter valores diferentes:

a) dependendo dos tipos de tendência e sazonalidade $w(v_{t-1})$ será igual à adição ou multiplicação de componentes. Por exemplo, no caso de ETS (M, M, M) é:

$$w(v_{t-1}) = l_{t-1}b_{t-1}s_{t-m};$$

b) Se o erro for aditivo, então $r(v_{t-1}) = 1$, caso contrário (em caso de erro multiplicativo) é $r(v_{t-1}) = w(v_{t-1})$.

Mais casos especiais podem ser consultados em Hyndman *et al.* (2008). No RStudio foi utilizado o pacote *forecast*, onde foram estimados os parâmetros do modelo ETS por meio das estatísticas Akaike's Information Criterion (AIC), AIC com viés removido (AICc) e Schwarz's Bayesian Information Criterion (BIC), expressas nas equações 10 a 12, respectivamente:

$$AIC = -2 \left(\frac{LL}{T} \right) + \frac{2T_p}{T}, \quad (10)$$

em que LL é o *log likelihood*, T_p é o total de parâmetros e T é o número de observações.

$$AIC_c = AIC + \frac{2(k+2)(k+3)}{T-k-3}, \quad (11)$$

em que a expressão $\frac{2(k+2)(k+3)}{T-k-3}$ é a correção de viés.

$$BIC = -2LL + k \ln(T) \quad (12)$$

em que k é a estimativa dos parâmetros dos modelos obtido através dos mínimos quadrados.

A avaliação dos mecanismos de previsão envolveu a comparação entre os valores previstos e os valores observados na série, o que permitiu caracterizar a acurácia ou a capacidade preditiva do modelo empregado. Para isto, utilizou-se métricas estatísticas como o Índice de Eficiência Nash-Sutcliffe (NSE), Percentual de Viés (PBIAS) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE). O NSE compara a variabilidade dos dados previstos com a variabilidade dos dados observados, variando de $-\infty$ a 1, sendo 1 indicativo de um ajuste perfeito. Já o RMSE mede a

média das diferenças ao quadrado entre os dados previstos e observados, penalizando mais fortemente os erros grandes. Um RMSE menor indica uma melhor precisão. O NSE e o RMSE já foram descritos anteriormente nas seções 2.2.2.1 e 2.2.3, respectivamente. O PBIAS, por sua vez, avalia o viés percentual médio entre os dados previstos e os dados observados. Um PBIAS próximo de zero indica um bom ajuste (Yapo; Gupta; Sorooshian, 1996). A fórmula do PBIAS é:

$$\text{PBIAS} = \sqrt{100 \frac{\sum_{i=1}^N (o_i - m_i)}{\sum_{i=1}^N (o_i)}}, \quad (13)$$

onde o_i são os dados observados; m_i são os dados modelados para um determinado tempo i .

3.2.4 Cenários de demandas consuntivas

Para as projeções das demandas consuntivas (período de 2018 a 2050) para as bacias do hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano, considerou-se três cenários: o cenário 1 com as demandas consuntivas projetadas com o modelo ETS; o cenário 2 com as demandas consuntivas projetadas com o modelo considerando o limite superior de 95% do intervalo de confiança, e o cenário 3 com as demandas consuntivas projetadas com o modelo considerando o limite inferior do intervalo de confiança de 95%.

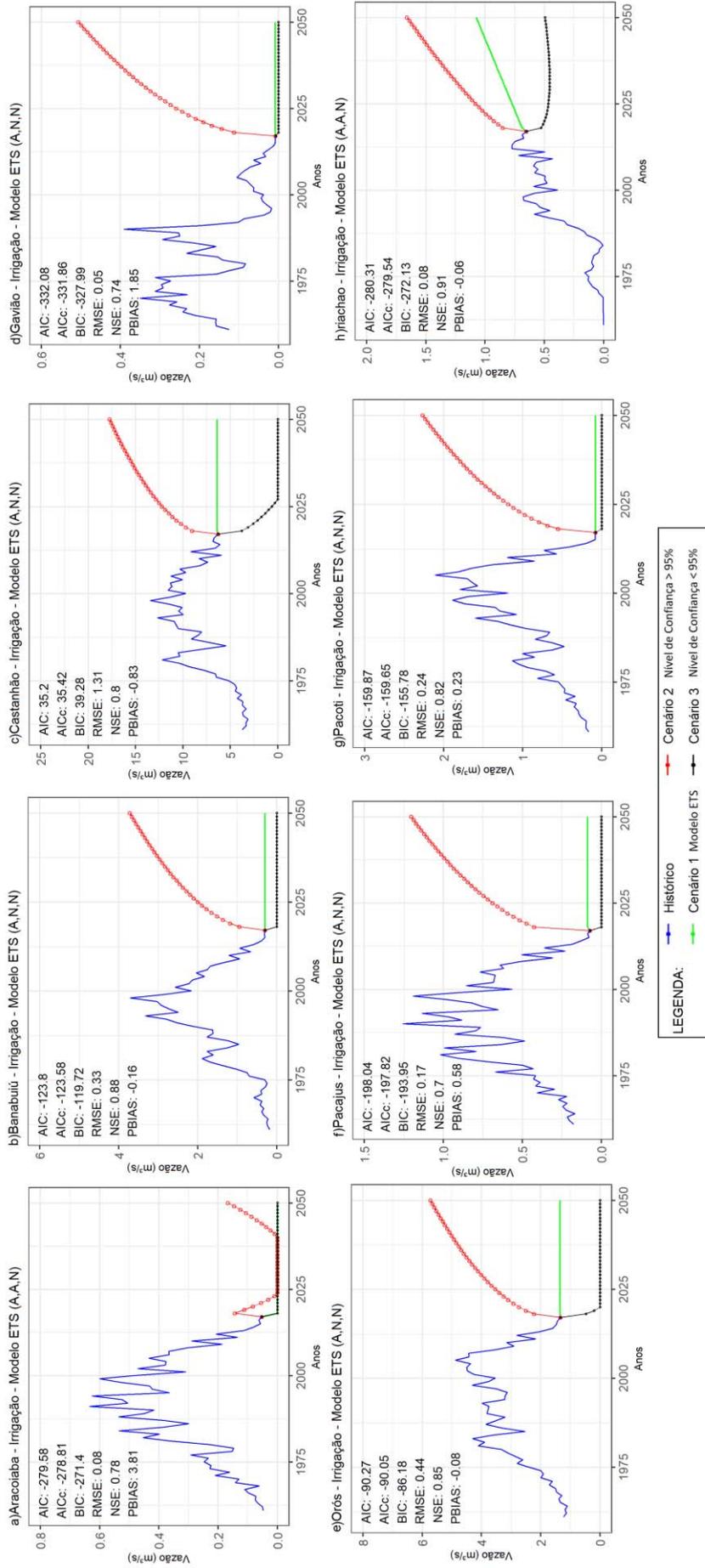
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo ETS com diferentes parâmetros que caracterizam a tendência e sazonalidade para a projeção da demanda hídrica das bacias do hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano. Os resultados apresentados foram os que obtiveram os melhores ajustes quanto às métricas estatísticas. Serão analisados os três cenários considerados para as demandas consuntivas projetadas, incluindo as variações observadas entre os modelos e a influência dos intervalos de confiança nas projeções para cada bacia. Vale ressaltar que os intervalos de confiança são uma medida de incerteza em torno de uma estimativa e que serão usados para avaliar a precisão dos resultados. Dessa forma, a diferença entre o cenário 2 e o cenário 3 está relacionada ao nível de confiança utilizado nos modelos de previsão. No cenário 2, as demandas consuntivas projetadas foram calculadas considerando o limite superior de 95% do intervalo de confiança. Já no cenário 3, as demandas consuntivas foram projetadas considerando o limite inferior de 95% do intervalo de confiança dos modelos. Em outras palavras, o cenário 2 é mais conservador, já que

leva em consideração uma margem maior de incerteza e uma probabilidade maior de incluir valores extremos, enquanto o cenário 3 é mais otimista, assumindo que as demandas reais serão pelo menos iguais ou superiores às curvas projetadas.

As projeções para o período de 2018 a 2050, feitas com base no modelo ETS com diferentes configurações dos componentes de Erro, Tendência e Sazonalidade com os melhores ajustes, para as demandas hídricas do setor de Irrigação em a) Aracoíaba b) Banabuiú c) Castanhão d) Gavião e) Orós f) Pacajus g) Pacoti e h) Riachão estão representadas nas Figuras 20(a) a 20(h), respectivamente. As figuras também indicam os critérios de informação AIC, AICc e BIC obtidos, bem como os valores de desempenho do RMSE, NSE e PBIAS obtidos quando comparadas as demandas consuntivas do período histórico (janeiro de 1961 a dezembro de 2017) com as demandas projetadas pelos modelos.

Figura 20 - Cenários de projeções de demandas consuntivas anuais para o setor da Irrigação em a) Aracoiaba b) Banabuiú c) Castanhão d) Gavião e) Orós f) Pacajus g) Pacoti e h) Riachão, para o período de 2018 a 2050.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 8 apresenta a taxa média de crescimento anual (%) ao longo dos anos da demanda consuntiva da irrigação para os reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano.

Tabela 8 – Taxa média de crescimento anual (%) das demandas consuntivas no setor da Irrigação para os reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano.

Irrigação	Histórico	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Aracoiaba	0,14	0	0,45	0
Banabuiú	0,85	0	4,23	0
Castanhão	0,90	0	2,06	-100
Gavião	-4,84	0	4,67	0
Orós	0,12	0	2,91	-100
Pacajus	-1,56	0	3,20	0
Pacoti	-1,34	0	4,37	0
Riachão	12,45	1,36	2,04	-0,19

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que na maioria dos casos para a demanda de irrigação, o modelo ETS (A, N, N) foi o que apresentou o melhor ajuste, a exceção foi para os reservatórios de Aracoiaba e Riachão que o modelo ETS (A, A, N) obteve o melhor ajuste. Dessas, se destaca o reservatório Riachão em que a demanda da irrigação teve a maior taxa média anual de crescimento.

Em Aracoiaba e Gavião – Figuras 20(a) e 20(d), o cenário 1 projetou uma demanda de valor mínimo igual a zero. Isso pode indicar que, para o setor da irrigação e esse cenário, não espera-se um aumento significativo na demanda de água no futuro próximo. Em Banabuiú, Castanhão, Orós, Pacajus e Pacoti, o modelo indicou que a demanda permanecerá constante ao longo do período de 2018 a 2050. Essas projeções têm implicações importantes para o setor de irrigação no estado do Ceará. Caso a demanda permaneça constante, como previsto pelo modelo, pode ser possível manter as atuais políticas e investimentos em irrigação nas regiões.

O cenário 2 apresentou projeções de aumento gradual de demanda ao longo do tempo para o modelo ETS em sete das oito bacias (excetua-se Aracoiaba). Em Gavião, Pacajus e Pacoti a curva de crescimento projetada indica que a demanda consuntiva tende a crescer de forma cada vez mais acelerada quando comparado com Banabuiú, Castanhão, Orós e Riachão. Em Aracoiaba, a projeção indicou um aumento da demanda hídrica no período de 2017 a 2018. Em seguida, a demanda começou a diminuir gradualmente, alcançando o valor mínimo de demanda no ponto onde a curva atinge o valor zero. Esse ponto de mínimo pode ser considerado como uma mudança de comportamento da demanda, que pode estar relacionado a fatores como a adoção de práticas de uso mais eficiente da água, redução de atividades produtivas, entre outros. A partir de 2041, a demanda volta a crescer, com um aumento percentual substancial, o

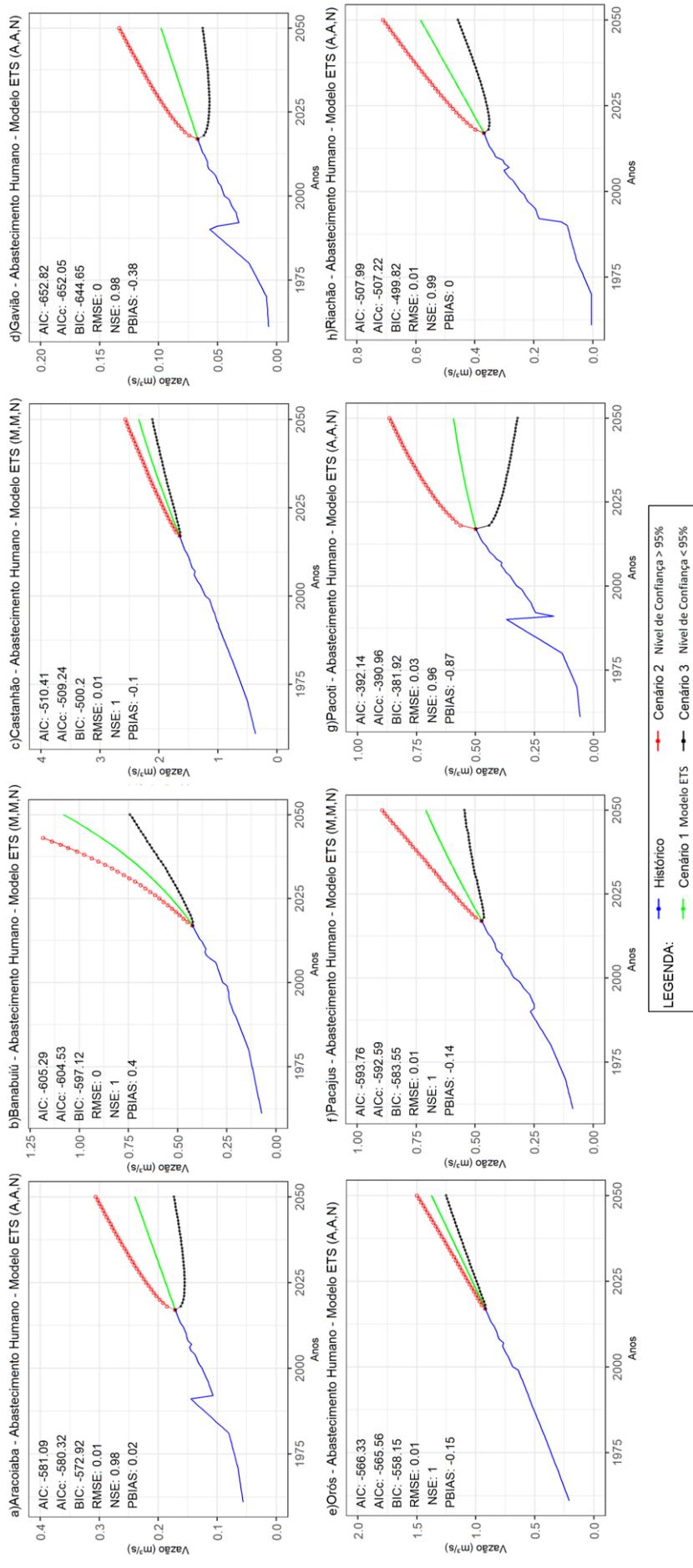
que pode indicar que há uma tendência de aumento na demanda hídrica no futuro.

Já para o cenário 3, o modelo projetou uma demanda constante e igual a zero nos reservatórios de Aracoiaba, Banabuiú, Gavião, Pacajus e Pacoti. Isso pode indicar que esses modelos ou não conseguiram capturar adequadamente a complexidade da variação da demanda ao longo do tempo ou as condições do cenário 3 apresentaram uma redução drástica na demanda de água para irrigação da região da bacia. Uma redução drástica na demanda hídrica para irrigação pode ocorrer se houver uma mudança significativa no uso da terra e/ou na tecnologia de irrigação. Por exemplo, se houver uma mudança de plantio de culturas que exigem muita água para culturas mais resistentes à seca, ou se houver uma adoção de técnicas de irrigação mais eficientes que reduzam o desperdício de água. Além disso, se houver uma redução na área irrigada devido à urbanização ou outras atividades econômicas, a demanda hídrica para irrigação também pode diminuir drasticamente.

Em Castanhão e Orós, a demanda sofreu redução total. No Riachão é possível notar que a demanda consuntiva sofreu uma tendência de queda muito discreta, à uma taxa média de 0,19% ao longo de cada ano. Essa tendência de queda pode estar associada ao fato de que as áreas correspondentes aos corpos d'água sofreram diversas alterações no total ocupado na bacia ao longo do tempo, o que pode estar associado à sua hidrografia superficial intermitente, influenciada pela pluviometria, em conjunto com o aumento da retirada de água do reservatório (ANA, 2016). Portanto, a redução na disponibilidade de água pode ter contribuído para a queda na demanda hídrica da irrigação na região. A análise desses resultados sugere uma mudança significativa no comportamento da demanda ao longo do tempo, indicando também possíveis mudanças nas práticas de irrigação ou em outras atividades relacionadas à demanda de água na região. Além disso, o fato de a curva atingir o valor mínimo de demanda no ponto em que a curva atinge o valor zero é um indicativo de que a demanda pode estar em um processo de declínio.

As projeções para o período de 2018 a 2050, feitas com base no modelo ETS com diferentes configurações dos componentes de Erro, Tendência e Sazonalidade com os melhores ajustes, para as demandas hídricas do setor de Abastecimento Humano em a) Aracoiaba b) Banabuiú c) Castanhão d) Gavião e) Orós f) Pacajus g) Pacoti e h) Riachão estão representadas nas Figuras 21(a) a 21(h), respectivamente. As figuras também indicam os critérios de informação AIC, AICc e BIC obtidos bem como os valores de desempenho do RMSE, NSE e PBIAS obtidos quando comparadas as demandas consuntivas do período histórico (janeiro de 1961 a dezembro de 2017) com as demandas projetadas pelos modelos.

Figura 21 - Cenários de projeções de demandas consuntivas anuais para o setor de Abastecimento Humano em a) Aracoiaba e) Orós f) Pacajus g) Riachão, para o período de 2018 a 2050. Castanhão d) Gavião e) Orós f) Pacajus g) Riachão, para o período de 2018 a 2050.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 9 apresenta a taxa média de crescimento anual (%) ao longo dos anos da demanda consuntiva do abastecimento humano para os reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano.

Tabela 9 - Taxa média de crescimento anual (%) das demandas consuntivas no setor do Abastecimento Humano para os reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano.

Irrigação	Histórico	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Aracoiaba	1,97	0,98	1,53	0,21
Banabuiú	3,14	2,79	3,87	1,73
Castanhão	2,68	1,02	1,24	0,76
Gavião	4,1	1,11	1,79	0,05
Orós	2,62	1,17	1,39	0,93
Pacajus	3,03	1,19	1,82	0,5
Pacoti	3,88	0,5	1,31	-0,95
Riachão	7,8	1,34	1,77	0,78

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que na maioria dos reservatórios, o modelo ETS (A, A, N) foi o que apresentou o melhor ajuste, a exceção foi para os reservatórios de Banabuiú, Castanhão e Pacajus que o modelo ETS (M, M, N) obteve o melhor ajuste. O Riachão se destaca novamente com a maior taxa média anual de crescimento: 7,8%.

Em Aracoiaba, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus e Riachão, os resultados indicam que no cenário 1, a demanda para abastecimento humano deve crescer. Foi encontrado uma tendência linear constante no histórico de dados utilizados como entrada. Essa tendência linear constante significa que, na ausência de mudanças significativas nos fatores que influenciam a demanda hídrica, a demanda do setor de abastecimento humano seguirá aumentando ao longo do tempo. Já em Banabuiú, a demanda deve crescer exponencialmente alcançando a maior taxa média de crescimento dentre as oito bacias. Em Pacoti a demanda também deve crescer, mas de forma menos pronunciada. Essa mudança significativa na demanda hídrica do setor de abastecimento humano pode ser resultado de diversos fatores, como o aumento da população, mudanças no estilo de vida, expansão urbana, entre outros.

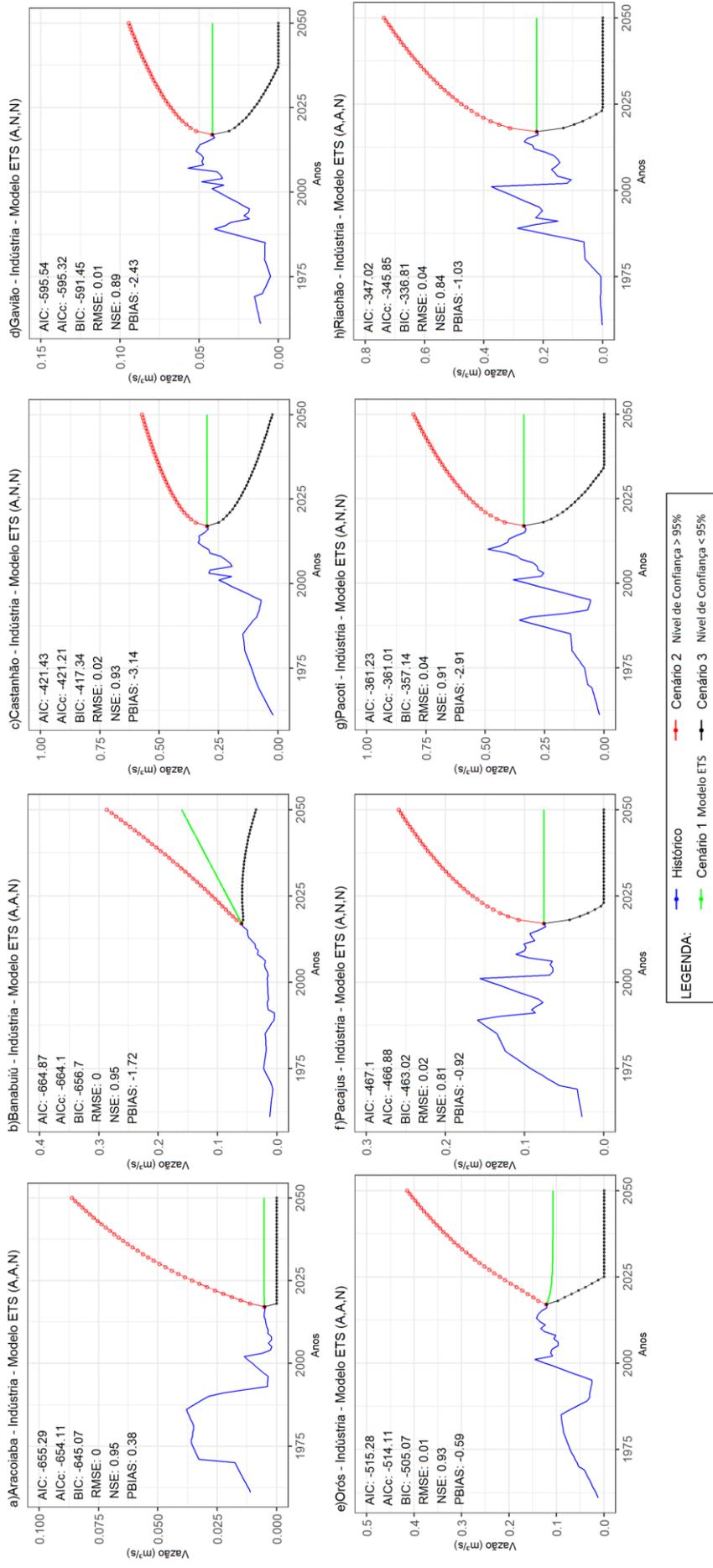
O cenário 2 apresentou projeções semelhantes ao do cenário 1, de aumento gradual de demanda ao longo do tempo para o modelo ETS em sete das oito bacias (excetua-se Banabuiú com crescimento exponencial). Neste cenário, Banabuiú novamente se destacou com a maior taxa média de crescimento anual da demanda de abastecimento humano dentre os demais. Diferente do cenário 1, Castanhão foi o que apresentou o crescimento percentual menos pronunciado. O crescimento gradual da demanda observado nos cenários 1 e 2 pode ser uma evidência de que as medidas atuais de gestão e uso racional de recursos hídricos não são

suficientes para evitar um aumento ainda maior na demanda por água. Isso destaca a relevância de políticas públicas que incentivem a conservação e o uso sustentável dos recursos hídricos, além de estimular a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para um uso mais eficiente da água. Para o cenário 3, o que poderia explicar, em alguns gráficos, a redução seguida de crescimento da demanda, com uma taxa média de 0,9% ao longo de cada ano. A maioria dos demais reservatórios apontaram um crescimento exponencial, com destaque para Banabuiú.

As previsões de crescimento para Banabuiú são compatíveis com os cenários já reais de aumento populacional e desenvolvimento econômico apontados por Crispim *et al.* (2016), o que pode levar a um aumento na demanda por água na região no futuro. A região da bacia hidrográfica do Rio Banabuiú tem sofrido uma expansão da agropecuária em detrimento das formações florestais e naturais não florestais. Isso tem levado à degradação dos recursos naturais, aumento da mancha urbana e contaminação do lençol freático. Algumas cidades da região, como Quixadá, Senador Pompeu e Monsenhor Tabosa, vêm se destacando por atividades agropecuárias e mineradoras (Crispim *et al.*, 2016).

As projeções para o período de 2018 a 2050, feitas com base no modelo ETS com diferentes configurações dos componentes de Erro, Tendência e Sazonalidade com os melhores ajustes, para as demandas hídricas do setor da Indústria em a) Aracoiaba b) Banabuiú c) Castanhão d) Gavião e) Orós f) Pacajus g) Pacoti e h) Riachão estão representadas nas Figuras 22(a) a 22(h), respectivamente. As figuras também indicam os critérios de informação AIC, AICc e BIC obtidos bem como os valores de desempenho do RMSE, NSE e PBIAS obtidos quando comparadas as demandas consuntivas do período histórico (janeiro de 1961 a dezembro de 2017) com as demandas projetadas pelos modelos.

Figura 22 - Cenários de projeções de demandas consuntivas anuais para o setor da Indústria em a) Aracoiaba b) Banabuiú c) Castanhão d) Gavião e) Orós f) Pacajus g) Pacoti e h) Riachão, para o período de 2018 a 2050.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 10 apresenta a taxa média de crescimento anual (%) ao longo dos anos da demanda consuntiva da indústria para os reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano.

Tabela 10 - Taxa média de crescimento anual (%) das demandas consuntivas no setor da Indústria para os reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano.

Indústria	Histórico	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Aracoiaba	-1,35	0,07	6,41	0
Banabuiú	2,85	2,90	4,45	-1,44
Castanhão	4,83	0	1,53	-6,91
Gavião	2,32	0	1,83	-100
Orós	4,17	-0,29	3,37	-100
Pacajus	1,78	0	2,7	-100
Pacoti	5,21	0	1,99	-100
Riachão	8,9	0	2,64	-100

Fonte: Elaborada pelo autor.

O modelo ETS (A, A, N) foi o que apresentou o melhor ajuste nos reservatórios de Aracoiaba, Banabuiú, Orós e Riachão, ao passo que o modelo ETS (A, N, N) foi o que apresentou o melhor ajuste nos demais reservatórios. O Riachão se destaca novamente com a maior taxa média anual de crescimento: 8,9%; seguido de Pacoti e Castanhão (com 5,21% e 4,83%, respectivamente).

Em Castanhão, Gavião, Pacajus, Pacoti e Riachão, os resultados indicam que no cenário 1, a demanda para indústria deve permanecer constante. Já em Banabuiú, a demanda deve crescer linearmente alcançando a maior taxa média de crescimento dentre as oito bacias. Em Orós a demanda deve diminuir à uma taxa média de 0,29% ao longo de cada ano até 2050.

O cenário 2 apresentou projeções de aumento gradual de demanda ao longo do tempo para o modelo ETS em sete das oito bacias (excetua-se Banabuiú com crescimento exponencial). Isso pode ser um reflexo do crescimento da atividade industrial nas regiões ou da falta de medidas de eficiência no uso da água pelas empresas. Neste cenário, Aracoiaba se destacou com a maior taxa média de crescimento anual da demanda de indústria dentre os demais. Castanhão foi o que apresentou o crescimento percentual menos pronunciado. Já para o cenário 3, cinco dos oito reservatórios (excetua-se Aracoiaba, Banabuiú e Castanhão) apontaram redução total da demanda. Aracoiaba apontou demanda constante e igual a zero, ao passo que Banabuiú e Castanhão apontaram reduções com taxas médias anuais de 1,44% e 6,91%, respectivamente, ao longo de cada ano. Essa tendência de declínio da demanda consuntiva ao longo do tempo no setor industrial pode indicar uma possível mudança na dinâmica de produção e consumo das regiões. Essa mudança pode ser impulsionada por

diversos fatores, como a introdução de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, mudanças nas políticas públicas relacionadas ao uso da água e mudanças nas preferências dos consumidores por produtos e serviços mais sustentáveis. Essa tendência pode levar a uma busca por práticas mais sustentáveis no uso da água e na gestão de recursos hídricos na região.

3.4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos a partir da aplicação do modelo ETS para a projeção da demanda hídrica das bacias do hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano, pode-se concluir que os intervalos de confiança são uma medida crucial para avaliar a precisão dos resultados projetados. Destaca-se que essas projeções são baseadas em modelos estatísticos e devem ser interpretadas com cautela, considerando também outros fatores que possam afetar as demandas no futuro. Contudo, as projeções realizadas pelo modelo ETS são ferramentas valiosas para prever tendências futuras e identificar padrões em conjuntos de dados históricos.

Ao analisar as projeções do modelo ETS para a demanda hídrica em diferentes cenários, observou-se uma semelhança significativa nos resultados para alguns setores e bacias. As projeções realizadas para o setor de abastecimento humano dos reservatórios de Aracoíaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus e Riachão apontaram resultados semelhantes para os três cenários analisados. Em todos esses reservatórios, as projeções indicaram o aumento da demanda consuntiva ao longo do tempo. Esse aumento pode ser atribuído a diversos fatores, como o crescimento populacional, a urbanização, o aumento do consumo per capita bem como a falta de medidas adequadas de gestão e conservação dos recursos hídricos. No geral, as projeções indicam um aumento constante na demanda consuntiva, com algumas variações ao longo do tempo. Na maioria dos casos, o aumento é gradual e contínuo, o que indica a necessidade de se adotar medidas adequadas para garantir a disponibilidade de água no futuro, uma vez que esses aumentos representam um desafio para a gestão dos recursos hídricos nas regiões. As projeções também destacam a importância de se investir em alternativas para a gestão e conservação dos recursos hídricos, bem como na busca de novas fontes de abastecimento.

As projeções realizadas pelo modelo ETS para o setor industrial de Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão também apontaram resultados semelhantes nos três cenários avaliados. No cenário 1, na ausência de mudanças significativas nos fatores que influenciam a demanda hídrica, a demanda do setor industrial seguirá constante ao longo do tempo. Já no cenário 2, o modelo indica um aumento gradual na demanda de água. Esse comportamento pode ser explicado por diversos fatores, tais como o aumento da população e o crescimento econômico das regiões analisadas.

No cenário 3, o modelo encontrou uma tendência de redução total da demanda consuntiva. Essa tendência pode ser explicada por fatores como a adoção de tecnologias mais eficientes em termos de uso da água pela indústria. Os cenários para o setor da indústria das bacias do Gavião, Pacajus, Pacoti e Riachão foram semelhantes, aliado ao fato de que esses três reservatórios fazem parte do mesmo sistema metropolitano de abastecimento, que é responsável por fornecer água para uma grande região urbana. Essa proximidade geográfica e a integração no mesmo sistema de abastecimento podem levar a uma dependência semelhante da indústria em relação ao fornecimento de água. Além disso, a demanda industrial também pode ser influenciada pelos mesmos fatores externos, como a economia regional e as políticas governamentais, o que pode levar a projeções semelhantes nos diferentes cenários. Diferentemente do que foi apontado por Mendonça *et al.* (2019), o crescimento da demanda hídrica foi liderado pelos setores do abastecimento humano e indústria. O que concorda com as projeções de crescimento populacional e industrial do estado do Ceará até 2050, apontadas pelo IPECE (2020) e FIEC (2020).

Quanto ao setor da irrigação, existem diversos fatores que podem influenciar em projeções divergentes quanto ao crescimento/redução da demanda consuntiva entre em diferentes reservatórios. Entre eles, pode-se citar: o clima, características da agricultura, investimentos em tecnologia e políticas públicas. Cada região tem suas particularidades, o que pode levar a variações significativas nas necessidades de água para a irrigação das culturas.

É importante lembrar que as projeções realizadas para os reservatórios estão sujeitas a diversas incertezas, como as mudanças climáticas, políticas governamentais, desastres naturais, flutuações econômicas e avanços tecnológicos, que podem afetar a demanda de água no futuro. Portanto, as projeções devem ser interpretadas com cuidado e levando em consideração todas as incertezas envolvidas. No entanto, a semelhança apontada pelos modelos nos resultados projetados para os três cenários no setor de abastecimento humano e indústria dos reservatórios que constituem o sistema Jaguaribe-Metropolitano indica uma forte convergência entre as metodologias utilizadas, o que torna as projeções mais robustas e confiáveis para os tomadores de decisão.

4 AVALIAÇÃO DAS PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS RESERVATÓRIOS QUE CONSTITUEM O SISTEMA JAGUARIBE-METROPOLITANO

4.1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas vêm causando modificações do padrão médio de ocorrência dos processos hidrológicos e seus modos de variação, o que acarreta na desestabilização das sociedades e ecossistemas, interferindo diretamente no meio ambiente, agricultura, qualidade do ar, economia, setor energético e entre outras diversas esferas. Segundo o relatório do IPCC (2021), é inequívoco, que a influência humana vem aquecendo a atmosfera, o oceano e a terra, provocando mudanças rápidas e generalizadas. Eventos extremos como ondas de calor, fortes precipitações, secas e ciclones tropicais, são apenas algumas das evidências destas mudanças que vêm aumentando desde 1950 em frequência e intensidade (IPCC, 2021).

Alterações nas forçantes radiativas causadas por fatores naturais ou antropogênicos são apontadas pela comunidade científica como as responsáveis pelas mudanças do clima. As emissões significativas, a partir de atividades antrópicas, de dióxido de carbono (CO₂) e de outros gases, que contribuem para o fortalecimento do efeito estufa, vem sendo apontada como a principal agente causadora dessas alterações desde meados do século XX (IPCC, 2021; PBMC, 2016; Costa, 2017; Silva *et al.* 2020).

De acordo com o sexto relatório de avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), cada uma das últimas quatro décadas foi sucessivamente mais quente do que qualquer década que a precedeu desde 1850 (IPCC, 2021). Vale ressaltar que um aquecimento linear médio de 0,85 °C, combinando as superfícies terrestre e oceânica, já foi observado no período de 1880 a 2012 no globo (IPCC, 2014). Até o final do século XXI, ocorrerão mudanças considerando diferentes cenários de emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE), que caso se mantenham com a taxa de crescimento atual, estima-se um aumento de 0,3 °C por década na temperatura média global (considerando uma faixa de incerteza de 0,2 a 0,5 °C por década) – este aumento é maior do que o visto nos últimos 10000 anos (IPCC, 2021). Segundo o IPCC (2021), o AR6 aponta que a temperatura global da superfície continuará a aumentar até pelo menos meados do século XXI em todos os cenários de emissões considerados, podendo ainda, exceder o aquecimento global de 1,5 °C a 2 °C durante o século, a menos que ocorra profundas reduções de CO₂ e outras emissões de GEE nas próximas

décadas (IPCC, 2021).

Em escala planetária, as principais consequências das mudanças climáticas no tocante aos recursos hídricos são: aumento de temperatura, mudanças nos padrões de precipitação e cobertura de neve, alterações na disponibilidade de água e um provável aumento na frequência e severidade de eventos extremos (Guimarães *et al.*, 2016; Costa, 2017; Marengo *et al.*, 2018). O IPCC (2014), a Agência Nacional de Águas (2016), o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2016) e Lyra *et al.* (2016) apontam que o Brasil é uma das regiões no globo mais suscetíveis as mudanças climáticas. A recarga de água subterrânea também pode ser afetada com uma redução na disponibilidade de água subterrânea para água potável em algumas regiões. De acordo com o estudo de Doll (2009), no NEB estima-se uma redução na recarga em 70% até 2050. Nessa região situa-se grande parte da região semiárida brasileira, sendo o armazenamento de água um importante fator para garantir a sobrevivência nesse local (Marengo *et al.*, 2020).

Nesse sentido, estudos voltados para as mudanças climáticas, que identificam e avaliam como o globo pode ser afetado por alterações e variabilidade do clima, apresentam-se de extrema importância para o gerenciamento de possíveis riscos climáticos, pois subsidiam a elaboração de planos mitigadores aos impactos gerados (Silveira *et al.*, 2018, Silva *et al.*, 2020). Nesse contexto, surgiu o Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP, do inglês *Coupled Model Intercomparison Project*) que foi iniciado em 1995 pelo *World Climate Research Program* (WCRP), e atualmente está em sua sexta fase (CMIP6). O CMIP6 coordena atividades de intercomparação de Modelos do Sistema Terrestre (ESM - Earth System Models) e seus experimentos, adotando uma infraestrutura comum para coletar, organizar e distribuir os resultados de modelos que executam conjuntos comuns de experimentos (Eyring *et al.*, 2016). O CMIP6 é composto por ESMs com maior resolução espacial e complexidade física adicional em relação à fase 5 (Taylor *et al.*, 2012). Mais recentemente, foram disponibilizados dados do CMIP6 contendo projeções climáticas obtidas a partir das versões atualizadas dos MCGs e considerando novos cenários chamados *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), que combinam o desenvolvimento socioeconômico e tecnológico aos cenários futuros das forçantes radiativas já conhecidos e utilizados no CMIP5: *Representative Concentration Pathway* (RCP). Como a disponibilização ainda é recente, poucos são os estudos que envolvem os dados supracitados para a região semiárida do Brasil.

No entanto, o trabalho recente de Sousa Filho *et al.* (2022) elenca diversos estudos que, utilizando dados dos modelos CMIP6, avaliaram a representação da precipitação no nordeste setentrional e analisaram os padrões de precipitação e temperatura do período histórico

bem como das projeções das mudanças climáticas sobre a Bacia Estendida do Rio São Francisco (BESF), cuja uma grande porção de área localiza-se na região semiárida brasileira, incluindo parte do estado cearense. Dentre os principais resultados encontrados, pode-se citar: a boa capacidade da maioria dos modelos de representar a sazonalidade das chuvas na região do Nordeste Setentrional do Brasil e o modelo que melhor simulou a sazonalidade e a variabilidade interanual nesta região de estudo foi o BCC-ESM1. Para a BESF, os modelos do CMIP6 tiveram, no geral, seus padrões simulados concordando razoavelmente com as observações, com o modelo BCC-CSM2-MR de melhor desempenho. Em suma, os modelos com as melhores performances estatísticas neste estudo foram MIROC6 em relação à precipitação e o HADGEM3-GC31-LL em relação à temperatura do CMIP6; a investigação do desempenho dos modelos individuais do CMIP6 sugeriu que a habilidade dos modelos geralmente varia de modelo para modelo em escalas espaciais; as análises das projeções dos cenários futuros indicaram que os impactos das mudanças climáticas nas próximas décadas podem influenciar no aumento significativo da Temperatura do Ar próximo à Superfície (TAS) na BESF; os modelos demonstraram incerteza em relação ao futuro das precipitações; e os hidrossistemas da região da BESF poderão sofrer grande pressão exercida pelos fatores citados acima em conjunto com o aumento das demandas consuntivas por água nas próximas décadas, em consequência do crescimento populacional e da riqueza, podendo causar impactos também na geração de energia hidrelétrica.

Assim, o crescimento dos estudos de processos hidrológicos em bacias hidrográficas é de grande importância para os órgãos do governo e sociedade, pois servem de suporte quanto ao uso das informações para o gerenciamento de reservatórios, principalmente em regiões que, naturalmente, possuem grande variabilidade pluviométrica e, ao longo dos anos, vem sofrendo com períodos prolongados de estiagem – como é o caso do NEB. Dessa forma, o processo de quantificação dos riscos associados às mudanças climáticas, possibilita tomadas de decisões de forma a minimizar tais eventos, diminuindo o grau de vulnerabilidade dessas regiões.

Dito isso, um grande hidrossistema localizado no Estado do Ceará é o que atende a Bacia do Rio Jaguaribe (Alto, Médio e Baixo Jaguaribe, Banabuiú e Salgado) e Metropolitanas. A fim de obter informações acerca dos possíveis impactos no regime dos campos de precipitação, temperatura e vazão devido ao aumento das emissões dos GEE, nas bacias dos reservatórios que compõem todo o hidrossistema, este trabalho teve como objetivo avaliar a capacidade de alguns modelos do CMIP6 em representar as características da precipitação observada e analisar as projeções resultantes destes modelos, considerando os cenários SSP2-

4.5 e SSP5-8.5 para o século XXI.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos empregados neste capítulo são descritos nos seguintes itens: (4.2.1) região de estudo (4.2.2) dados utilizados (4.2.3) correção estatística e (4.2.4) análise das projeções.

4.2.1 Região de estudo

Neste capítulo a área de estudo compreenderá, conforme já apresentado na Figura 19 do capítulo 3, os reservatórios Aracoíaba, Gavião, Pacajus, Pacoti e Riachão – fazendo parte da região hidrográfica das Bacias Metropolitanas – e Banabuiú, Castanhão e Orós – que integram a grande Bacia do Jaguaribe. A Tabela 7, presente no capítulo 3, apresenta resumidamente as informações de capacidade de acumulação, área de drenagem, municípios integrantes e clima da região de estudo.

4.2.2 Dados utilizados

4.2.2.1 Dados observacionais

A base de dados observacionais de precipitação utilizada para verificar a destreza dos modelos participantes do CMIP6 nas bacias Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM, foram provenientes da base de dados do GPCC. O conjunto de dados utilizado corresponde à série histórica de precipitação de janeiro de 1891 a dezembro de 2020, em uma grade regular com uma resolução espacial de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$, em latitude e longitude (Schneider *et al.*, 2020).

Para a temperatura, utilizou-se a série histórica de temperatura do ar próximo à superfície obtida do *Climatic Research Unit* (CRU) com resolução espacial de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ (latitude x longitude), entre o período de janeiro de 1901 a dezembro de 2020 (Harris *et al.*, 2020). Além disso, para o cálculo da série observada de Evapotranspiração Potencial (ETP) foram utilizadas as séries mensais de janeiro de 1901 a dezembro de 2020 das variáveis de temperatura média (tas), temperatura mínima (tasmin) e temperatura máxima (tasmax) próximas a superfície com resolução espacial de $0,5^{\circ}$ em latitude e longitude, obtidas também do CRU (Harris *et al.*, 2020). A ETP foi estimada através do Método de Hargreaves-Samani (Hargreaves; Samani, 1985; Hargreaves, 1994) em rotina programada em linguagem R. A ETP

é computada através da equação 14:

$$ETP = 0.0023(tasmax - tasmin)^{0.5} (tas+17.8)R_a \quad (14)$$

em que a ETP é dada em mm/mês, as variáveis tas , $tasmin$ e $tasmax$ em °C e a Radiação Externa Média (R_a) foi estimada a partir da latitude e do mês do ano. Mais informações podem ser encontradas no trabalho de Hargreaves (1994).

4.2.2.2 Modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure)

O *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) foi utilizado para calcular as séries de vazões obtidas a partir da precipitação e ETP provenientes dos modelos do CMIP6. O SMAP é um modelo hidrológico determinístico, conceitual e concentrado do tipo transformação chuva-vazão, proposto por Lopes *et al.* (1981). Originalmente de estrutura diária, sofreu modificações oferecendo posteriormente as versões horária e mensal. Tomando os parâmetros capacidade de saturação do solo (S_{tr}) em mm, parâmetro de escoamento superficial (P_{es}) adimensional, coeficiente de recarga (C_{rec}) também adimensional e a constante de recessão (K_k) em $mês^{-1}$, o SMAP mensal considera dois reservatórios hipotéticos – solo (R_{solo}) e subterrâneo (R_{sub}), atualizando suas variáveis de estado a cada instante de tempo, de acordo com as equações 15 e 16 e com a inicialização dos reservatórios matematicamente expressa pelas Equações 17 e 18:

$$R_{solo}(i+1)=R_{solo}(i)+P-E_s-E_r-R_{ec} \quad (15)$$

$$R_{sub}(i+1)=R_{sub}(i)+R_{ec}-E_b \quad (16)$$

$$R_{solo}(1)=Tu_{in} \cdot S_{tr} \quad (17)$$

$$R_{sub}(1)=\frac{Eb_{in}}{(1-K_k)/a_d \cdot 2630} \quad (18)$$

em que P é a precipitação (mm), E_s é o escoamento superficial (mm), E_r é a evapotranspiração real (mm), E_b é o escoamento básico (mm), R_{ec} é a recarga transferida do reservatório do solo para o reservatório subterrâneo, Tu_{in} é o teor de umidade inicial (adimensional), Eb_{in} é a vazão básica inicial (m^3/s) e a_d é a área de drenagem em km^2 .

Na inicialização da simulação, o modelo obedece ao pressuposto de que há água armazenada nos referidos reservatórios. Para isso, os parâmetros supracitados recebem uma atribuição de valores. Dessa forma, a cada atualização de instante de tempo, incorpora-se um dado médio novo de precipitação, por meio das chamadas equações de transferências (Equações 19, 20, 21 e 22):

$$E_s=f_1 \cdot P \quad (19)$$

$$E_r = f_2 \cdot E_p \quad (20)$$

$$R_{ec} = f_3 \cdot R_{solo} \quad (21)$$

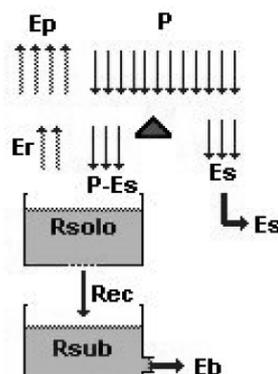
$$E_b = f_4 \cdot R_{sub} \quad (22)$$

onde E_p é evapotranspiração potencial; $f_1 = T_u^{P_{es}}$; $f_2 = T_u$; $f_3 = C_{rec} \cdot T_u^4$ e $f_4 = 1 - K_k$.

A cada instante de tempo é realizado um balanço de massa na área de drenagem considerada. Ocorre a transferência de uma parcela de precipitação (P) como escoamento superficial (E_s). A lâmina restante de P é subtraída do E_s e da evapotranspiração potencial (E_p), sendo descarregada em seguida ao reservatório hipotético – solo (R_{solo}). Aqui, as perdas por evapotranspiração real (E_r), que, por sua vez, dependem do nível do reservatório e da capacidade de saturação do solo (S_{tr}) confere uma atualização da umidade do solo ao longo do tempo. Com base no teor de umidade (T_u), no R_{solo} e no coeficiente de recarga (C_{rec}) é estimada a recarga transferida do reservatório do solo para o reservatório subterrâneo (R_{ec}). Neste, o nível de água sofre redução a uma taxa constante de acordo com constante de recessão (K_k), gerando como saída o escoamento básico (E_b). A vazão total no ponto de controle da bacia é dada pela soma de E_s com E_b , conforme a Equação 23. A Figura 23 ilustra como funciona o modelo SMAP mensal.

$$Q = \frac{(E_s + E_b) \cdot a_d}{2630} \quad (23)$$

Figura 23-Esquemática do funcionamento do modelo SMAP mensal.



Fonte: Adaptado de Lopes (1999).

Para calibrar o modelo SMAP mensal, os parâmetros S_{tr} , P_{es} e C_{rec} sofreram uma otimização através da função Solver do software Microsoft Office Excel. As variáveis precipitação (mm/mês), vazão (m^3/s), evapotranspiração potencial (mm/mês) e área da bacia (km^2) foram inseridas como dados de entrada. A função objetivo utilizada para calibração foi o

índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) – equação 24 conforme Mathias *et al.* (2015) – que tem se mostrado um importante critério estatístico e muito usado para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos (Machado; Vettorazzi, 2003; Andrade *et al.*, 2017).

$$NSE=1-\frac{\sum_{i=1}^N (o_i-m_i)^2}{\sum_{i=1}^N (o_i-\bar{o}_i)^2} \quad (24)$$

em que N é o número de amostras, o_i são os dados observados, m_i são os dados modelados e \bar{o}_i é a média dos dados observados.

O NSE varia entre negativo infinito a 1, sendo este valor unitário a indicação de um perfeito ajuste (ASCE, 1993). O desempenho do modelo pode ser classificado conforme os critérios abordados por Silva *et al.* (2008): para NSE maior que 0,75 tem-se desempenho bom; NSE entre 0,36 e 0,75, confere um desempenho aceitável e para NSE inferior a 0,36 seu desempenho é considerado inaceitável. Verificou-se ainda o coeficiente de correlação de Pearson (R). Em sua expressão, este coeficiente fornece o grau de correlação (associação) linear entre duas variáveis quantitativas (Moore, 2007). Seguindo a formulação adotada por Jolliffe e Stephenson (2003), a Equação 25 define R como:

$$R=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N\left(\frac{\phi'_i\psi'_i}{\sigma_\phi\sigma_\psi}\right) \quad (25)$$

onde ϕ'_i é o desvio da série estimada, ψ'_i é o desvio da série observada, σ_ϕ e σ_ψ são os desvios padrões das médias das séries estimada e observada, respectivamente.

Basicamente, sua interpretação consiste no fato de que quanto mais próximo de 1 seja o valor de R, maior é a força associativa entre as variáveis ao mesmo tempo que o sinal funciona como um indicador da direção positiva/negativa desta relação. Dessa forma, os valores de R para -1 e 1 remetem a uma correlação perfeita, enquanto que o valor de zero para R, remete a nenhuma relação linear entre as variáveis estudadas (Moore, 2007).

Também foram atribuídos valores para as variáveis que descrevem as condições iniciais das bacias: Tu_{in} e Eb_{in} , reajustadas manualmente a cada rodada de simulação até alcançar o melhor valor de performance do NSE. Para a calibração e validação das séries de vazão, foram considerados períodos concomitantes de dados de vazão observada, ETP e precipitação. Para calibração foram selecionados os períodos de 1974-1979, 2000-2005, 1989-1994 e 1985-1989 e para a validação os períodos de 1984-1989, 2008-2015, 1995-2000 e 1991-1994 para Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM, respectivamente. Os parâmetros calibrados do modelo SMAP mensal e os valores do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe e R obtidos para as séries calibradas e validadas podem ser consultados no Apêndice.

4.2.2.3 Projeto Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)

Utilizou-se dados mensais dos campos de precipitação e temperatura do ar próximo à superfície, temperatura máxima e mínima do ar próximo à superfície, obtidos de cinco modelos participantes do projeto CMIP6 (ver Tabela 11), os quais forneceram informações para o 6º Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). A base de dados compreende as séries mensais de 1850 a 2014 (período de referência) e de 2015 a 2100 (período para as projeções).

Tabela 11 - Modelos do Sistema Terrestre (ESM) do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) utilizados e suas respectivas instituições/agências / países de origem e resolução horizontal espacial.

Modelo	Instituição ou Agência / País	Resolução
<i>Beijing Climate Center Climate System Model version 2 – Medium Resolution (BCC-CSM2-MR)</i>	<i>Beijing Climate Center (BCC)/ China e Meteorological Administration (CMA)/ China</i>	1,125°×1,125°
<i>Hadley Centre Global Environment Model in the Global Coupled configuration 3.1 (HadGEM3-GC31-LL)</i>	<i>Met Office Hadley Centre Integrated Earth System Approach to Explore / Reino Unido</i>	1,875°×1,25°
<i>Model for Interdisciplinary Research on Climate version 6 (MIROC6)</i>	<i>Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies e Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology / Japão</i>	1,41°×1,41°
<i>The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0 (MRI-ESM2-0)</i>	<i>Meteorological Research Institute / Japão</i>	1,125°×1,125°
<i>Institut Pierre-Simon Laplace model Version 6A- Low Resolution (IPSL-CM6A-LR)</i>	<i>Institut Pierre-Simon Laplace Climate Modelling Centre (IPSL CMC) / França</i>	2,5°×1,27°

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.2.3.1 Cenários de projeção de emissões de Gases de Efeito Estufa

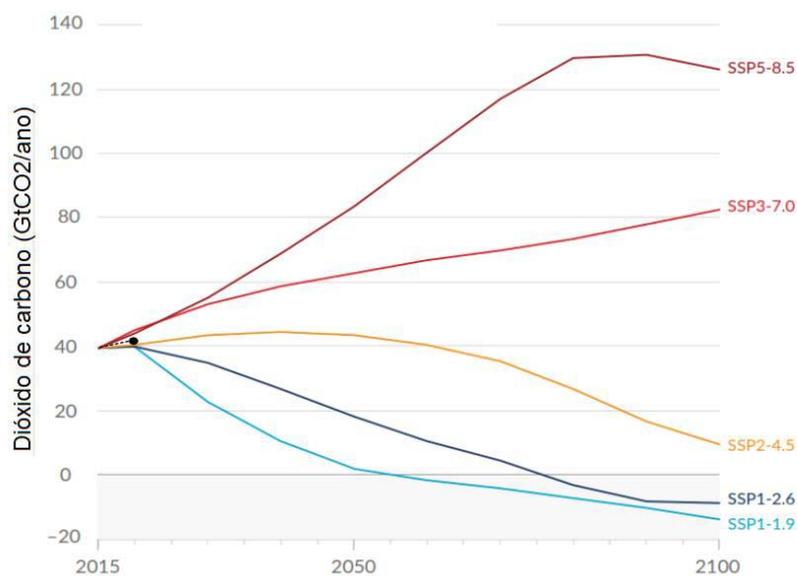
O AR6 utiliza cinco cenários possíveis para o futuro, resultantes de cálculos complexos que dependem da rapidez com que os humanos reduzem as emissões de gases de efeito estufa. Estes cálculos também visam capturar mudanças socioeconômicas em áreas como população, densidade urbana, educação, uso da terra e riqueza. Cada cenário é rotulado para identificar o nível de emissões e é denominado SSP (IPCC, 2021). Ao longo deste capítulo, os cinco cenários ilustrativos são referidos como SSPx-y, onde 'SSPx' refere-se à SSP que descreve as tendências socioeconômicas subjacentes ao cenário, e 'y' se refere ao nível aproximado da forçante radiativa (em W/m^2) resultante do cenário no ano de 2100.

De acordo com o AR6 (IPCC, 2021), os SSP incluem cenários:

- a) com emissões altas e muito altas de GEE e emissões de CO₂ que praticamente dobram dos níveis atuais em 2100 e 2050 (SSP3-7.0 e SSP5-8.5), respectivamente. No SSP3-7.0, os países se tornam mais competitivos uns com os outros, mudando a segurança nacional e garantindo seus próprios suprimentos de alimentos. No final do século, as temperaturas médias aumentarão em até 3,6 °C. No SSP5-8.5, a economia global cresce rapidamente, sendo esse crescimento alimentado pela exploração de combustíveis fósseis e estilos de vida com uso intensivo de energia. Em 2100, a temperatura média global será 4,4 graus mais alta;
- b) com emissões intermediárias de GEE e emissões de CO₂ permanecendo em torno dos níveis atuais até o meio do século (SSP2-4.5). Aqui os fatores socioeconômicos seguem suas tendências históricas, sem mudanças notáveis. O progresso em direção à sustentabilidade é lento, com desenvolvimento e renda crescendo de forma desigual. Nesse cenário, as temperaturas aumentam 2,7 °C até o final do século e;
- c) com emissões de GEE muito baixas e emissões de CO₂ caindo para zero líquido por volta ou depois de 2050, seguido por níveis variáveis de emissões líquidas negativas de CO₂ (SSP1-1.9 e SSP1-2.6), conforme ilustrado na Figura 24. Além disso, estes cenários imaginam que as sociedades mudam para práticas mais sustentáveis, focando na mudança do crescimento econômico para o bem-estar geral. Os investimentos em educação e saúde aumentam. A desigualdade cai. O clima extremo é mais comum, mas o mundo se esquivou dos piores impactos das mudanças climáticas. Os cenários SSP1-1.9 e o SSP1-2.6 projetam

a estabilização da temperatura em torno de 1,4 °C e 1,8 °C, respectivamente, até o final do século.

Figura 24 - Emissões anuais futuras de CO2 de acordo com os cinco cenários SSP.



Fonte: Adaptado de IPCC (2021).

Neste estudo optou-se pelas escolhas do cenário intermediário e o de maior emissão de GEE: o SSP2-4.5 e o SSP5-8.5, respectivamente.

4.2.3 Correção estatística

Uma correção estatística via *Cumulative Distribution Function* (CDF) Gama com o mapeamento da probabilidade foi realizada nas séries temporais mensais de precipitação e ETP dos modelos provenientes do CMIP6, de forma a corrigir as saídas dos modelos climáticos para produzir campos internamente consistentes que tenham a mesma distribuição de intensidade estatística das observações. Para a distribuição de probabilidade de precipitação vem-se tomando a distribuição Gama (Thom, 1958), com os parâmetros de forma e escala, α e β , respectivamente. Estudos como de Block *et al.* (2009), Piani *et al.* (2010), Teutschbein e Seibert (2012) e Lafon *et al.* (2013) mostraram que esse método se apresenta eficaz na mitigação dos erros sistemáticos de MCRs. A Equação 26 expressa a distribuição Gama (Thom, 1958):

$$f_{\gamma}(x|\alpha,\beta)=\frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}; x \geq 0; \beta > 0 \quad (26)$$

onde x é a variável aleatória (nesse caso precipitação e ETP) e, portanto, $x > 0$ e Γ é a Função Gama.

Os parâmetros de forma e escala são estimados para cada ponto de grade e para cada mês, sendo sua metodologia equacionada a seguir. As Equações 27, 28, 29, 30 e 31 expressam matematicamente o processo de correção de viés dos dados de precipitação e ETP:

$$(\alpha_s, \beta_s) = \text{gamafit}(x_s) \quad (27)$$

$$H_{SR} = F_\gamma(x_s, \alpha_s, \beta_s) \quad (28)$$

onde α_s e β_s são os parâmetros de forma e escala, respectivamente, referentes aos dados históricos que foram simulados pelos modelos e F_γ é a CDF Gama.

Tomando-se os dados históricos observados, tem-se:

$$(\alpha_o, \beta_o) = \text{gamafit}(x_o) \quad (29)$$

$$H_{OR} = F_\gamma(x_o, \alpha_o, \beta_o) \quad (30)$$

$$H_{CR} = F_\gamma^{-1}(H_{SR}, \alpha_o, \beta_o) \quad (31)$$

em que α_o e β_o são os parâmetros de forma e escala, respectivamente; F_γ^{-1} é o inverso da CDF Gama; e H_{CR} é a variável corrigida de tendência histórica.

Feito isso, as Equações 32, 33 e 34 são usadas para a correção dos vieses dos dados dos cenários futuros simulados pelos modelos do CMIP6:

$$(\alpha_f, \beta_f) = \text{gamafit}(x_f) \quad (32)$$

$$F_{SR} = F_\gamma(x_f, \alpha_f, \beta_f) \quad (33)$$

$$F_{CR} = F_\gamma^{-1}(F_{SR}, \alpha_f \frac{\alpha_s}{\alpha_o}, \beta_f \frac{\beta_s}{\beta_o}) \quad (34)$$

onde α_f e β_f são os parâmetros de forma e escala, respectivamente, referentes aos dados de precipitação e ETP futuros que foram simulados pelos modelos; x_f é a variável futura simulada e F_{CR} é a variável corrigida de tendência futura.

Mais informações sobre o método de correção estatística através do CDF gama, podem ser encontrados em Modala (2014).

4.2.4 Análise das projeções

Antes de realizar a análise das projeções, avaliou-se, junto aos dados observados, os dados provenientes dos modelos do CMIP6, realizando-se uma análise comparativa com base nas métricas estatísticas de desvio padrão, coeficiente de correlação de Person e Raiz do Erro Quadrático Médio, já definidos na seção 2.2.3.

As projeções de precipitação, vazão e temperatura dos modelos globais do CMIP6 foram analisadas nas bacias hidrográficas para o período de 2015 a 2100, considerando os períodos de curto, médio e longo prazo: 2015 a 2044; 2045 a 2074 e 2075 a 2100, respectivamente.

Para o cálculo das anomalias médias anuais (A_{anual}) das variáveis de precipitação e vazão, utilizou-se a equação 35:

$$A_{\text{anual}} = \frac{(Z_{\text{XXI}}^a - Z_{\text{XX}}^a)}{Z_{\text{XX}}^a} \cdot 100 \quad (35)$$

onde Z_{XXI}^a é a média da variável anual para o cenário do século XXI e Z_{XX}^a é a média da variável anual para o século XX. Para o cálculo da anomalia da temperatura considerou-se a diferença entre as médias da temperatura no século XXI e no século XX.

Para verificar tendências nas variáveis supracitadas, utilizou-se o teste de Mann-Kendall Sen (Mann, 1945; Kendall, 1975) e declividade de Sen (1968). Moreira e Naghettini (2016) destacam que esse teste vem sendo bastante utilizado para a detecção de tendências monotônicas em séries de observações hidrológicas e é recomendado pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) para análise de séries temporais (ST) de variáveis ambientais, apresentando resultados coerentes por diversos autores ao testar a hipótese nula (H_0) de ausência de tendência, como acrescenta Portela (2011).

Considerando uma série (x_1, x_2, \dots, x_n) obtida de uma amostra de n variáveis aleatórias independentes e igualmente distribuídas, calcula-se a variável estatística S de MK através da equação 36 (Paulino *et al.*, 2019):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sinal}(x_j - x_i) \quad (36)$$

onde x_i e x_j são valores sequenciais; i e j são os índices de tempo e n é o número de elementos da série. O termo $\text{Sinal}(x_j - x_i)$ é resultado da equação 37:

$$\text{Sinal}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{se } x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (37)$$

A hipótese nula H_0 foi testada sobre a estatística S através das variáveis de correlação de Tau de Kendall (τ) e p-valor. Através da probabilidade acumulada da distribuição normal, pode-se estimar o p-valor para os dados da amostra. Tomando-se $\alpha = 0.05$ como o nível de significância comumente utilizado na literatura para o teste MK, se $p \leq \alpha$, rejeita-se H_0 , o que indica a existência de tendência na série analisada (Moreira; Naghettini, 2016). A variável τ quantifica a magnitude da relação monotônica e é computada através da equação 38 (Bari *et al.*, 2016):

$$\tau = \frac{S}{\frac{1}{2}n(n-1)} \quad (38)$$

Valores positivos de S indicam tendência crescente, enquanto valores negativos apontam tendência decrescente. Mais detalhes da estatística de teste MK e suas particularidades, podem ser consultados em Paulino *et al.* (2019). De forma a complementar o teste MK, obtendo as magnitudes das tendências detectadas, utilizou-se o teste de declividade de Sen (1968) (doravante denominado Sen). Esse teste é estimado matematicamente pela estatística Q equacionada a seguir (Tao *et al.*, 2014):

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} ; k < j \quad (39)$$

onde Q_i é a declividade do i -ésimo par de dados e x_j e x_k são os valores da variável nos instantes de tempo j e k , respectivamente. O valor positivo ou negativo para Q indica tendência crescente ou decrescente, respectivamente. Como apontado por Tao *et al.* (2014), a declividade Sen é determinada através do cálculo da declividade entre todos os pares possíveis dos elementos do conjunto de dados, sendo calculada a mediana dessas declividades para representar a declividade geral (N) desse conjunto. Logo, a declividade de Sen é dada pela mediana dos N valores de Q_{ij} . No caso de haver apenas uma referência em cada período de tempo e sendo n o tamanho da série, tem-se N pares de dados como:

$$N = n \frac{n-1}{2} \quad (40)$$

Nesse estudo, tomou-se o nível de significância de 0,05 ($\alpha=0,05$).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados e discussão da avaliação das simulações históricas bem como das projeções de mudanças climáticas dos modelos participantes do CMIP6, de forma a conhecer a representação do clima presente e futuro sobre as oito bacias constituintes do hidrossistema Jaguaribe.

4.3.1 Avaliação dos Modelos

Na seção 4.3.1.1 serão discutidos os resultados da validação entre os dados observados e os estimados pelos modelos. E as seções 4.3.1.2 e 4.3.2 estão destinadas, respectivamente, aos resultados e discussão do padrão de variabilidade do período histórico e das projeções das mudanças climáticas da precipitação, vazão e temperatura.

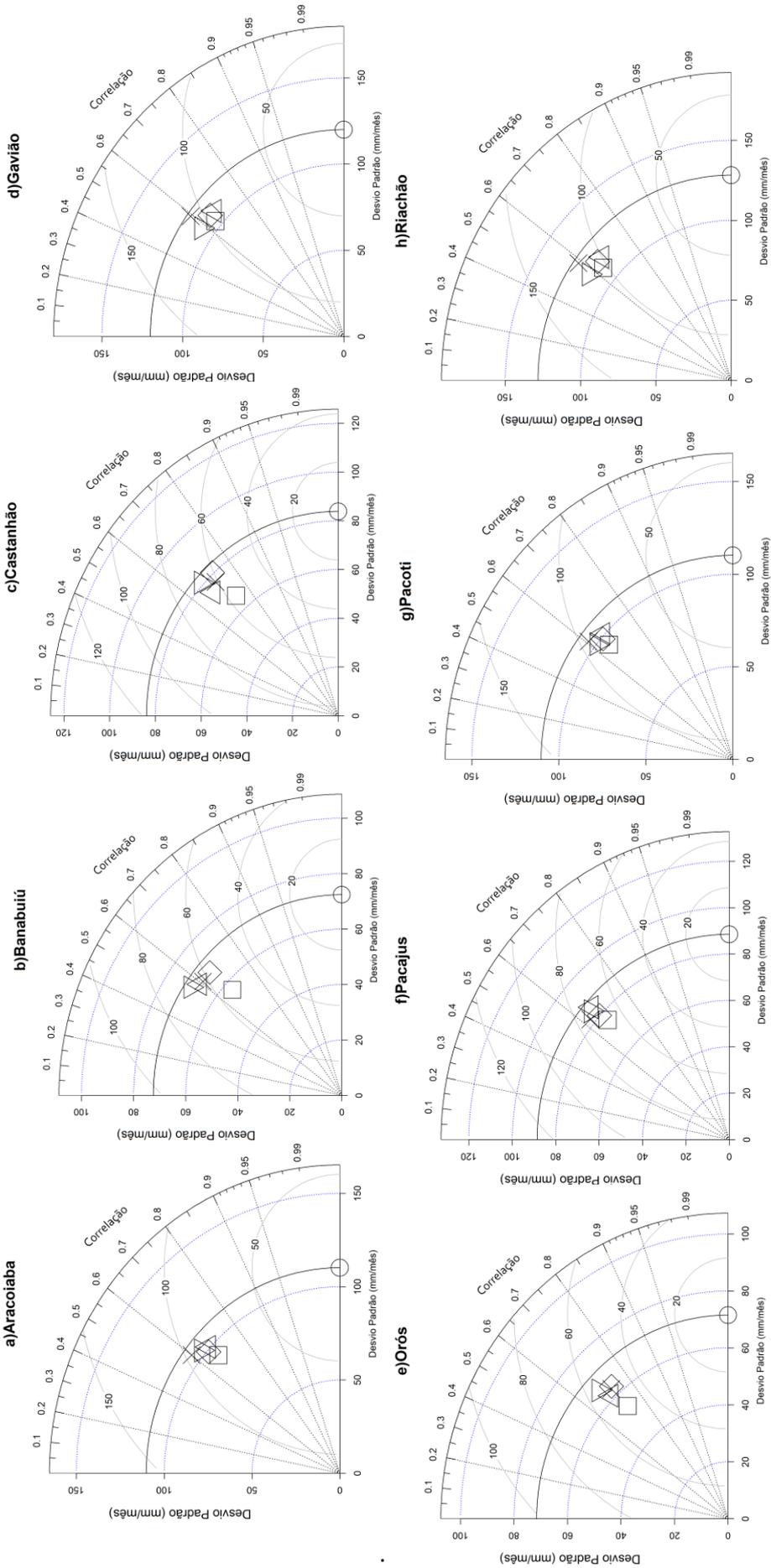
4.3.1.1 Avaliação dos modelos do CMIP6

O Diagrama de Taylor (DT) representado na Figura 25 fornece um resumo gráfico de quão próximo os modelos participantes do CMIP6 estão dos dados observados do GPCC considerando a variável precipitação. Nesse estudo, escolheu-se pelo DT com as três métricas já citadas na metodologia: o R, o DV e a RMSE.

Considerando o conjunto de modelos, observa-se na Figura 25 que na maioria das bacias (Aracoiaba, Banabuiú, Gavião, Pacajus, Pacoti e Riachão) o conjunto apresentou uma correlação moderada ($0,5 < R < 0,7$) com os dados observados. Correlações positivas altas ($0,7 < R < 0,9$) foram identificadas no Castanhão e Orós. Analisando individualmente os modelos, o melhor desempenho foi observado pelo IPSL-CM6A-LR com forte correlação ($R \geq 0,7$) especialmente no Castanhão e Orós e com o menor DV na maioria das bacias (com valores inferiores a 60 mm/mês no Banabuiú e Orós).

Os menores valores para os erros RMS, aproximadamente entre 40 e 60 mm/mês, foram apontados pelos modelos HadGEM3-GC31-LL e IPSL-CM6A-LR no Banabuiú e no Castanhão (aqui junto do modelo BCC-CSM2-MR) e para todo o conjunto dos cinco modelos em Orós. Em Aracoiaba, Gavião, Pacoti e Riachão, o BCC-CSM2-MR apresentou desvio padrão mais próximo das observações. No geral, considerando o conjunto das métricas analisadas, o modelo IPSL-CM6A-LR mostrou-se com melhor desempenho.

Figura 25 - Diagrama de Taylor com os valores de Correlação, Desvio Padrão (mm) e Raiz do Erro Quadrático Médio (mm) para cada modelo participante do CIMP6 em relação a precipitação observada do GPCC para (a) Aracoiaiba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão. O círculo vazio no eixo das abscissas representa o conjunto de observações



+ BCC-CSM2-MR ◊ HadGEM3-GC31-LL ◻ IPSL-CM6A-LR ◻ MRI-ESM2-0
 Fonte: Elaborada pelo autor.

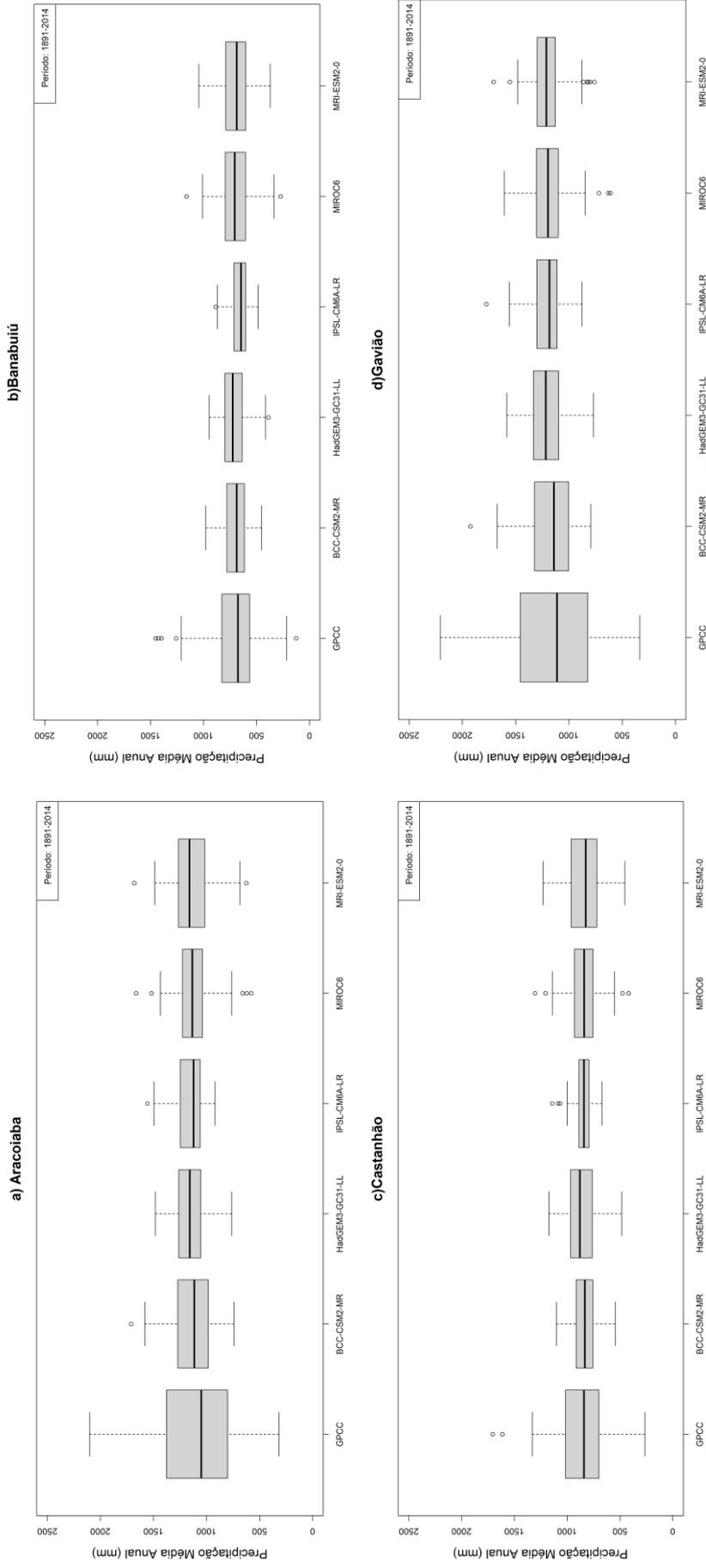
4.3.1.2 Análise da Precipitação no período histórico

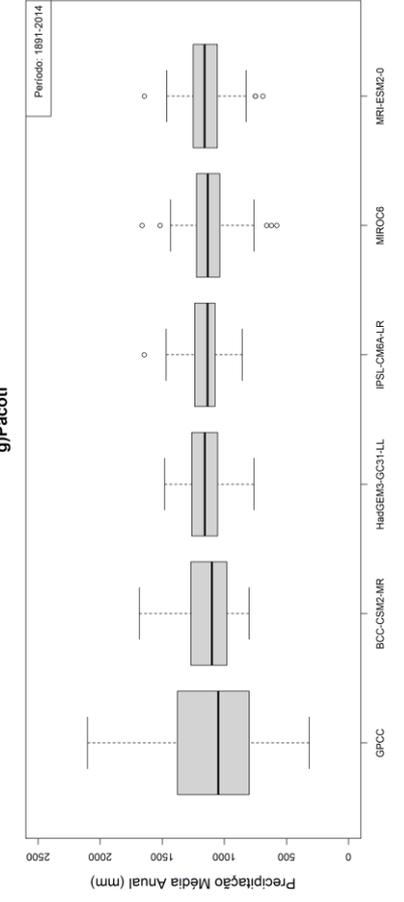
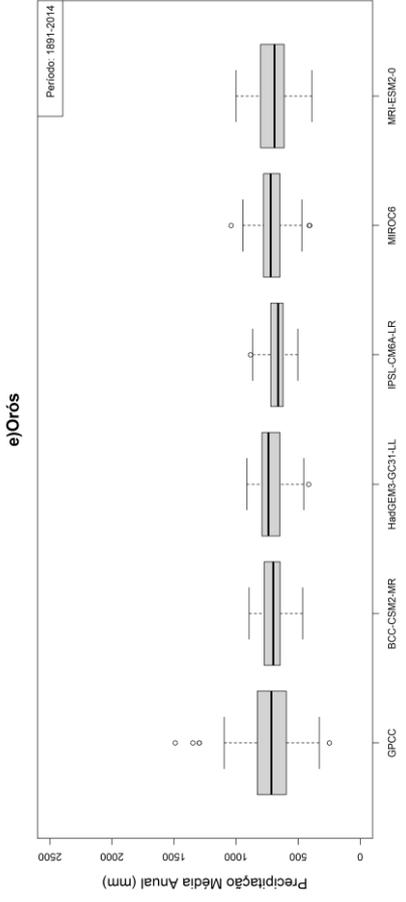
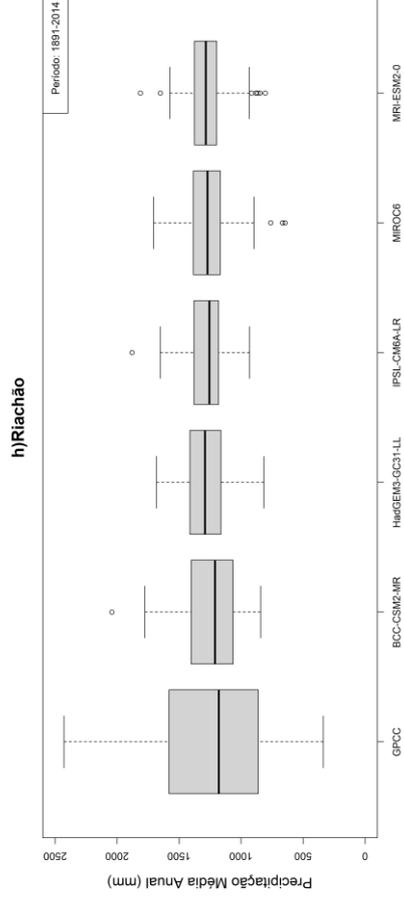
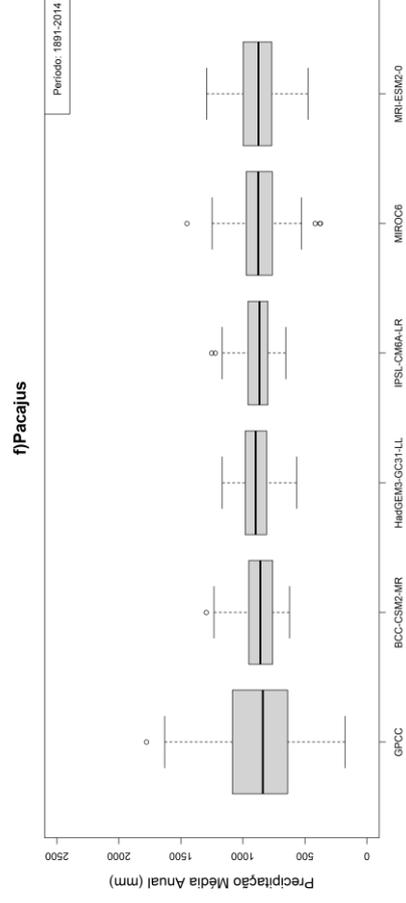
A Figura 26 apresenta o gráfico *boxplot* da precipitação média anual nas oito bacias analisadas considerando as séries de dados do GPCC e os modelos do CMIP6 para o período de 1891 a 2014, fornecendo informações de posição, dispersão, assimetria, caudas e observações extremas ou *outliers*.

Precipitações consideradas como discrepantes (*outliers*) foram identificadas em maior quantidade para duas bacias na fonte de dados observados: Banabuiú e Orós; e nos modelos: MIROC6 e MRI-ESM2-0 para a maioria das bacias. Os principais eventos atípicos para a base de dados observados ocorreram nos anos 1919, 1924, 1974 e 1985 em Banabuiú, com valores de 125,27 mm, 1425,90 mm, 1452,10 mm, e 1396,60 mm respectivamente; e em Orós nos anos 1919, 1924, 1974 e 1985 com precipitações de 1295,90 mm, 248,42 mm, 1346,60 mm e 1488,70 mm respectivamente.

A base de dados observados apresentou os menores quartis 1 e 3 e o menor valor de mediana em Banabuiú, indicando que 75% dos seus dados de precipitação estiveram entre 566,7 mm e 826,1 mm e que 50% desses dados foram representados por uma precipitação em torno de 675,7 mm. Banabuiú, dentre todas as bacias, também apontou o menor quartil 3 a partir do modelo IPSL-CM6A-LR, o que significa que 75% da sua precipitação foi representada por valores abaixo de 713,2 mm. No geral, o MRI-ESM2-0 apresentou o maior quartil 1, com valores próximos de 1200 mm em Riachão. Ainda para esta bacia, obteve-se o maior quartil 3, com valores próximos de 1.580 mm para a base de dados do GPCC e a maior mediana a partir do modelo HadGEM3-GC31-LL, indicando que 50% dos seus dados de precipitação foram superiores a aproximadamente 1292 mm. A distribuição dos totais de precipitação média anual para o HadGEM3-GC31-LL e o MIROC6 se mostrou a mais regular diante dos outros dados, o que mostra uma menor susceptibilidade a desvios a partir destas fontes.

Figura 26 - Gráfico boxplot da precipitação média anual considerando a série de dados do GPCC e os modelos participantes do CMP6 para o período de 1891 a 2014 para (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão.



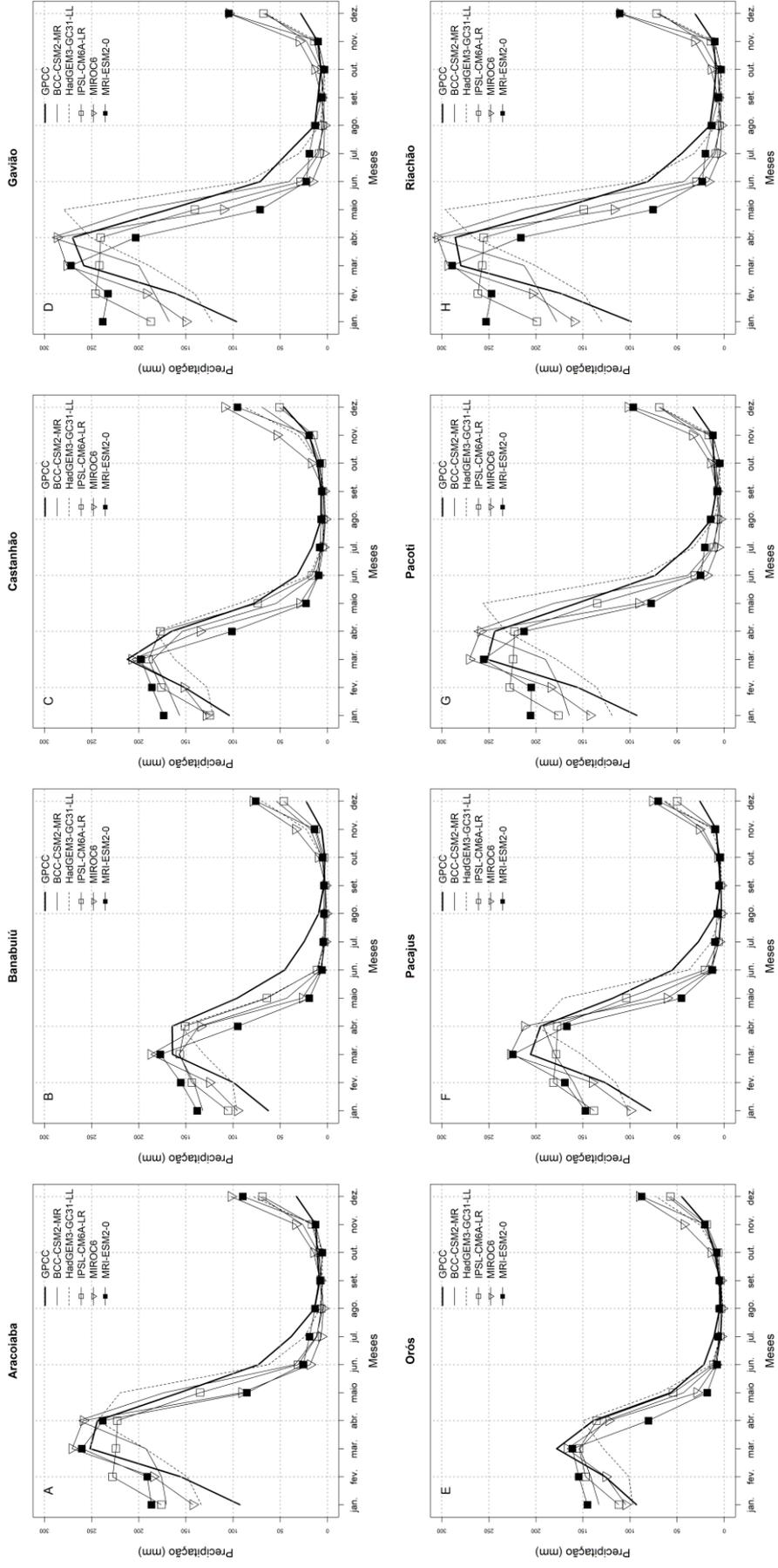


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 27 mostra a climatologia da precipitação média mensal do GPCC e modelos do CMIP6 para o período de janeiro de 1891 a dezembro de 2014 nas bacias analisadas. De acordo com as figuras acima os modelos do CMIP6, convergiram quanto à quantidade de precipitação observada pelo GPCC na maioria das bacias e preferencialmente nos meses de agosto a outubro, apresentando uma baixa variabilidade no segundo semestre, em que geral compreende o período seco do Estado. De modo geral, foi no Castanhão e Orós que a maioria dos modelos melhor representaram a climatologia observada, mesmo no semestre chuvoso, subestimando-a, no entanto, nos meses de janeiro a abril, principalmente. Características que em suma, associa-se ao período característico da influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que é o principal sistema atmosférico influenciador das chuvas atuante sobre o norte do NEB/CE – modificado basicamente pela Temperatura da Superfície do oceano Atlântico Tropical – associado ao Gradiente inter-hemisférico dessa região.

Observa-se nas climatologias de precipitação uma sazonalidade semelhante, apresentando o pico anual nos meses de março: Aracoiaba, Castanhão, Orós, Pacajus e Pacoti; e de abril: Gavião e Riachão; Banabuiú apresenta sua precipitação climatológica máxima entre março e abril. Esta sazonalidade, no entanto, não foi bem representada pelo conjunto de modelos especialmente nas bacias dos reservatórios Aracoiaba, Gavião, Pacajus, Pacoti e Riachão que apontaram as maiores divergências entre os modelos quanto à quantidade precipitada nos meses de janeiro a abril. Para este período, o modelo IPSL-CM6A-LR foi o que melhor representou satisfatoriamente a precipitação observada, entretanto a subestimou na maioria das regiões estudadas. De outra forma, o modelo HadGEM3-GC31-LL teve a pior representação da sazonalidade climatológica quanto a série observada e até mesmo em relação aos demais modelos, mostrando uma precipitação defasada na maioria das bacias.

Figura 27 - Precipitação climatológica do GPCC e dos modelos do CMIP6 para (A) Aracoiaba (B) Banabuiú (C) Castanhão (D) Gavião (E) Orós (F) Pacajus (G) Pacoti (H) Riachão.



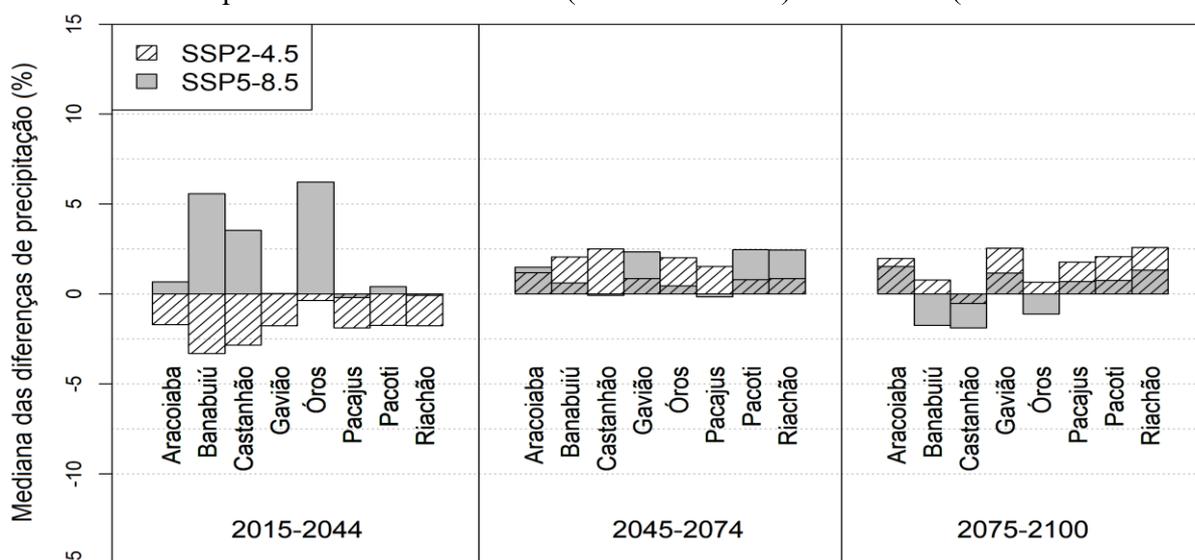
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.2 Análise das projeções

4.3.2.1 Precipitação

A Figura 28 mostra as medianas⁴ das diferenças entre a precipitação futura e a histórica do conjunto de modelos do CMIP6 nos períodos de 2015 a 2044, 2045 a 2074 e 2075 a 2100, para as bacias dos reservatórios de Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Figura 28 - Medianas (%) das diferenças entre a precipitação futura e a histórica do conjunto de modelos do CMIP6 para as bacias Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão para os cenários SSP2-4.5 (barra hachurada) e SSP5-8.5 (barra em cor cinza).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando o cenário SSP2-4.5 para o primeiro período (2015-2044), a mediana das diferenças entre a precipitação futura e a histórica indicou redução em todas as bacias – com suas magnitudes variando entre 0 e 5%. Ainda neste cenário, Banabuiú e Castanhão detiveram a maior possibilidade de redução da precipitação dentre as demais, com módulos superiores a 2,5%. Para o cenário de maior emissão de GEE, o conjunto apontou medianas positivas com destaque para as bacias Orós e Banabuiú que obtiveram valores superiores a 5%, seguidas do Castanhão com mediana acima de 2,5%.

Para o período de 2045 a 2074 o conjunto de modelos convergiu sobre precipitações acima da média histórica em ambos os cenários e para a maioria das bacias. No entanto, para

⁴ A mediana é usada aqui como uma medida central que indica a tendência geral das diferenças entre as projeções futuras e os dados históricos de precipitação ao longo desses períodos de tempo.

Banabuiú, Castanhão, Orós e Pacajus espera-se medianas mais intensas para o cenário SSP2-4.5 quando comparado ao cenário SSP5-8.5. Gavião, Pacoti e Riachão destacaram-se, neste último cenário, projetando medianas de até 2,5%.

Para o período 2075 a 2100, observou-se uma maior dispersão das medianas entre os cenários para Banabuiú e Orós, o que pode estar associado ao aumento das incertezas destas projeções a longo prazo. Um provável aumento da precipitação, foi apontado para as demais bacias nos dois cenários, mas com destaque para o SSP2-4.5 e para o Gavião e Riachão. A redução mais significativa na precipitação foi projetada no Castanhão, Banabuiú e Orós com módulos das medianas de até 2,5% no cenário SSP5-8.5.

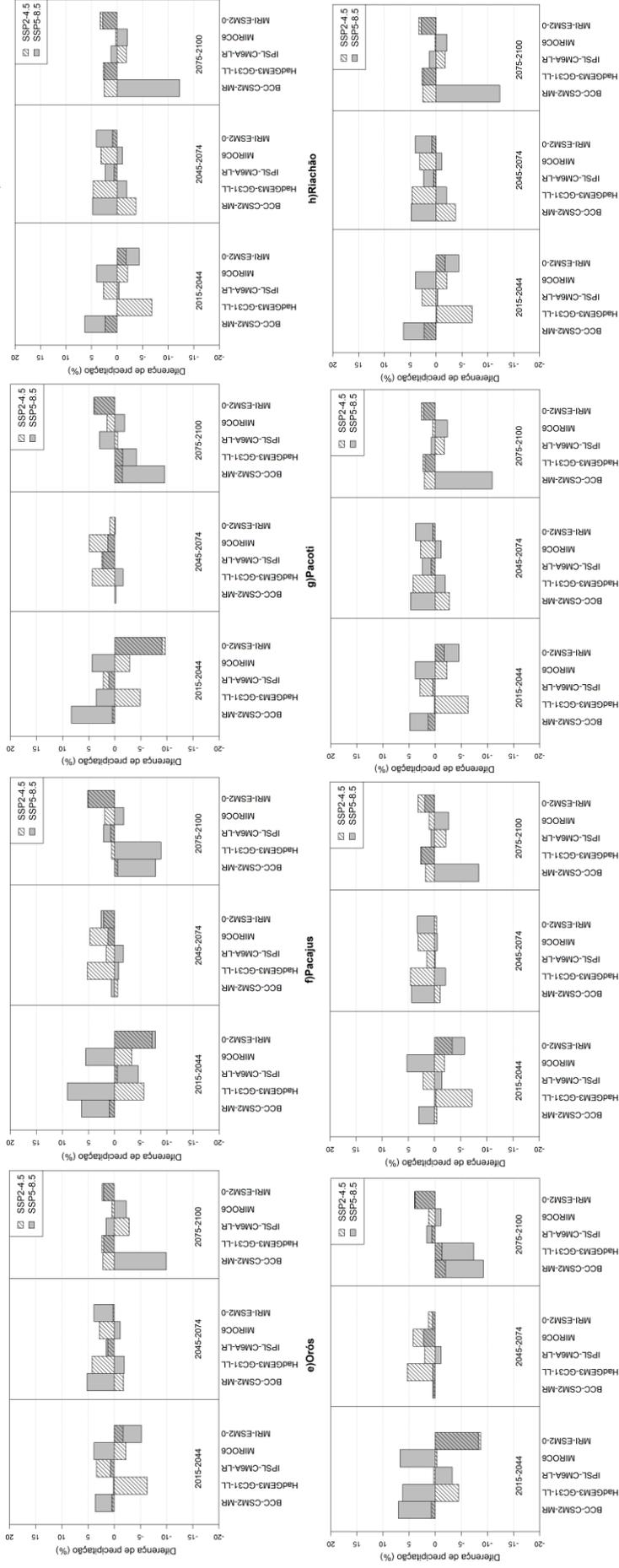
A Figura 29 mostra as diferenças das precipitações médias anuais para cada um dos modelos do CMIP6, entre os períodos de 2015 a 2044, 2045 a 2074 e 2075 a 2100 (nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5) e o período histórico (1850 a 2019), para (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão.

Em todas as bacias, o modelo BCC-CSM2-MR indicou as reduções mais significativas das precipitações médias anuais, com valores superiores a 10%, no cenário de maior emissão de GEEs para o último período, ao passo que o modelo HadGEM3-GC31-LL apontou reduções já no primeiro período de 30 anos, mas para o cenário SSP2-4.5. De outra forma, o modelo HadGEM3-GC31-LL indicou aumento de magnitude superior aos demais modelos, de aproximadamente 10%, para Banabuiú no período de 2015 a 2044 no cenário SSP5-8.5.

Os modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 identificaram um padrão de aumento nas precipitações médias anuais, especialmente sob o cenário SSP5-8.5, identificado nos primeiros 30 anos e para as maiores bacias que constituem o hidrossistema Jaguaribe: Banabuiú, Castanhão e Orós.

O primeiro e o terceiro período mostraram uma maior divergência em relação ao impacto entre os modelos e entre os cenários considerados, demonstrando incerteza em relação ao futuro das precipitações.

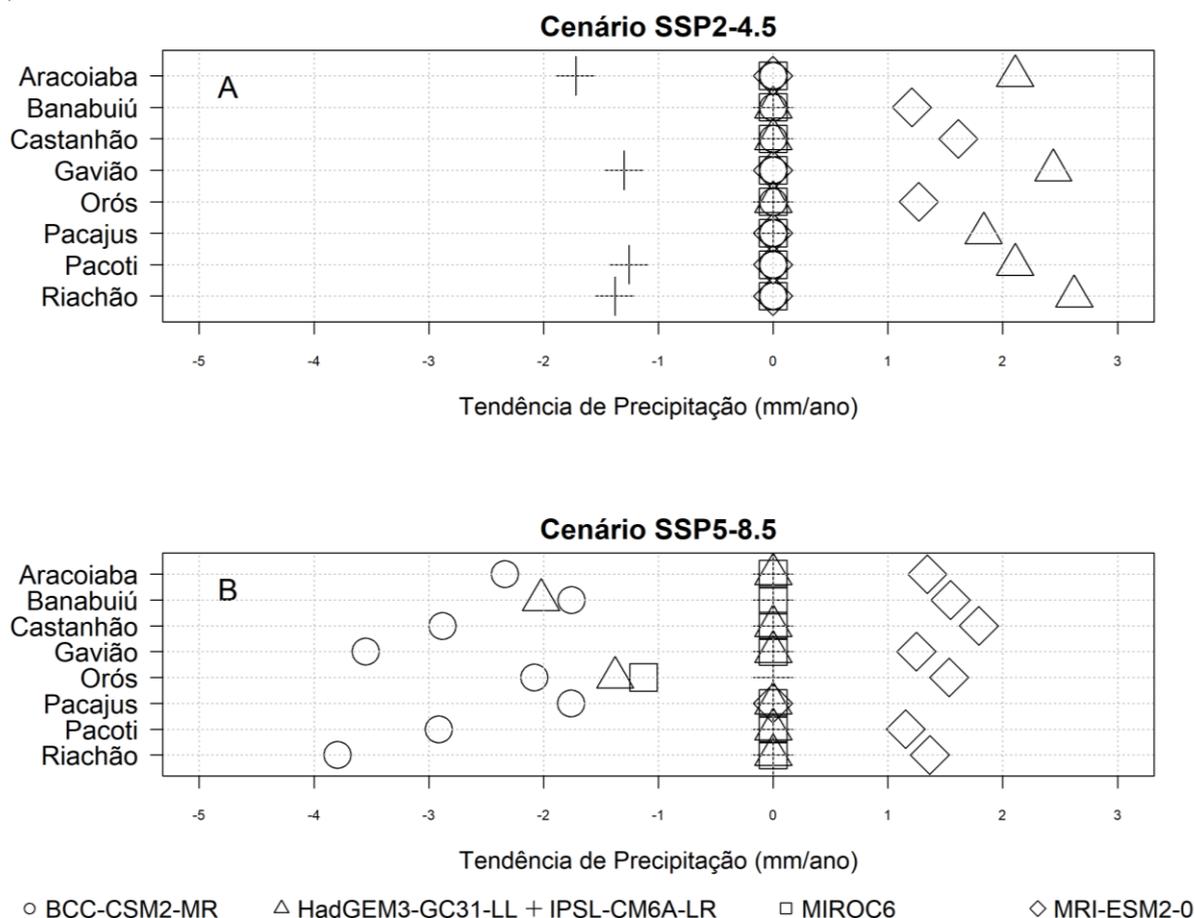
Figura 29 - Diferença (%) entre a precipitação média anual futura e a histórica para cada um modelos do CMIP6 para as bacias (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão para os cenários SSP2-4.5 (barra hachurada) e SSP5-8.5 (barra cinza) cor cinza).



Fonte: Elaborada pelo autor.

As Figuras 30(a) e 30(b) mostram a tendência Mann-Kendall Sen da série temporal de precipitação, entre o período de 2015 a 2100, projetada pelo CMIP6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente.

Figura 30 - Tendência da precipitação (mm ano⁻¹) para o período de 2015 a 2100 em Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão para os cenários a) SSP2-4.5 e b) SSP5-8.5.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os modelos MIROC6 e BCC-CSM2-MR foram os únicos que não identificaram tendências para a precipitação no cenário SSP2-4.5. Neste, o modelo IPSL-CM6A-LR se mostrou o mais pessimista em Aracoiaba, Gavião, Pacoti e Riachão, apontando reduções de até 1,71 mm/ano. Tendências positivas foram apontadas pelos modelos HadGEM3-GC31-LL e o MRI-ESM2-0 em algumas das bacias, com projeções de aumento da precipitação de até 2,62 mm/ano. Vale salientar que apenas o HadGEM3-GC31-LL, o IPSL-CM6A-LR e o MRI-ESM2-0 obtiveram tendências significativas para algumas das bacias no referido cenário. Para o cenário SSP5-8.5, apenas o modelo BCC-CSM2-MR mostrou tendências significativas em todas as bacias dos reservatórios ao passo que o MRI-ESM2-0 mostrou para a maioria (à

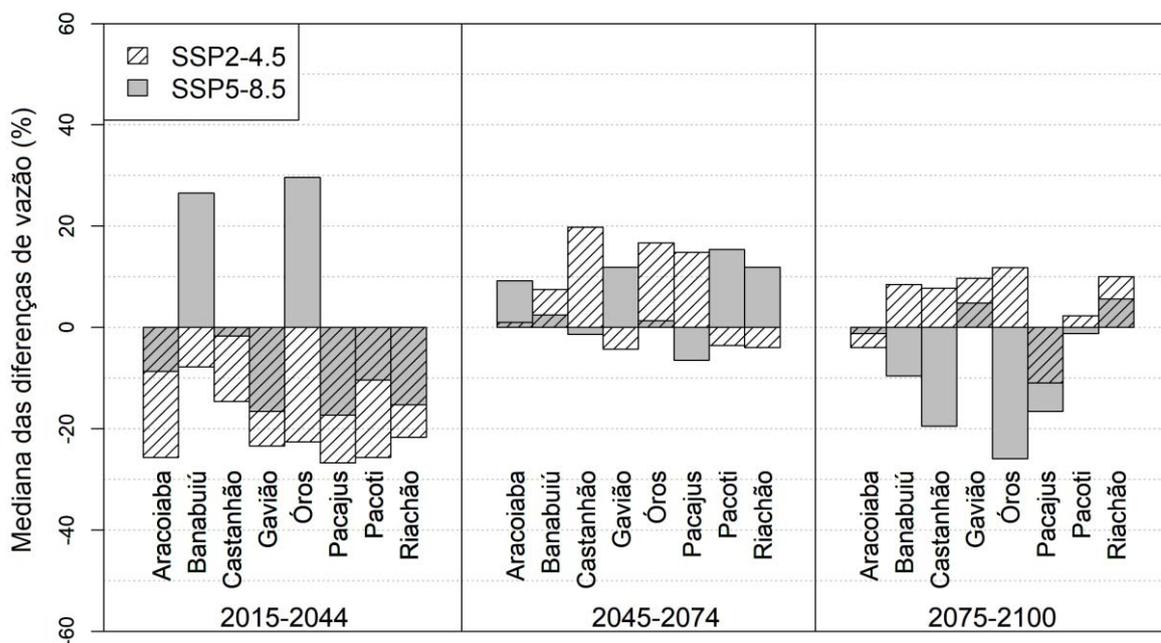
exceção de Pacajus).

Comparado ao cenário SSP2-4.5, os módulos das tendências negativas se apresentaram pronunciados, revelando uma possível intensificação quanto à redução do regime de precipitações médias anuais nas bacias estudadas. A maior redução foi apontada pelo modelo BCC-CSM2-MR em Riachão, com magnitude de até 3,79 mm/ano correspondendo a uma diminuição de cerca de 300 mm ao longo de 85 anos. Ainda no cenário mais pessimista, o MIROC6 foi o modelo com maior indicativo de ausência de tendência em sete das oito bacias analisadas.

4.3.2.2 Vazão

A Figura 31 mostra a mediana das diferenças entre a vazão média anual futura e a histórica do conjunto de modelos do CMIP6 nos períodos de 2015 a 2044, 2045 a 2074 e 2075 a 2100, para Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Óros, Pacajus, Pacoti e Riachão nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Figura 29 - Mediana (%) das diferenças entre a vazão média anual futura e a histórica do conjunto de modelos do CMIP6 para Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Óros, Pacajus, Pacoti e Riachão para os cenários SSP2-4.5 (barra hachurada) e SSP5-8.5 (barra em cor cinza).



Fonte: Elaborada pelo autor.

No primeiro período, o conjunto de modelos indicaram uma maior possibilidade de redução nas vazões para a maioria das bacias e em ambos cenários, com destaque para SSP2-

4.5 que revelou reduções superiores a 20% com destaque para Aracoiaba, Pacajus e Pacoti. Banabuiú e Orós, particularmente, indicaram o aumento da vazão com valores superiores a 26,5% para o cenário mais pessimista.

No segundo período, o conjunto apontou o acréscimo nas vazões para a maioria das bacias, sugerindo nos dois cenários vazões superiores à média em até 20% com destaque para o Castanhão no cenário SSP2-4.5, seguido de Orós e Pacajus. Para o SSP5-8.5, Pacoti, seguido de Gavião e Riachão, detiveram as maiores medianas, indicando aumento da vazão acima de 10% da média histórica. O segundo período, em relação aos demais, revela ainda, módulos menos pronunciados das medianas de suas diferenças quanto às reduções observadas.

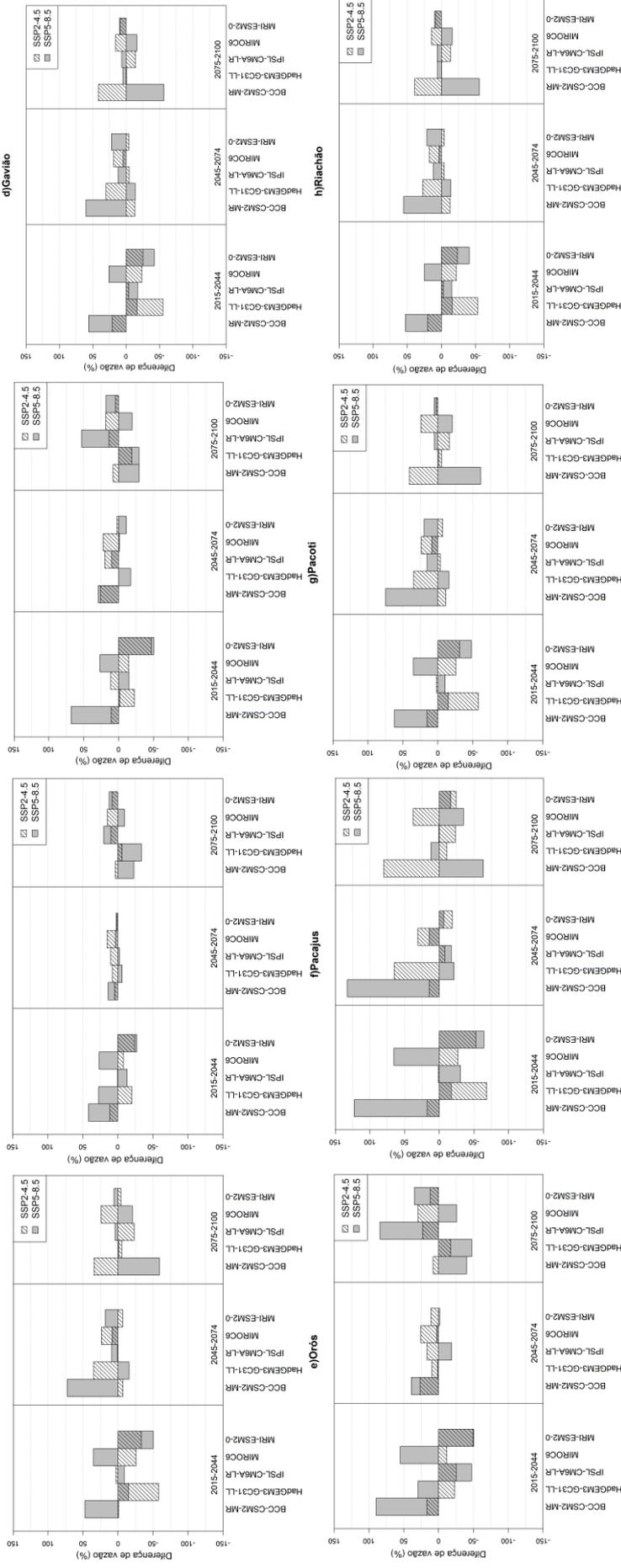
No período de 2075 a 2100 observou-se novamente, assim como na precipitação, uma maior dispersão das medianas entre os cenários, especialmente para Banabuiú, Castanhão e Orós. No cenário SSP2-4.5, a bacia do Orós deteve a maior possibilidade de aumento da vazão média anual, com módulo superior a 10%. Aqui, no geral, as medianas divergem em relação ao impacto e indicam que as vazões tendem a aumentar no SSP2-4.5 e diminuir no SSP5-8.5. De outra forma, projeta-se o aumento das vazões médias anuais em ambos os cenários para Gavião e Riachão e diminuição das mesmas para Aracoiaba e Pacajus.

A Figura 32 mostra as diferenças entre a vazão média anual futura e a histórica para cada um dos modelos do CMIP6, nos períodos de 2015 a 2044, 2045 a 2074 e 2075 a 2100 e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão.

Em todas as bacias, o modelo BCC-CSM2-MR indicou aumento nas vazões médias anuais, no cenário de maior emissão de GEEs para o primeiro e segundo período e no cenário mais otimista para o terceiro período. No período de 2015-2044, o modelo projetou aumentos de aproximadamente 50% na vazão das bacias Aracoiaba, Banabuiú, Gavião, Pacoti e Riachão. Diferenças superiores a 50% foram identificadas em Orós e Castanhão, ao passo que Pacajus projetou o maior impacto de aumento na vazão: 120% acima da média. Para o segundo ciclo de 30 anos, o aumento percentual é superior a 25% na maioria das bacias (à exceção de Banabuiú, que mostrou um menor percentual de aumento). Todavia, as maiores magnitudes foram apontadas em Pacajus (130%) e Aracoiaba e Pacoti (um pouco acima de 50%).

De outra forma, para o primeiro período o modelo MIROC6 acompanhou, com magnitude inferior, o aumento apontado pelo BCC-CSM2-MR. Diferenças de 20 a 50% foram apontadas na maioria das bacias, à exceção de Pacajus que foi ligeiramente superior a esse valor. Para o terceiro período e no cenário SSP5-8.5 MIROC6 indicou reduções nas vazões de até 50% com maior impacto também em Pacajus.

Figura 32 – Diferença (%) entre a vazão média anual futura e a histórica para cada um dos modelos do CMIP6 para (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão para os cenários SSP2-4.5 (barra hachurada) e SSP5-8.5 (barra em cor cinza).



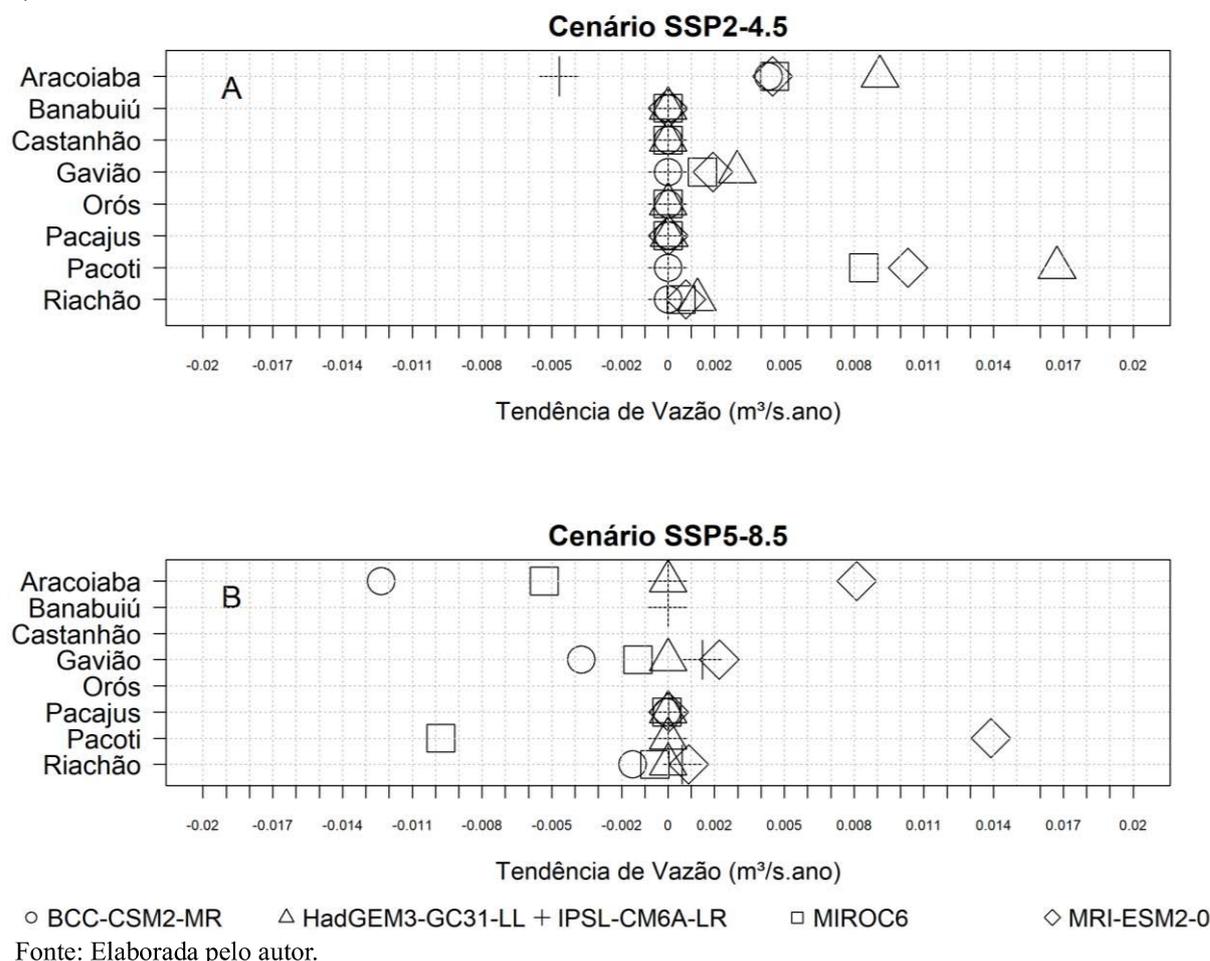
Fonte: Elaborada pelo autor.

Reduções em até 50% nas vazões médias anuais foram apontadas especialmente pelo modelo MRI-ESM2-0 para os dois cenários e no primeiro período. Pacajus mais uma vez mostrou-se com diferenças de magnitudes mais intensas em relação as demais bacias, apontando uma redução superior a 50%.

Banabuiú tem seus modelos mostrando pequenas flutuações em torno da média histórica no período de 2045 a 2074 associadas ao leve aumento no cenário SSP2-4.5 e discretas reduções no cenário SSP5-8.5. Assim como observado para a precipitação, o primeiro e o terceiro período mostraram uma maior divergência em relação ao impacto entre os modelos e entre os cenários considerados, demonstrando incerteza em relação ao futuro das vazões na maioria das bacias.

As Figuras 33(a) e 33(b) mostram a tendência Mann-Kendall Sen da série temporal de vazão, entre o período de 2015 a 2100, projetada pelo CMIP6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente.

Figura 30 - Tendência da vazão ($m^3/s.ano$) para o período de 2015 a 2100 em Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão para os cenários a) SSP2-4.5 e b) SSP5-8.5.



Para o cenário SSP2-4.5, o modelo HadGEM3-GC31-LL se mostrou o mais otimista apontando tendências positivas de até 0,017 m³/s.ano em Pacoti, com um possível aumento do seu regime de vazão de até 1,45 m³/s até o final do século XXI. Em contrapartida, o modelo IPSL-CM6A-LR se mostrou o mais pessimista no cenário de baixas emissões de GEE, com reduções de até 0,005 m³/s.ano (0,42 m³/s até o final do período analisado) em Aracoiaba. De outra forma, no cenário mais pessimista essa tendência de aumento foi observada para o modelo MRI-ESM2-0, com acréscimo de até 0,014 m³/s.ano no Pacoti (1,19 m³/s até 2100).

A maior redução de vazão foi apontada pelo modelo BCC-CSM2-MR em Aracoiaba no cenário SSP5-8.5, indicando uma redução de até 0,012 m³/s.ano (1,02 m³/s até o final do século XXI), seguido do modelo MIROC6 que apresentou tendência negativa de até 0,01 m³/s.ano em Pacoti para o mesmo cenário. Neste, os modelos BCC-CSM2-MR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 mostraram tendências significativas em Aracoiaba, Gavião, Pacajus, Pacoti e Riachão. De outra forma, para estas bacias e para os dois últimos modelos supracitados juntos ao HadGEM3-GC31-LL, identificou-se tendências significativas no cenário SSP2-4.5. Por outro lado, para o cenário com menor emissão de GEEs, o modelo NOAA-GFDL-ESM2M não apresentou significância estatística nas tendências estimadas para as vazões do Banabuiú e Castanhão.

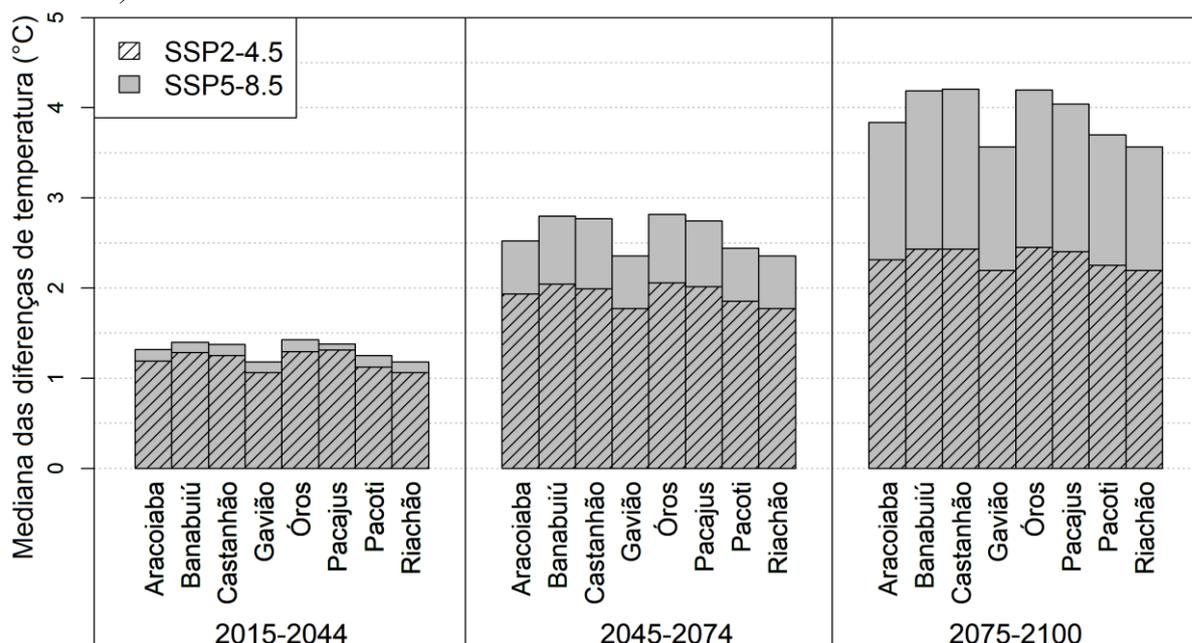
Os modelos IPSL-CM6A-LR e BCC-CSM2-MR não identificaram tendências para a vazão no cenário SSP2-4.5 em sete das oito bacias. Comparado ao cenário SSP2-4.5, os módulos de tendência do SSP5-8.5 se apresentaram pronunciados e com uma maior dispersão entre os modelos. Ainda neste cenário, Orós indicou os maiores módulos de tendência dentre as demais bacias.

4.3.2.3 Temperatura

A Figura 34 mostra as medianas das diferenças entre a temperatura média anual futura e a histórica do conjunto de modelos do CMIP6 nos períodos de 2015 a 2044, 2045 a 2074 e 2075 a 2100, para Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Ambos cenários concordam que a temperatura deve aumentar gradualmente até o final do século XXI em todas as bacias analisadas.

Figura 31 - Medianas (°C) das diferenças entre a temperatura média anual futura e a histórica do conjunto de modelos do CMIP6 para Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão para os cenários SSP2-4.5 (barra hachurada) e SSP5-8.5 (barra em cor cinza).

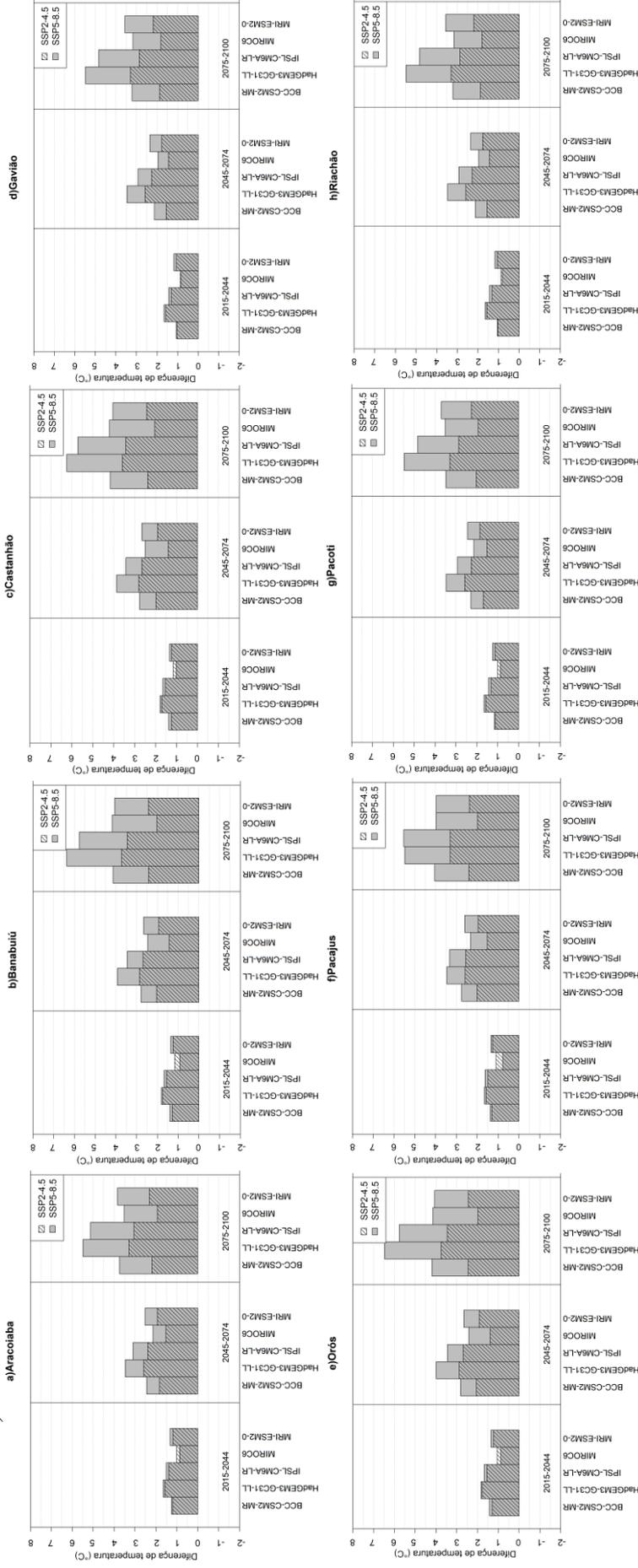


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o cenário SSP5-8.5, os impactos na temperatura são maiores, principalmente no último período analisado, onde as diferenças de temperaturas são superiores a 3,5 °C. Na figura acima é possível ainda observar que, para o primeiro período a mediana das anomalias de temperatura permaneceu em torno de aproximadamente 1,0 °C nos dois cenários. No segundo período (2045–2074), as medianas intensificaram-se detendo, aproximadamente, 2 °C no SSP2-4.5 e entre 2,5 e 3,0 °C no SSP5-8.5. Em todos os períodos analisados as bacias Banabuiú, Castanhão e Orós detiveram os maiores valores.

A Figura 35 mostra as diferenças entre a temperatura média anual futura e a histórica para cada um dos modelos do CMIP6, nos períodos de 2015 a 2044, 2045 a 2074 e 2075 a 2100 e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão.

Figura 32 – Diferença (°C) entre a temperatura média anual futura e a histórica para cada um dos modelos do CMIP6 para as bacias (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão para os cenários SSP2-4.5 (barra hachurada) e SSP5-8.5 (barra em cor cinza).

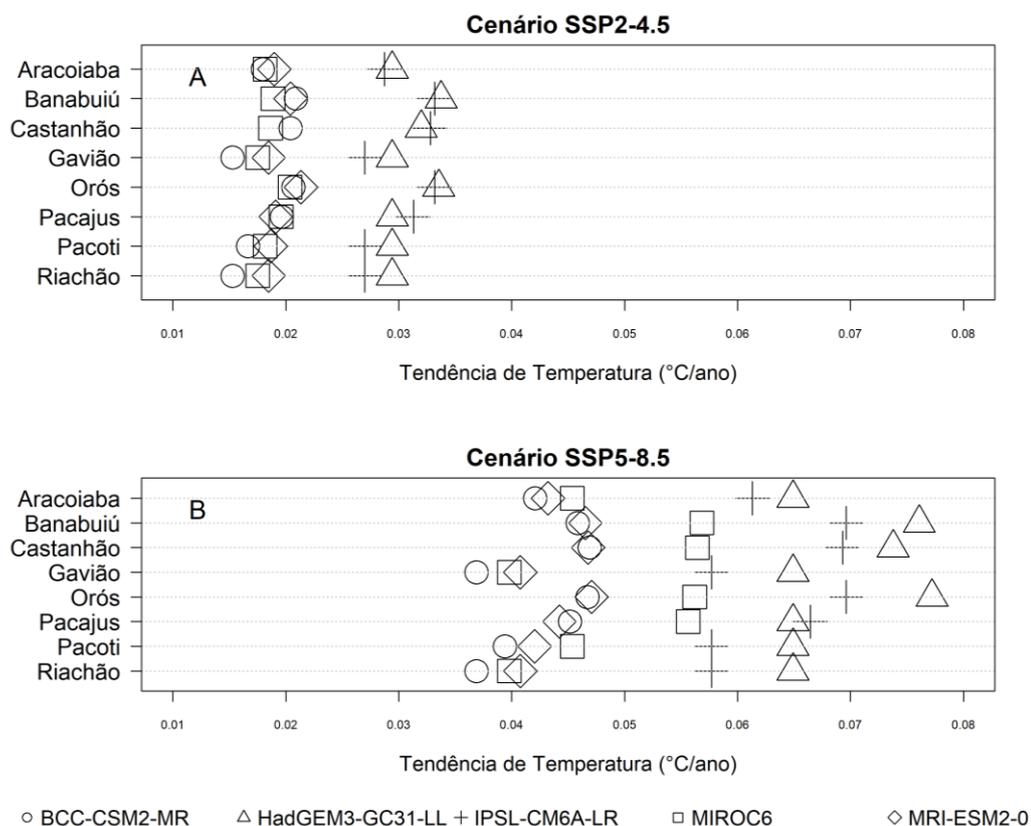


Fonte: Elaborada pelo autor.

Em todas as bacias, os modelos convergiram quanto ao aumento da temperatura para os três períodos considerados e para os dois cenários analisados. Todavia, observou-se a intensificação das anomalias no último período e para o cenário de maior emissão de GEEs. Neste, o modelo HadGEM3-GC31-LL projetou o maior impacto de aumento na temperatura em sete das oito bacias, destacando um aumento de até 6 °C em Banabuiú e Castanhão e um pouco acima de 6 °C em Orós, no último ciclo de 30 anos. Em Pacajus, a maior diferença foi apontada pelo IPSL-CM6A-LR seguido do HadGEM3-GC31-LL, com valores superiores a 5 °C. Contudo, o modelo HadGEM3-GC31-LL, seguido do IPSL-CM6A-LR, projetou o maior impacto de aumento de temperatura em todas as bacias, para os dois cenários e para os demais períodos.

As Figuras 36(a) e 36(b) mostram a tendência Mann-Kendall Sen da série temporal de temperatura, entre o período de 2015 a 2100, projetada pelo CMIP6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente.

Figura 33 - Tendência da temperatura (°C ano⁻¹) para o período de 2015 a 2100 em Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão para os cenários a) SSP2-4.5 e b) SSP5-8.5.



Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com o teste de Mann-Kendall-Sen realizado, todos os modelos do CMIP6 apresentaram tendência positiva significativa para a variável temperatura e para ambos os cenários em todas as bacias. Considerando os dois cenários, o modelo BCC-CSM2-MR projetou as menores magnitudes de tendência da variável nas bacias Aracoiaba, Gavião, Pacoti e Riachão, com valores entre 0,01 e 0,02 °C, ao passo que o modelo HadGEM3-GC31-LL projetou as maiores tendências de aquecimento na maioria das bacias dos reservatórios, com valores superiores a 0,06 °C (à exceção de Castanhão e Pacajus no SSP2-4.5 e de Pacajus no SSP5-8.5, em que o modelo IPSL-CM6A-LR apontou o maior aquecimento).

Banabuiú, Orós e Castanhão destacaram-se com tendências de aumento superiores a 0,03 °C e 0,07 °C ao ano revelando incrementos de aproximadamente 2,5 °C e 6,0 °C até o final do século XXI nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente. Tomando o cenário que destaca o aumento das emissões dos GEEs, SSP5-8.5, notaram-se tendências com módulos superiores ao cenário SSP2-4.5.

4.4 CONCLUSÃO

Este capítulo avaliou a representação dos padrões de variação da precipitação, vazão e temperatura a partir de dados provenientes dos modelos participantes do projeto CMIP6 em relação aos dados observados oriundos do GPCC e CRU, bem como as análises das projeções e seus possíveis impactos associados com as mudanças climáticas considerando os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 nas oito bacias que constituem o hidrossistema Jaguaribe.

Na análise da avaliação dos modelos do CMIP6 para a precipitação, aqueles tiveram para a maioria das bacias seus padrões simulados concordando moderadamente com as observações, o que foi constatado pelos coeficientes de correlação $0,5 \leq R \leq 0,7$. Mas de forma satisfatória quanto às métricas de erro e dispersão, destacaram-se os modelos HadGEM3-GC31-LL e IPSL-CM6A-LR. No geral, considerando o conjunto das métricas analisadas, o modelo IPSL-CM6A-LR mostrou-se com melhor desempenho.

Quanto ao período histórico, os modelos MIROC6 e MRI-ESM2-0, apontaram para a maioria das bacias um maior quantitativo de precipitações discrepantes. No geral, HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 mostraram-se mais regulares quanto a distribuição dos totais anuais de precipitação, sugerindo uma menor susceptibilidade a desvios a partir destas fontes. Quanto à sazonalidade, observou-se uma maior convergência quanto a quantidade precipitada pelos modelos e os dados observados nos meses de agosto a outubro, o que pode estar associado ao período seco no Estado. No período chuvoso, a sazonalidade não foi bem representada pelo conjunto de modelos, especialmente em Aracoiaba, Gavião, Pacajus, Pacoti e Riachão que apontaram as maiores divergências entre os modelos quanto à quantidade precipitada nos meses de janeiro a abril. Ainda neste período, o modelo que melhor representou os padrões observados, embora subestimando-os na maioria das bacias, foi o IPSL-CM6A-LR. De outra forma, o modelo HadGEM3-GC31-LL teve a pior representação da sazonalidade climatológica quanto a série observada e até mesmo em relação aos demais modelos.

A partir do teste de Mann-Kendall Sen e da análise das diferenças entre clima futuro e clima presente, identificou-se o aumento significativo da temperatura como um dos impactos das mudanças climáticas para todas as bacias analisadas seguindo a tendência global. Ambos cenários concordam que a temperatura deve aumentar gradualmente até o final do século XXI. A partir dos métodos supracitados, projetou-se no cenário SSP5-8.5 uma tendência de aquecimento em cerca de 6 °C, apontado pelo modelo HadGEM3-GC31-LL e com destaque para as maiores bacias do hidrossistema: Banabuiú, Castanhão e Orós. Os modelos HadGEM3-

GC31-LL e IPSL-CM6A-LR seguiram projetando o aumento da temperatura para as demais bacias e em ambos os cenários.

Todavia, os modelos demonstraram incerteza em relação ao futuro das precipitações e vazões. O conjunto de modelos apontou, através da análise da mediana, a redução da precipitação e vazão em todas as bacias no período de 2015 a 2044 no cenário SSP2-4.5, o aumento da precipitação em seis das oito bacias para ambos os cenários e flutuações em torno da média histórica em duas das oito bacias para o cenário SSP5-8.5 no período de 2045 a 2074. Cinco das oito bacias concordaram no aumento da precipitação no último período e para os dois cenários. Na análise individual dos modelos, o BCC-CSM2-MR indicou as reduções mais significativas das precipitações médias anuais no SSP5-8.5 e no último período. A maior redução foi apontada em Riachão correspondendo a uma diminuição de cerca de 300 mm até o final do século XXI. Ainda sob a ótica deste cenário, é importante ressaltar que o referido modelo mostrou tendências significativas em todas as bacias.

Na análise das medianas, constatou-se uma divergência quanto ao sinal das anomalias percentuais anuais indicando que as vazões tendem a aumentar no SSP2-4.5 e diminuir no SSP5-8.5, considerando o período de 2075 a 2100. Em todas as bacias, o modelo BCC-CSM2-MR indicou aumento nas vazões médias anuais, no cenário SSP5-8.5 de 2015 a 2074 e no SSP2-4.5 para o terceiro período. O maior impacto de aumento na vazão foi apontado a curto e médio prazo em Pacajus, com projeções de cerca de 120% acima da média histórica. O modelo supracitado também apontou a maior tendência de redução dentre os demais modelos, indicando uma redução de até 1,02 m³/s até o final do século em Aracoiaba e no cenário SSP5-8.5, com significância estatística.

A investigação do desempenho dos modelos individuais do CMIP6 sugeriu que a habilidade dos modelos geralmente varia de modelo para modelo em escalas espaciais. A dificuldade em atribuir discrepâncias em conjuntos de dados de modelos individuais pode ser devido às diferenças sistemáticas na representação dos processos hidrológicos, uma vez que o processo é vital, principalmente na formação da precipitação e vazão. Pode-se inferir do presente estudo que nenhum modelo exibe todas as características dos conjuntos de dados observacionais. Em suma, os modelos com as melhores performances estatísticas neste estudo foram: IPSL-CM6A-LR; HadGEM3-GC31-LL e BCC-CSM2-MR. As discrepâncias nas simulações dão espaço para melhorias dos modelos em suas próximas versões. Os resultados oferecem informações úteis sobre as variáveis analisadas e podem servir de referência para uma nova geração de modelos climáticos e seus experimentos.

Em suma, as maiores implicações da mudança climática são projetadas para as últimas três décadas do século XXI no cenário de altas emissões de GEE, o que requer esforços de mitigação. Conflitos entre múltiplos usuários da água, desaceleração da economia e o desabastecimento das cidades são alguns dos possíveis impactos decorrentes da elevação da temperatura do ar agravada pela redução na precipitação e aliada a possível redução da disponibilidade hídrica nas bacias estudadas. Partindo disto, é recomendável o gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos com o intuito de intensificar ações de mitigação e garantir a segurança hídrica, já que se trata de uma região com clima semiárido.

5 IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO SISTEMA JAGUARIBE-METROPOLITANO

5.1 INTRODUÇÃO

No Nordeste Brasileiro (NEB), onde está situada grande parte da região semiárida brasileira, o armazenamento de água é um importante fator para garantir a sobrevivência nesta região (ANA, 2019). Segundo Muniz *et al.* (2017), o Estado do Ceará tem a maior parte do seu território classificado com clima tropical com inverno seco e semiárido (Köppen; Thornthwaite, 1977). Como consequência, a mesma sofre com altas taxas de evaporação e irregularidades das chuvas, o que influencia significativamente nas eficiências dos seus reservatórios superficiais que são, em sua maioria, intermitentes (Collischonn; Clarke, 2016; Toledo; Araújo; Almeida, 2014; Campos *et al.*, 2001). Todavia, são esses reservatórios superficiais a principal fonte de abastecimento para múltiplos usos da água no Estado (Lima; Mamede; Neto, 2018; Campos *et al.*, 2003).

Quando se propõe um modelo de gestão de recursos hídricos, os usos múltiplos da água são apontados pelas legislações federal e estadual como um dos princípios orientadores. Esses usos se caracterizam a partir dos diversos interesses que provêm de diferentes usuários, o que propensa a ocorrência de conflitos (Saboia; Silva, 2014). Nesse sentido, avaliar como as mudanças climáticas afetará o equilíbrio entre a demanda e a disponibilidade de água constitui um grande desafio para a gestão de recursos hídricos, uma vez que é necessário considerar todo o conjunto de usos de água socialmente valorizados e como se dará a mudança quanto à alocação de água entre esses usos. As instituições que governam essa alocação desempenham um grande papel na determinação dos impactos sociais gerais provenientes de uma mudança na disponibilidade de água, bem como na distribuição de ganhos e perdas entre os diferentes setores da sociedade.

Mudanças na disponibilidade de água dependem de mudanças no volume, variabilidade e sazonalidade do escoamento, conforme modificado pela operação da infraestrutura de controle de água existente. O Estado do Ceará, por exemplo, possui mais de 80% dos seus municípios inseridos no semiárido brasileiro, e devido a isso construiu uma rede de reservatórios de acumulação de água de forma a atender as demandas de múltiplos usuários, inclusive garantir o abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF): o sistema Jaguaribe-Metropolitano.

Além disso, a quantidade de água não é a única variável importante. Mudanças na

qualidade e na temperatura da água também podem ter impactos substanciais nos valores de uso urbano, industrial e agrícola, bem como nos ecossistemas aquáticos. Para usos urbanos de água, a degradação da qualidade da água pode aumentar substancialmente os custos de purificação. O aumento da intensidade da precipitação pode resultar periodicamente em aumento da turbidez e aumento do conteúdo de nutrientes e patógenos das fontes de água de superfície (Miller; Yates, 2006).

Mauro (2014) e Pereira (2017), destacam que de modo a assegurar a multiplicidade dos usos do recurso hídrico de forma racional e eficiente, é necessário preocupar-se com o quesito qualidade e manter o equilíbrio entre as quantidades disponível e demandada nas respectivas bacias hidrográficas. A avaliação quantitativa de quanto pode ser utilizado e de que forma se dará a prioridade de uso ao realizar-se as alocações do recurso, é possível através do cenário do balanço hídrico entre a água disponível e sua respectiva demanda (Rocha; Khoury; Damasceno, 2018; Rossi; Santos, 2018).

Nos últimos anos, alguns estudos foram realizados incorporando as mudanças climáticas a cenários de oferta e demanda para reservatórios que compõem o Sistema Jaguaribe-Metropolitano. Fernandes *et al.* (2019), por exemplo, avaliaram o impacto dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 do 5º Relatório de Avaliação (AR5) de mudanças climáticas do IPCC na disponibilidade hídrica dos reservatórios do Castanhão, Orós e Banabuiú para os períodos de 2040-2069 e 2070-2099. Os resultados indicaram uma tendência de redução nas projeções de vazão afluente e regularizada e de aumento nas taxas de evaporação (este pode alcançar, especialmente, até 7,6% no Castanhão – de 2070-2099, no cenário RCP8.5), o que sinaliza o agravamento da deficiência hídrica para o futuro nos reservatórios supracitados. Os autores relataram ainda que, a redução em relação ao cenário base (1961-1990) pode ser superior a 20% em 37,5% das projeções de vazão regularizada.

Cid *et al.* (2019) avaliaram o impacto das mudanças climáticas no Sistema Jaguaribe-Metropolitano, no contexto da segurança hídrica, no período de 2011 a 2040 para três MCGs: BCC-CSM1.1, HadGEM2-AO e MIROC5 no cenário RCP4.5 em três cenários de oferta e demanda combinando diferentes variações no consumo de água e mudanças no regime de vazões. O sistema de abastecimento se mostrou bastante vulnerável nos cenários presente e futuro. O cenário presente, que considerou as demandas e vazões do período presente, apontou o sobrecarregamento do sistema com demandas em condições normais. No cenário que considerou demandas com crescimento de 26% na RMF e 1% ao ano nas bacias do Jaguaribe e utilizou vazões para forçante radioativa RCP4.5, os autores constataram o agravamento das falhas supramencionadas identificadas em outros cenários, principalmente na região

Jaguaribana.

Outros estudos avaliaram os impactos decorrentes das mudanças climáticas na disponibilidade e demanda hídrica em regiões que englobam reservatórios pertencentes ao Sistema Jaguaribe-Metropolitano, como os de Gondim *et al.* (2018), Cid (2017) e Fernandes *et al.* (2017), que também utilizaram dados fornecidos pelos MCGs do CMIP5. Embora alguns estudos tenham apresentado divergências em seus resultados, a maioria identificou aumentos nas perdas por evaporação e redução nas vazões. Como apresentado, as mudanças climáticas provavelmente irão alterar os usos desejados da água (demandas), bem como os usos reais (demandas em cada setor que são efetivamente atendidas). Além disso, Marengo (2009) afirma que o NEB é uma das regiões mais suscetíveis aos impactos das mudanças climáticas, uma vez que apresenta problemas de escassez relativa da água.

Se a mudança climática resulta em maior escassez de água em relação à demanda, a adaptação pode incluir mudanças técnicas que melhoram a eficiência do uso da água e gestão da demanda e mudanças institucionais que melhoram a comercialização dos direitos da água. Leva tempo para implementar essas mudanças, portanto, é provável que se tornem mais eficazes com o passar do tempo. Assim, estudos que envolvem processos hidrológicos em bacias hidrográficas é de grande importância para o sistema de gestão que precisa adotar estratégias de adaptação, oferecendo informações que possibilitam a antecipação da capacidade de resposta, principalmente em regiões que, naturalmente, possuem grande variabilidade pluviométrica e, ao longo dos anos, vem sofrendo com períodos prolongados de estiagem – como é o caso do NEB (Olmstead, 2014).

Gondim *et al.* (2019) afirmam que as mudanças climáticas causam impactos nas vazões e na recarga de aquíferos, mas com implicações variando regionalmente e entre diferentes cenários. Nesse sentido, diferente do que já foi reportado na literatura nos estudos supracitados, este capítulo utilizou dados mais recentes provenientes dos MCGs do CMIP6 com o objetivo de avaliar o impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica de todo o sistema Jaguaribe-Metropolitano nos períodos presente e futuro (curto, médio e longo prazo) para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, considerando o possível crescimento da demanda hídrica nos cenários futuros.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais e métodos empregados neste capítulo são descritos nos seguintes itens: (i) região de estudo, (ii) dados utilizados de oferta e demanda, (iii) descrição do sistema de suporte a decisão utilizado (SIGA) e (iv) cenários de oferta e demanda adotados. Os próximos tópicos dissertam sobre os pontos supracitados (5.2.1, 5.2.2, 5.2.3 e 5.2.4).

Neste capítulo, o estudo foi realizado para o hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano completo, considerando seus oito reservatórios que, juntos, somam aproximadamente 11.000 hm² de capacidade de acumulação. Localizado no centro-nordeste do Estado do Ceará, o sistema é composto pelos reservatórios do Banabuiú, Castanhão e Orós – que fazem parte da grande Bacia do Jaguaribe – e pelo Gavião, RHBM, Pacajus e Aracoiaba – que, por sua vez, fazem parte da grande Bacia Metropolitanas. A Figura 19 mostrada no capítulo 3 apresentou o mapa de localização do sistema Jaguaribe-Metropolitano.

5.2.1 Dados utilizados

5.2.1.1 Oferta

A coleta de dados relacionados à disponibilidade de água visou compreender a estrutura do sistema de abastecimento. As subseções seguintes fornecerão informações sobre as vazões de entrada nos reservatórios, as taxas de evaporação e os níveis máximos e mínimos de todos os reservatórios que integram o sistema Jaguaribe-Metropolitano.

5.2.1.1.1 Vazões

As vazões afluentes aos reservatórios para o cenário futuro foram calculadas a partir do modelo SMAP (que já teve sua metodologia descrita na seção 4.2.2.1 do capítulo 4), considerando os parâmetros adotados e apresentados no relatório de Cálculo das Afluências aos Reservatórios Estratégicos do Ceará (COGERH, 2022). Para o cenário histórico, considerou-se a série de vazões oficiais do estado disponibilizados também pela COGERH (2022).

Os MCGs considerados são os mesmos descritos na seção 4.2.2.2, para os cenários de forçante radiativa SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e para o período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050, sendo, portanto: BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0.

5.2.1.1.2 Evaporação e Cota-Área-Volume

Para a ETP correspondente ao período presente, utilizou-se as Normais Climatológicas obtidas a partir do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), tomando os valores da estação mais próxima ao reservatório. Quanto a ETP para os cenários futuros, esta foi calculada empregando-se o Método de Hargreaves-Samani descrito na seção 4.2.2.1.

Os dados de Cota-Área-Volume (CAV) foram disponibilizados pela FUNCEME, por meio de comunicação via e-mail, e utilizou-se a mesma relação de cada reservatório em todos os cenários modelados.

5.2.1.1.3 Volumes máximos e mínimos

A Tabela 12 apresenta as informações de capacidade de acumulação (volume máximo) e volume mínimo de cada reservatório, que são inseridas pelo usuário no processo de entrada de dados.

Tabela 12 - Volumes máximos e mínimos dos reservatórios que compõe o Sistema Jaguaribe-Metropolitano.

Reservatório	Volume Máximo (hm³)	Volume Mínimo (hm³)
Aracoiaba	162	0
Banabuiú	1.534	0,18
Castanhão	6.700	60
Gavião	33,3	27,40
Orós	1.940	16,87
Pacajus	232	2
Pacoti	380	9
Riachão	47,92	15,75

Fonte: FUNCEME (2022).

5.2.2 Demandas

Os valores de demanda estática (e que serão utilizadas nos cenários históricos) foram obtidos com base no estudo realizado por Cid (2017), que os coletou junto a Gerência de Operação da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos em setembro de 2016. As demandas foram estimadas considerando um período sem escassez hídrica, adotando, portanto, o ano base 2015. Para os cenários futuros, serão adotadas as demandas obtidas pelo modelo de crescimento exponencial ETS, calculadas no capítulo 3.

A demanda total do Sistema Jaguaribe-Metropolitano soma 42,3 m³/s, concentrando

69% (29,1 m³/s) na Bacia do Jaguaribe e o restante (13,2 m³/s) na RMF (CID, 2017). A Tabela 13 apresenta as demandas hídricas totais, em m³/s, por estrutura física de fornecimento de água do sistema supracitado e a Tabela 14 apresenta as demandas de referências para o Sistema Jaguaribe-Metropolitano dos seus principais centros de demandas e seus setores usuários categorizados em: Abastecimento Humano (AH); Abastecimento Urbano (AU); Irrigação Temporária e Permanente (IRR); Carcinicultura (C); Indústria (IND); Dessedentação Animal (ANI) e Consumo Difuso e Ambiental (P).

Tabela 13 - Valores totais de demanda hídrica (m³/s), por estrutura física de fornecimento de água, do Sistema Jaguaribe-Metropolitano.

Estrutura física	Demanda (m³/s)
Castanhão	14,5
Orós	5,93
Banabuiú	6,41
Eixão das Águas	1,22
Canal do Trabalhador	1,07
Aracoiaba	0,53
Pacajus	0,58
RHBM	0,40
Gavião	11,63

Fonte: Adaptado de CID (2017).

Tabela 14 - Valores das demandas de referência (m³/s) referentes aos centros de demanda, por estrutura física de fornecimento de água, do Sistema Jaguaribe-Metropolitano.

Infraestrutura de Abastecimento	Tipo de Uso	Centro de Demanda	Demanda (m³/s)
Castanhão	AH	Abastecimento Humano	0,58
	ANI	Dessedentação Animal	0,01
	C	Carcinicultura	0,91
	IRR	FAPIJA	3,66
	IRR	Arroz Outorgado (401 ha - 1,5 l/s)	0,60
	IRR	Arroz Não Outorgado (1.338 ha - 1,5 l/s)	2,01
	IRR	Capim Inundação Outorgado (214 ha - 1,4 l/s)	0,30
	IRR	Capim Inundação Não Outorgado (286 ha - 1,4 l/s)	0,40
	IRR	Cana de Açúcar (2.349 ha - 0,97 l/s)	2,28
	IRR	Culturas Permanentes	0,88
	IRR	Culturas Temporárias	1,77
	P	Perdas em trânsito	1,10
	Orós	AH	Feiticeiro
AH		Jaguaribe	0,10
AH		Lima Campos	0,05
AH		Jaguaretama	0,03
AH		Montante Orós	0,03
IRR		Montante Orós	0,27
IRR		Alagamar	0,10
IRR		Feiticeiro Difuso	0,49
IRR		Lima Campos (Culturas Permanentes)	0,80
IRR		Lima Campos (Culturas Temporárias)	1,15
P		Difuso e Perdas em trânsito	2,90
Banabuiú	AH	Banabuiú	0,02
	AH	Ibicuitinga	0,03
	AH	Zona Rural	0,02
	ANI	PROMOVALE	0,01
	IRR	PROMOVALE (Culturas Permanentes)	0,69
	IRR	PROMOVALE (Culturas Temporárias)	0,20
	IRR	PIMN (Culturas Permanentes)	0,86
	IRR	PIMN (Culturas Temporárias)	1,92
	IRR	DISTAR (Culturas Permanentes)	2,20
	IRR	DISTAR (Culturas Temporárias)	0,45
Eixão das Águas	AH	Morada Nova	0,10
	AH	Trecho 3	0,15
	AH	Trecho 4	0,01
	ANI	Dessedentação Animal	0,00
	IND	Indústria Betânia	0,01
	IRR	Culturas Permanentes (<5 ha)	0,04
	IRR	Culturas Temporárias (<5 ha)	0,02
	IRR	Xique-Xique (Culturas Permanentes)	0,08
	IRR	Mandacaru (Culturas Permanentes)	0,23
	IRR	AgropEsperança (Culturas Permanentes)	0,14
	IRR	AgropEsperança (Culturas Temporárias)	0,05
	IRR	Boa Esperança (Culturas Permanentes)	0,04
	IRR	Itaueiras (Culturas Temporárias)	0,02
	IRR	Rudolf (Culturas Temporárias)	0,08
	P	Trecho 3	0,27
Canal do Trabalhador	AU	Abastecimento Humano	0,12
	ANI	Dessedentação Animal	0,05
	IRR	Aquino (Culturas Permanentes)	0,05
	IRR	Morgado (Culturas Permanentes)	0,03
	IRR	Itaueiras (Culturas Temporárias)	0,50
	IRR	Difusa (< 5 ha)	0,32

Aracoiaba	AU	Montante Aracoiaba	0,18
	IRR	Jusante Aracoiaba	0,35
Pacajus	AU	CAGECE: Beberibe e Cascavel	0,40
	IND	Bermas	0,03
	IND	Sucos Jandaia	0,02
	IND	Distrito Industrial de Pacajus	0,14
RHBM	AU	CAGECE: Pacajus, Horizonte e Chorozinho	0,25
	AU	CAGECE: Itaitinga	0,03
	IND	AMBEV	0,12
Gavião	AU	ETA GAVIÃO: Fortaleza, Maracanaú e Eusébio	8,80
	AU	EB GAVIÃO I: Maranguape (sede), Pacatuba (sede), Pavuna e Jereissati	0,20
	IND	EB GAVIÃO I: Kaiser, Marisol e Dakota	0,09
	AU	ETA OESTE: Fortaleza e Caucaia	1,00
	IND	EB GAVIÃO II: Distrito Industrial de Maracanaú	0,21
	IND	Complexo Industrial do Porto do Pecém (CIPP)	1,33

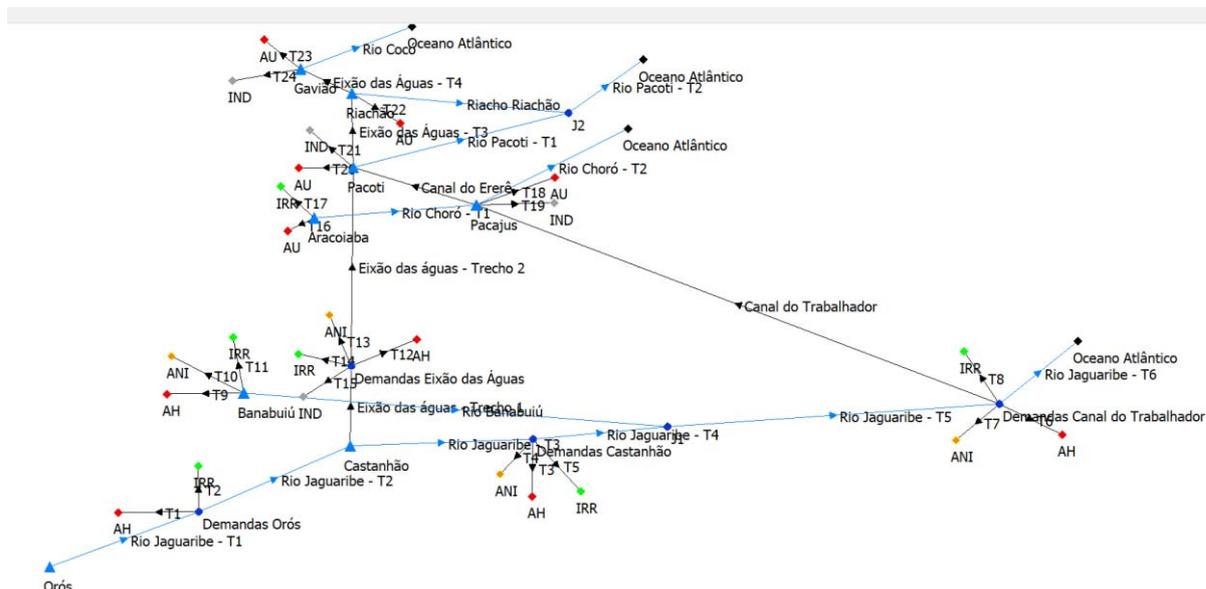
Fonte: Adaptado de CID (2017).

5.2.3 Sistema de Informação para Gerenciamento da Alocação de Água (SIGA)

Reunindo modelos e ferramentas em uma plataforma computacional, o SIGA tem como objetivo auxiliar na tomada de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos. É constituído por módulos integrados e baseia-se na programação orientada objeto (FUNCEME, 2020). Este estudo utilizou sua versão mais recente disponibilizada pela FUNCEME: Versão 2.0.23.

No processo de modelagem do SIGA, a primeira etapa corresponde ao desenho da rede que representa o sistema hídrico que se pretende simular. A rede é representada visualmente através de nós e trechos, os quais correspondem, respectivamente, a pontos de armazenamento ou não de água – podendo representar pontos de início ou junção de trechos, bem como pontos de demanda ou de armazenamento e acumulação de água, como lagos, reservatórios, bacias, entre outros – e linhas de fluxo na rede hídrica responsável por ligar os nós e que possuem capacidade de acumulação de água, como, por exemplo, rios, córregos, adutoras, transferência de bacias, retorno de vazão, retiradas, etc. A Figura 37 ilustra a esquematização da rede gerada no programa SIGA correspondente ao Sistema Jaguaribe-Metropolitano.

Figura 34 - Desenho esquemático da rede de fluxo do Sistema Jaguaribe-Metropolitano.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Construída a rede, os próximos passos consistem em carregar as informações hidrológicas no banco de dados e operar o sistema. No SIGA, essa operação é realizada através do balanço de massa (Equação 41) que se baseia nos parâmetros físicos da rede e na base de dados correspondente.

$$V_{t+1}(i) = V_t(i) + Va_t(i) - Vd(i) - Vv(i) + (Pv_t - Ev_t) \frac{A_t + A_{t+1}}{2} + \sum_{j=N_i} Vv_t(j) \quad (41).$$

em que v_t é o volume no tempo t (mês), v_{t+1} é o volume no tempo t (mês) + o volume do próximo mês, v_i é o volume armazenado no reservatório no tempo inicial da simulação, Va é o volume afluente ao reservatório, Vd é o volume regularizado, Vv é o volume vertido pelo reservatório, A é a área superficial do espelho d'água do reservatório, Ev é a lâmina d'água que evapora a partir da superfície, Pv é a lâmina d'água que precipita na superfície do reservatório, t é o índice que representa a discretização temporal, (i) é o índice que representa o reservatório em análise do sistema e N_i é o conjunto de reservatórios imediatamente a montante do reservatório i .

A equação 39 deve seguir a restrição $V_{\min}(i) \leq V_{t+1}(i) \leq V_{\max}(i)$. Essa restrição estabelece que as liberações só são possíveis quando o volume V_{t+1} no instante (i) for maior que o volume mínimo (V_{\min}), ou seja, o reservatório não libera abaixo do volume mínimo. A outra restrição estabelece também que o volume V_{t+1} no instante (i) , não pode ser maior que o

volume máximo (V_{\max}), no mesmo instante (i). Assim, após o balanço, o reservatório não terá um volume maior que o volume máximo.

O balanço hídrico supracitado pode ser realizado de duas formas: simulação por (i) regra ou (ii) prioridade. Este trabalho irá descrever somente a simulação por prioridade, uma vez que será o tipo adotado neste estudo. Mais informações sobre a simulação por regra, ver FUNCEME (2020).

Na simulação por prioridade, o usuário pode definir as prioridades de cada demanda e de que forma o reservatório irá realizar a alocação de cada uma, uma vez que as demandas apresentam níveis de prioridade de acordo com a sua natureza (humana, animal, agrícola, etc.) e/ou origem (local, por exemplo). As formas disponibilizadas são: prioridade única e zonas de prioridade. A primeira é definida pelo usuário para cada elemento da rede e pode ser aplicada às demandas e reservatórios. A segunda forma só é válida para reservatórios, onde a prioridade inferior só é atendida pelo reservatório se, somente se, a demanda de prioridade superior for atendida.

Em suma, o usuário atribui valores às prioridades de cada demanda numerando-as entre 1 e 99, de forma a percorrer a rede a um custo mínimo durante a simulação. Isso significa que, o ponto de demanda de prioridade 1 possui um custo menor do que o ponto da demanda de prioridade 99. Assim, o algoritmo do programa irá percorrer toda a rede de forma a atender as demandas a um custo mínimo, ou seja, atender as demandas prioritárias. Neste trabalho, foi aplicado a Prioridade Única para as demandas individuais do sistema Jaguaribe-Metropolitano enquanto a Zona de Prioridades foi gerada automaticamente para os reservatórios. A Tabela 15 mostra as prioridades⁵ definidas para cada demanda de acordo com sua natureza.

Tabela 15 - Classificação de prioridades definidas para as demandas do sistema Jaguaribe-Metropolitano.

Demanda	Prioridade
Abastecimento Humano (AH)	1
Dessedentação Animal (ANI)	2
Irrigação (IRR)	3
Indústria (IND)	4

Fonte: Elaborada pelo autor.

⁵ A ordem de prioridade foi escolhida com base no Art.1 da Lei 9.433/97.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Simulação no SIGA utilizando dados observacionais para o século XX

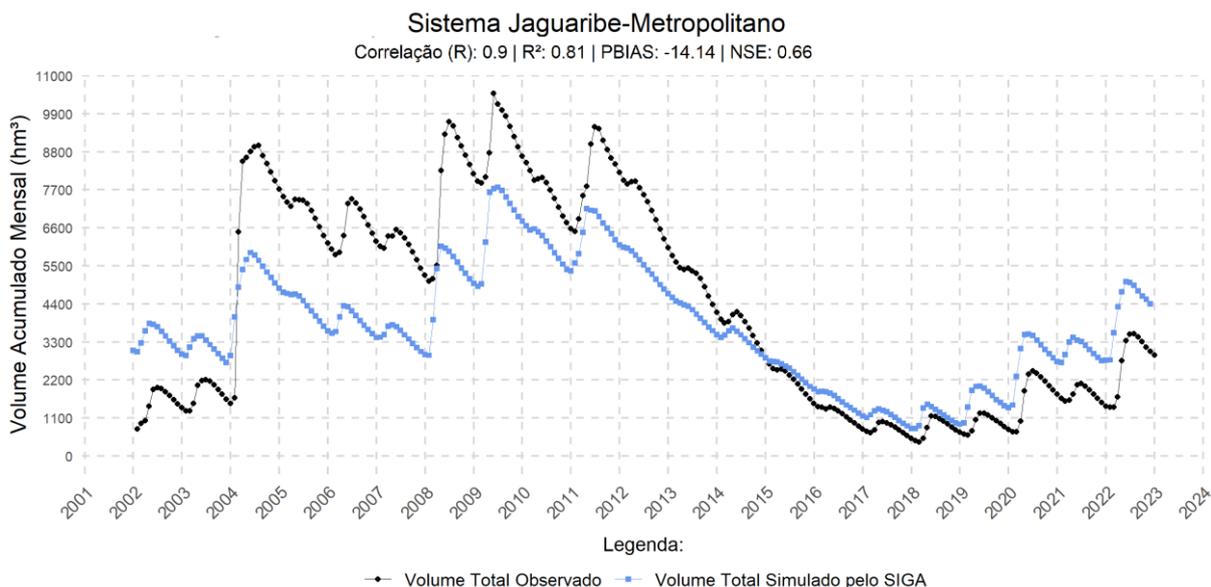
Nesta seção, em um contexto de análise abrangente das simulações obtidas a partir de dados observacionais, será explorado detalhadamente o comportamento destas simulações no hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano durante o final do século XX e início do século XXI. O foco desta análise se concentra no período que se estende de janeiro de 1993 a dezembro de 2022, abarcando duas décadas cruciais do último século. Durante esse intervalo de tempo, serão examinados o volume hídrico dos reservatórios, a capacidade de atendimento das demandas e a garantia das vazões regularizadas. Essa investigação tem como objetivo proporcionar uma compreensão mais profunda e precisa do comportamento do hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano ao longo do século passado, baseando-se exclusivamente em dados observacionais próximos da realidade e quando alimentado por demandas estáticas.

5.3.1.1 Avaliação do modelo SIGA

A Figura 38 apresenta uma comparação entre os volumes simulados e os volumes observados correspondentes no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2022, período escolhido considerando a disponibilidade de dados observados para sistema Jaguaribe-Metropolitano. As séries representam os volumes totais mensais do sistema hídrico, obtidos pela soma mensal dos volumes de cada bacia que constitui o hidrossistema.

Os resultados revelaram uma correlação notável entre os volumes simulados e observados, atingindo um valor expressivo de 0,9. Este indicador sugere uma relação linear positiva forte entre as duas séries temporais, indicando uma boa capacidade do SIGA em reproduzir as variações mensais nos volumes acumulados. O coeficiente de determinação (R^2) de 0,81 confirma a qualidade da representação do modelo em relação aos dados observados. O Percentual de Viés (PBIAS – descrito na seção 3.2.3.1) revelou uma subestimação sistemática dos volumes simulados em relação aos observados em grande parte do período observado. Embora a subestimação não seja desejável, o modelo conseguiu, no geral, captar as flutuações sazonais dos dados observados. O Índice de Eficiência Nash-Sutcliffe (NSE – também descrito na seção 3.2.3.1) de 0,66 indica uma boa habilidade do modelo em reproduzir a variabilidade temporal dos volumes observados, uma vez que o valor acima de 0,5 sugere uma habilidade satisfatória do modelo em capturar as variações nas séries temporais.

Figura 35 – Comparação entre os volumes simulados e observados no Sistema Hídrico Jaguaribe-Metropolitano, no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2022.



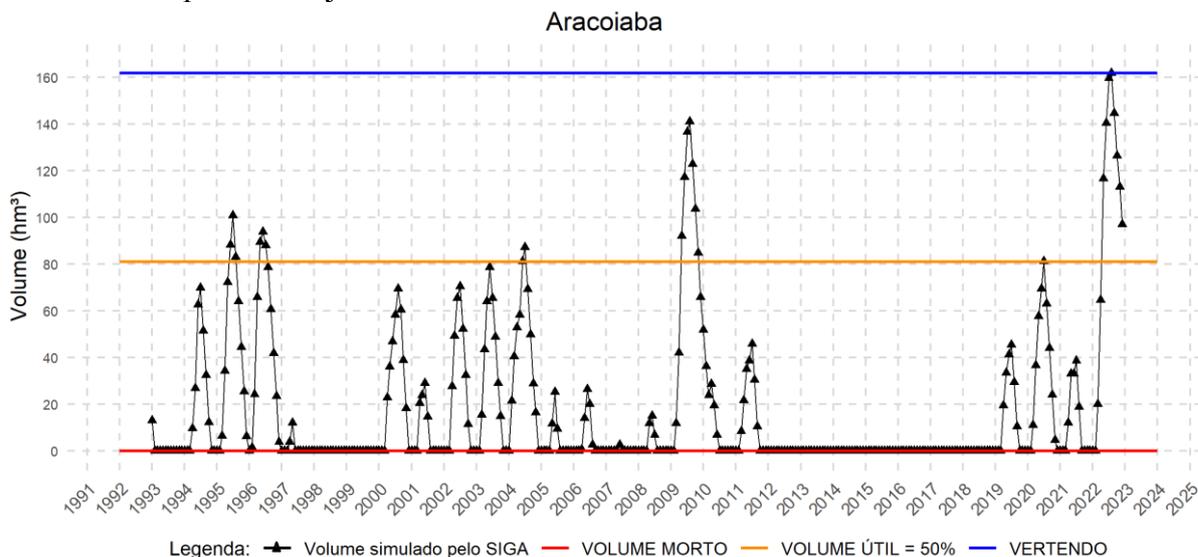
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.1.2 Volume hídrico dos reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano

A Figura 39 apresenta informações de volume útil simulado pelo SIGA no período compreendido entre janeiro de 1993 a dezembro de 2022, para o reservatório de Aracoiaba.

Ao longo do período analisado pode-se observar uma série de flutuações no volume útil para a série simulada.

Figura 36 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório de Aracoiaba no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.



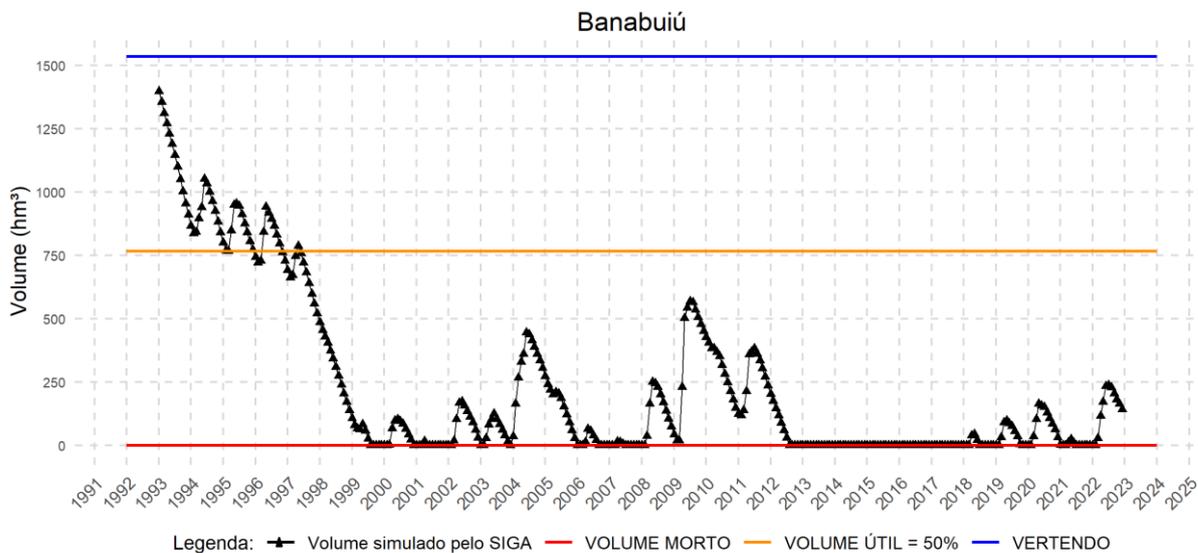
Fonte: Elaborada pelo autor.

Entre 1998 e 2000 e entre 2012 e 2019, o volume útil permaneceu baixo, indicando uma situação de escassez de água. Este último período também foi apontado pela FUNCEME (2023)⁶ com o período de menor aporte hídrico, indicando uma capacidade de armazenamento acima do volume mínimo, mas sempre abaixo de 50% do volume útil. Neste período, o reservatório de Aracoiaba apontou variações em seu suprimento de água. Para o abastecimento humano, a demanda foi atendida parcialmente (0-100% - indica o grau em que a demanda por água foi satisfeita, variando de 0% a 100%). Isso significa que parte da demanda por água foi suprida, mas não completamente em 11,1% do tempo. Quanto à irrigação, Aracoiaba apontou falhas parciais (0-100%) e totais de atendimento (0% - indicando que nenhuma parte da demanda por água foi satisfeita) em 20,5% e 11,1% do tempo, respectivamente. A partir de 2019 houve uma tendência de aumento nos níveis de volume útil, representando uma melhoria na disponibilidade de água em relação aos anos supracitados de escassez hídrica. A situação de vertimento indicada pelo modelo, em 2022, foi concordante com o alcance observado de 100% da capacidade máxima do reservatório no referido ano, segundo dados da FUNCEME (2023).

A Figura 40 apresenta informações de volume útil simulado pelo SIGA no período compreendido entre janeiro de 1993 a dezembro de 2022, para o reservatório de Banabuiú. Nota-se um padrão de variabilidade nas condições de volume útil, principalmente para os anos iniciais da série, representando uma diminuição no aporte hídrico do reservatório. A partir de 1998 o reservatório adentrou em um período de estabilidade, com algumas flutuações, mas permanecendo abaixo de 50% do volume útil em 79,72% do tempo, sinalizando uma redução significativa em sua capacidade de armazenamento, culminando em um volume útil correspondente ao volume mínimo de operação no início dos anos 2000. A partir desse ponto, embora continuassem a ocorrer oscilações na disponibilidade hídrica, o reservatório manteve-se, em média, com capacidade inferior a 50% de volume útil. A situação de escassez hídrica indicada pelo modelo, no período compreendido entre 2015 e 2018, foi concordante com o período de volume mínimo de operação registrado pela FUNCEME (2023).

⁶ Segundo o monitoramento dos açudes pelo portal <http://www.hidro.ce.gov.br/>. A seção do Anexo apresenta imagens da evolução do volume armazenado para alguns dos reservatórios aqui analisados.

Figura 40 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório de Banabuiú no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.



Fonte: Elaborada pelo autor.

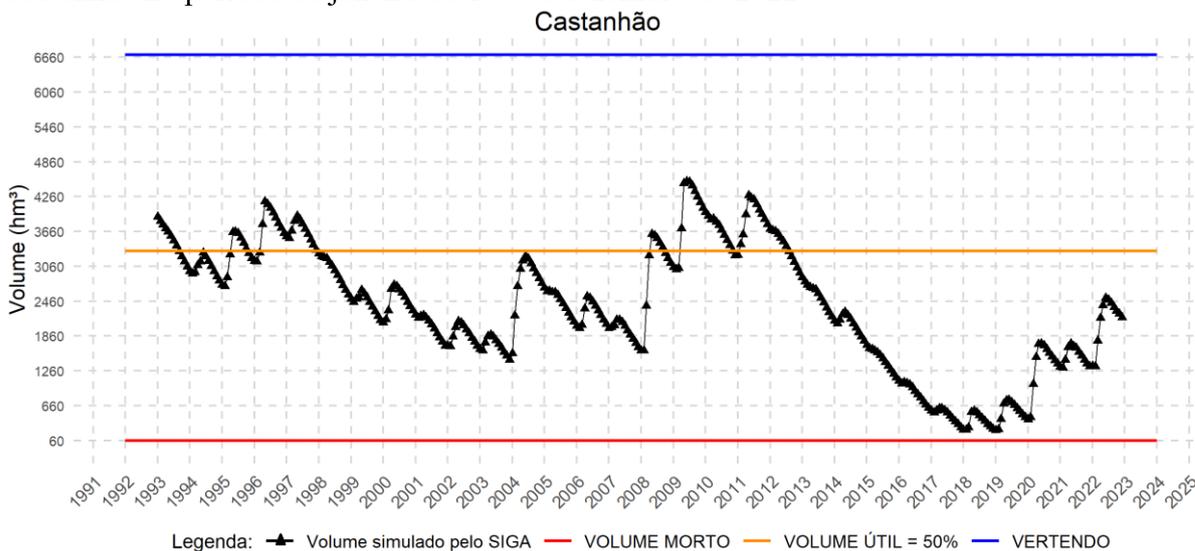
No geral, o modelo reproduziu as tendências de variação observada, mas subestimando-a. Há registros de atendimento parcial (0-100%) e de não atendimento (0%) em 1,66% e 9,72% do tempo, respectivamente, para a demanda de dessedentação animal. A irrigação foi mais penalizada, registrando atendimento parcial (0-100%) e não atendimento (0%) em 20% e 11,38% do tempo. Para o abastecimento humano, 9,72% do tempo revelou ocorrências de atendimento parcial (0-100%) da demanda no reservatório.

A Figura 41 apresenta informações de volume útil simulado pelo SIGA no período compreendido entre janeiro de 1993 a dezembro de 2022, para o reservatório do Castanhão. Observa-se uma flutuação notável em grande parte do período, com o reservatório oscilando entre 18,8% e 67,4% de seu volume útil, indicando uma disponibilidade significativa de água durante esse período. A partir de 2012, seu volume útil se manteve consistentemente abaixo de 50%.

Estes resultados concordam com os de Estácio et al. (2022) que identificaram, no mesmo período, desafios significativos na região devido à redução na disponibilidade de água. O modelo conseguiu reproduzir bem o volume registrado pela FUNCEME (2023), acompanhando principalmente a mudança para os níveis mais baixos de volume útil. O pior momento do Açude Castanhão reportado pela FUNCEME (2023) em 22 de fevereiro de 2018, quando seu volume na época estava com apenas 2,08%, foi concordante com o ponto crítico de escassez hídrica apontado pelo modelo no mesmo período, indicando um volume de 3,66%. Para valores consideráveis de volume, o modelo reproduz as tendências de variação, mas

subestimando-a. A partir de 2018, observou-se uma tendência ascendente nos níveis de volume útil, indicando uma melhoria na disponibilidade de água.

Figura 37 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório do Castanhão no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.



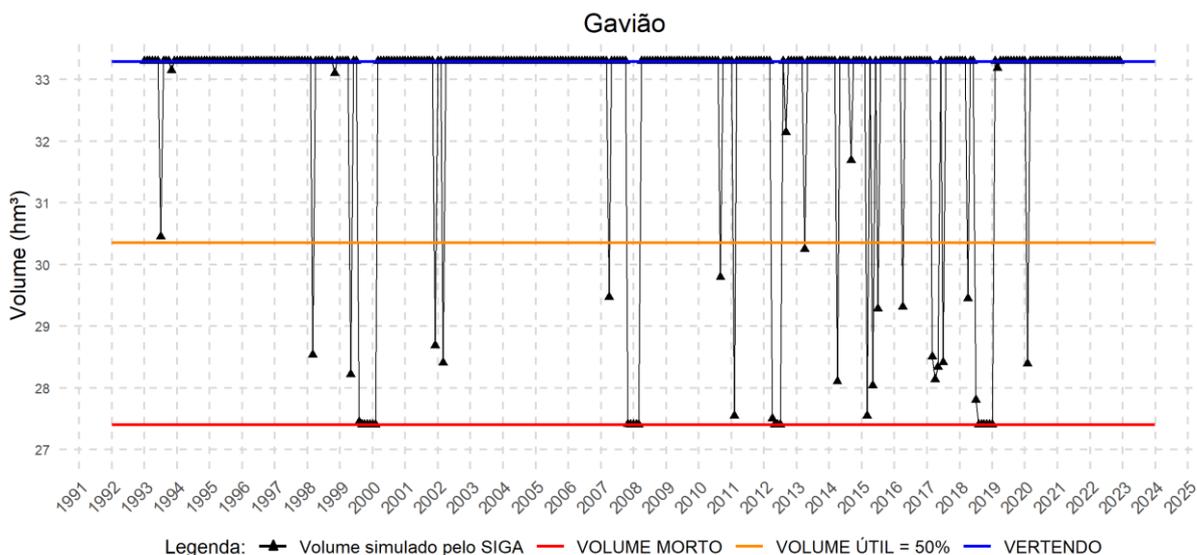
Fonte: Elaborada pelo autor.

Em 2022, foi reportado pelo modelo um melhor aporte hídrico, congruente com o melhor volume hídrico observado dos últimos sete anos, conforme dados da FUNCEME (2023). Com base nos dados fornecidos sobre as demandas, o reservatório do Castanhão conseguiu atender consistentemente a 100% das necessidades de água para abastecimento humano, uso animal e irrigação ao longo de um período de 360 meses. Isso indica uma confiabilidade notável no abastecimento de água para atividades relacionadas à essas demandas nessas áreas.

A Figura 42 apresenta informações de volume útil simulado pelo SIGA no período compreendido entre janeiro de 1993 a dezembro de 2022, para o reservatório do Gavião.

Durante o período analisado, o volume útil simulado do reservatório do Gavião sofreu flutuações, mas sempre tendendo a se manter em um nível de vertimento. Essa análise indica que o reservatório estava constantemente liberando água durante todo o período registrado, operando em volumes acima de 50% da capacidade útil em 88,33% do tempo. O maior período de tempo de sangria do reservatório, de acordo com os registros da Gerência de Monitoramento da FUNCEME, ocorreu a partir de março de 2022 (a última vez que o Gavião chegou próximo dessa marca foi entre março e abril de 2003) (FUNCEME, 2023). Esta situação de vertimento também foi reproduzida pelo modelo para o mesmo período.

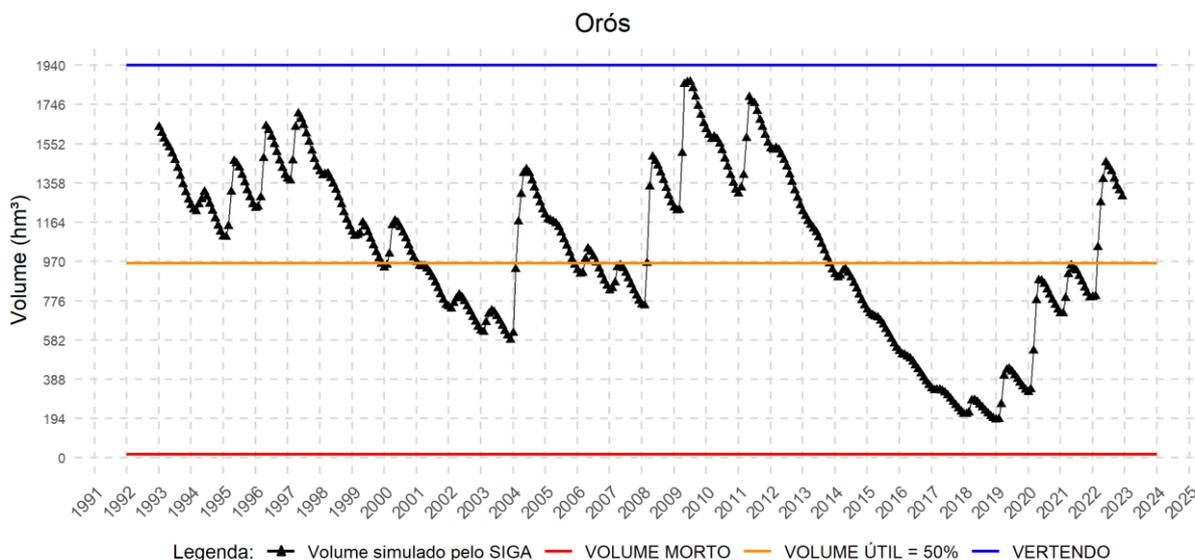
Figura 38 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório do Gavião no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O reservatório teve sua demanda de abastecimento humano relatada como parcialmente atendida (0-100%), o que sugere que as áreas abastecidas pelo Gavião podem ter experimentado flutuações em seu suprimento de água, com níveis entre 0% e 100%, durante 100% do tempo. Por fim, a demanda da indústria teve registro de não atendimento também em todo o período analisado. Estes resultados concordam com Estácio *et al.* (2022) que também identificaram uma redução no atendimento da demanda de abastecimento humano na RMF. Isso pode estar associado ao fato de o açude Gavião ser mantido artificialmente acima da cota de 35 m para atender à demanda da CAGECE na Estação de Tratamento de Água (ETA) Gavião, implicando em intervenções nas comportas, o que pode afetar a capacidade de regularização (Menescal *et al.*, 2004). Ao passo que para amortecimento de cheias, durante o período de chuvas, seria conveniente manter o reservatório na cota 34 m, o que pode limitar a capacidade de atender plenamente às demandas supracitadas. Além disso, durante o segundo semestre, o aporte de água ao Gavião depende exclusivamente das transferências do Açude Riachão. Isso pode limitar a disponibilidade de água no Gavião em determinadas épocas (Menescal *et al.*, 2004). A Figura 43 apresenta informações de volume útil simulado pelo SIGA no período compreendido entre janeiro de 1993 a dezembro de 2022, para o reservatório do Orós.

Figura 39 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório do Orós no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.

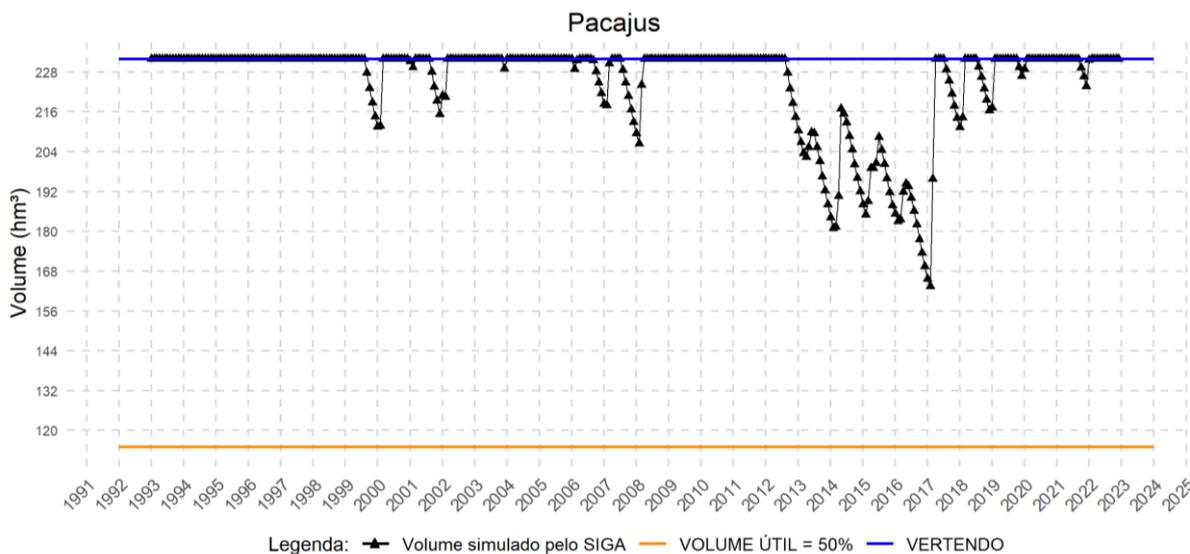


Fonte: Elaborada pelo autor.

A série simulada sofreu flutuações sazonais ao longo do tempo, com um aumento temporário nos níveis de água seguido por quedas. Os dados mostram que o reservatório permaneceu operando, durante 54,16% do tempo, na faixa de 50% a 100% de volume útil, mantendo níveis relativamente altos de disponibilidade de água até 2012, quando o volume do reservatório começou a diminuir gradualmente. Os valores continuaram a diminuir ao longo dos meses seguintes, indicando uma possível redução no abastecimento de água. A partir de 2020 houve uma tendência de aumento nos níveis de volume útil, representando uma melhoria na disponibilidade de água. O modelo conseguiu reproduzir bem o volume observado segundo os registros da Gerência de Monitoramento da FUNCEME (2023), acompanhando principalmente as tendências de variação, mas subestimando-as para valores consideráveis de volume. O reservatório conseguiu atender consistentemente a 100% das necessidades de água para abastecimento humano e irrigação ao longo de todo o período analisado.

A Figura 44 apresenta informações de volume útil simulado pelo SIGA no período compreendido entre janeiro de 1993 a dezembro de 2022, para o reservatório de Pacajus. Observou-se que o reservatório estava constantemente liberando água, operando em volumes acima de 77,58% da sua capacidade útil durante grande parte do período registrado. O maior período de flutuações se deu entre 2012 e 2017, quando ocorreram quedas graduais no volume, resultando em uma diminuição do nível do reservatório até o menor nível hídrico de 58,77% de sua capacidade útil.

Figura 40 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório de Pacajus no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.

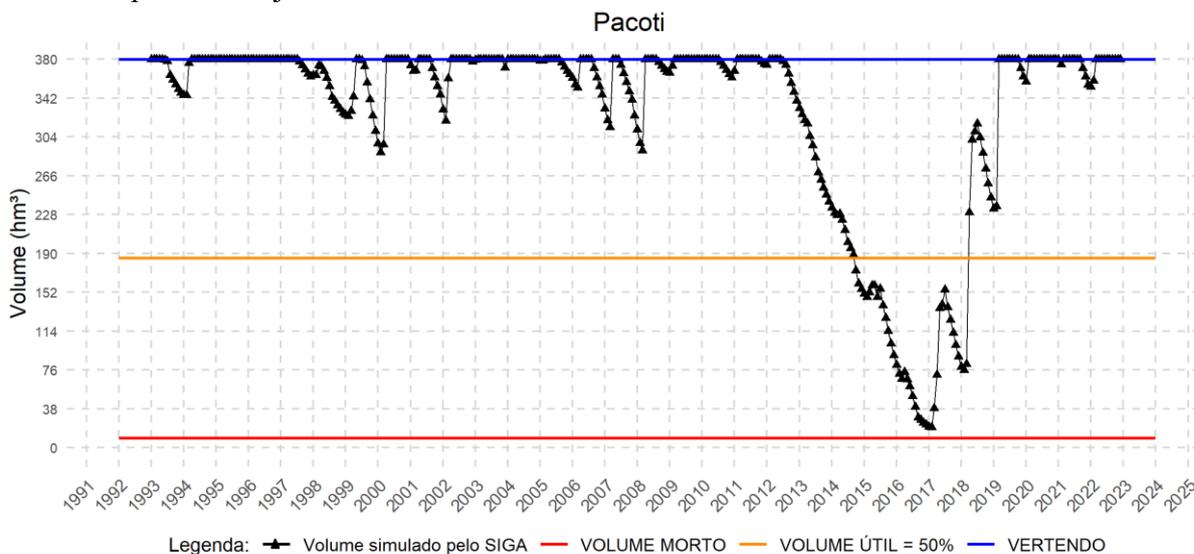


Fonte: Elaborada pelo autor.

O modelo conseguiu reproduzir as tendências de variação deste período, mas superestimando-as, conforme observado na evolução do volume armazenado disponibilizado pela FUNCEME (2023). A partir disto, houve uma tendência de aumento nos níveis de volume útil, representando uma melhoria na disponibilidade de água com percentuais de capacidade superior a 91,08%. Para as demandas de abastecimento humano e indústria, o reservatório conseguiu atender consistentemente a 100% das necessidades de água para essas atividades ao longo de todo o período analisado. A Figura 45 apresenta informações de volume útil simulado pelo SIGA no período compreendido entre janeiro de 1993 a dezembro de 2022, para o reservatório de Pacoti.

Na série simulada, inicialmente, observa-se um período de armazenamento, no qual o reservatório de Pacoti atingiu sua capacidade máxima e começou a verter água. Posteriormente, há fases de manutenção, em que o nível da água é mantido relativamente constante, mas com algumas variações sazonais. Então, ocorreu uma queda gradual no volume a partir de 2012, resultando em uma diminuição do nível do reservatório até 2016, permanecendo abaixo de 50% de sua capacidade útil. Esta evolução também foi observada de forma semelhante ao volume armazenado, segundo informações da FUNCEME (2023). Para as demandas de abastecimento humano e indústria, o reservatório do Pacoti também conseguiu atender consistentemente a 100% das necessidades de água para essas atividades ao longo de todo o período analisado.

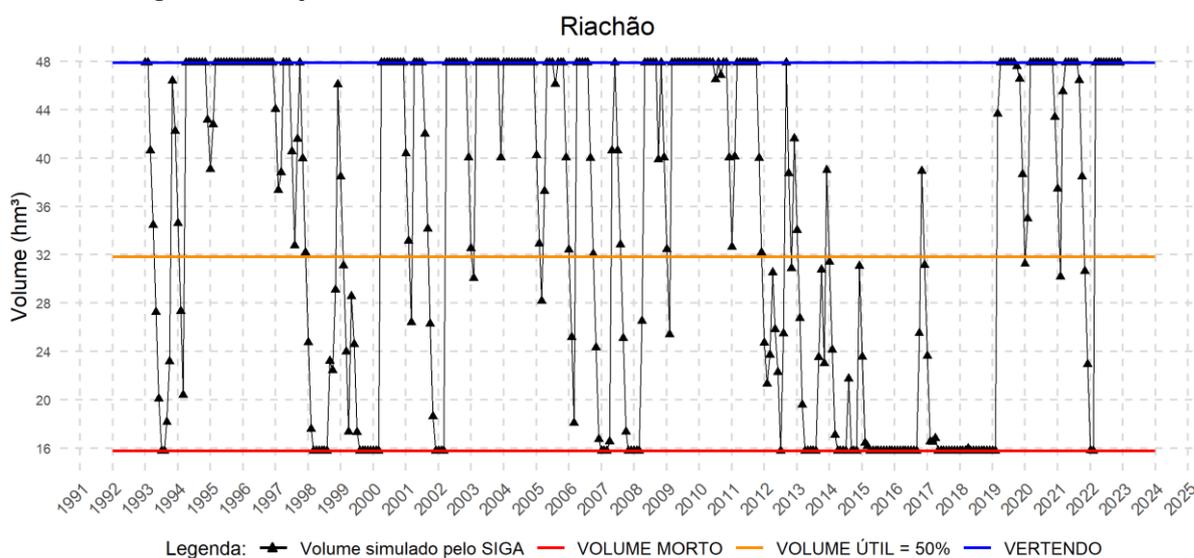
Figura 45 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório de Pacoti no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 46 apresenta informações de volume útil simulado pelo SIGA no período compreendido entre janeiro de 1993 a dezembro de 2022, para o reservatório do Riachão.

Figura 41 - Volume hídrico simulado pelo SIGA (linha na cor preta) para o reservatório do Riachão no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na série simulada, durante 77,7% do tempo, o reservatório do Riachão estava em um bom estado de operação registrando volumes hídricos acima de 50% do volume útil, havendo algumas variações nesta faixa. Também foram apontadas fases para as quais o volume

diminuiu ainda mais, registrando valores de volume mínimo de operação. O reservatório continuou operando com flutuações sazonais até o final do período dos dados, com algumas variações no volume útil, mas mantendo-se principalmente na faixa de 50% a 100%. Com isso, o reservatório relatou sua demanda de abastecimento humano como atendida em 100% do tempo, indicando que essa área teve suas necessidades de água para o abastecimento humano totalmente satisfeitas durante o período de medição.

5.3.1.2 Garantia da oferta hídrica

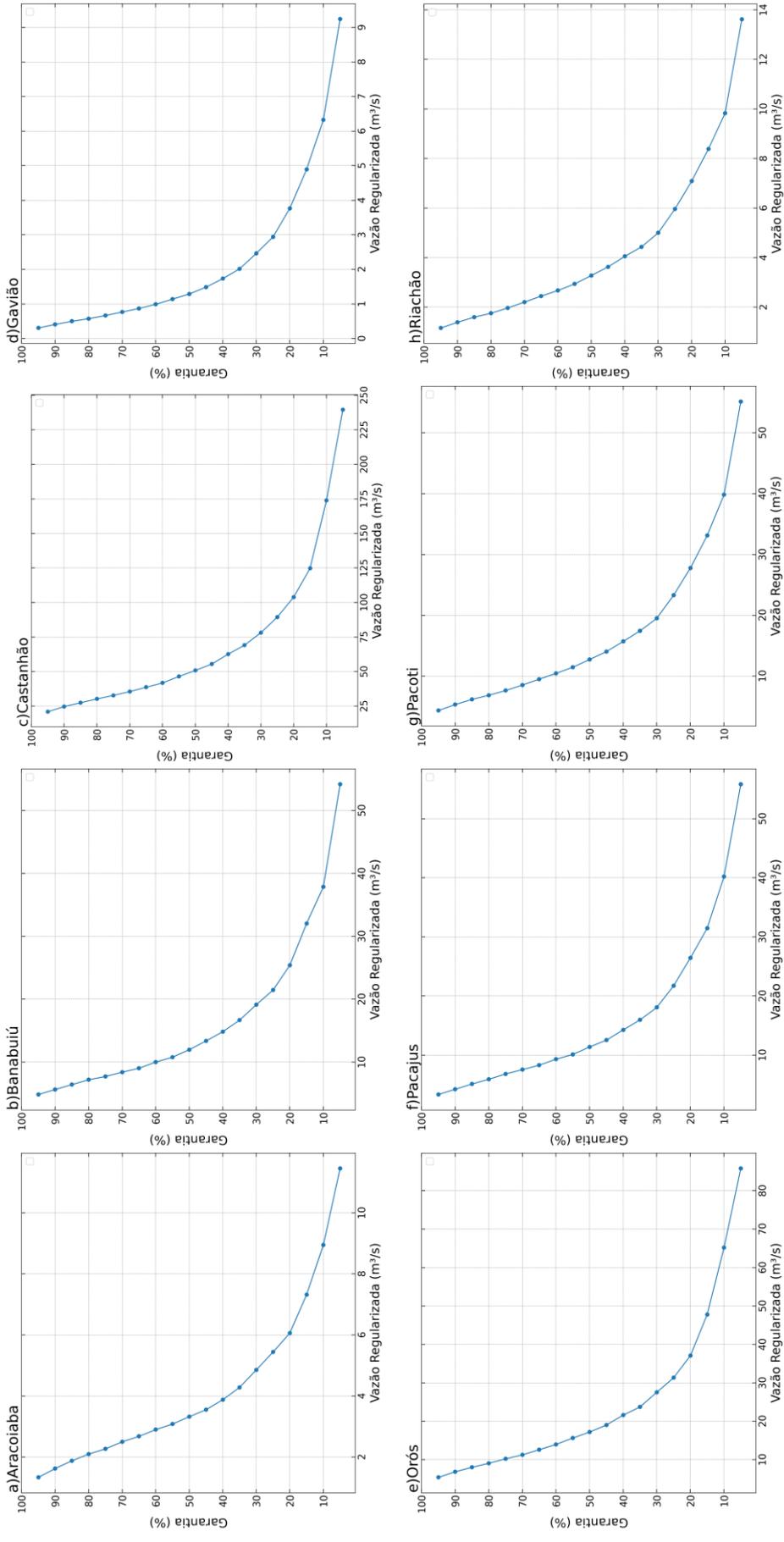
A Figura 47 apresenta a relação entre a porcentagem de garantia e a vazão regularizada em m^3/s para os reservatórios de (a) Aracoiaba, (b) Banabuiú, (c) Castanhão, (d) Gavião, (e) Orós, (f) Pacajus, (g) Pacoti e (h) Riachão. A garantia de vazão regularizada é uma métrica importante em gestão de recursos hídricos, especialmente para a gestão de reservatórios. Ela indica a probabilidade de que uma determinada vazão de água possa ser mantida ao longo do tempo, com base nas condições históricas de operação do reservatório. Esses números são essenciais para avaliar a capacidade do reservatório em fornecer uma vazão constante ao longo do tempo, o que é crucial para atender às demandas de água da região analisada.

Observa-se uma variação significativa na garantia da vazão para os reservatórios de Banabuiú, Castanhão e Orós, uma vez que conforme a garantia aumenta de 5% para 95%, a vazão regularizada diminui consideravelmente de $54,15 m^3/s$ para $4,83 m^3/s$, de $239,48 m^3/s$ para $20,87 m^3/s$ e de $85,76 m^3/s$ a $5,38 m^3/s$, respectivamente. Estes valores indicam que a oferta de água dos reservatórios mencionados acima pode ser altamente variável ao longo do tempo, dependendo das condições hidrológicas e tendo impactos significativos na oferta de água das regiões. Isso também demonstra que estes reservatórios são altamente sensíveis à garantia, ou seja, suas capacidades de fornecer água de forma regularizada está diretamente relacionada à quantidade de água disponível. No geral, em períodos de baixa garantia (5%), o reservatório consegue liberar uma vazão muito maior, o que pode ser resultado de uma gestão mais flexível para atender às demandas críticas. Por outro lado, quando a garantia está próxima de 100% (95%), a vazão regularizada diminui significativamente, indicando que o reservatório está operando em condições mais estáveis.

É importante notar que a vazão regularizada não aumenta linearmente com a porcentagem de garantia. Em alguns pontos, especialmente quando a porcentagem de garantia é baixa (como 5%), a vazão regularizada pode ser significativamente mais alta do que em outros

pontos com porcentagens semelhantes de garantia. Isso também sugere que o reservatório pode ter estratégias de gestão específicas para garantir a oferta de água em momentos críticos, mesmo quando a garantia é baixa. Por outro lado, à medida que a garantia se aproxima de 100%, a vazão regularizada tende a se estabilizar, o que é esperado, uma vez que a garantia completa implica que o reservatório está em condições ideais.

Figura 42 - Garantias de oferta hídrica associadas a diferentes valores de vazão dos reservatórios (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados relacionados aos reservatórios de Pacoti e Pacajus revelam uma tendência interessante entre a garantia em porcentagem e a vazão regularizada em m^3/s . Inicialmente, quando a garantia é baixa, especificamente a 5%, os reservatórios são capazes de fornecer uma vazão de $55,10 \text{ m}^3/\text{s}$ e $55,80 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, indicando uma grande capacidade de armazenamento e liberação de água. No entanto, à medida que a garantia aumenta, a vazão regularizada diminui significativamente. Por exemplo, com uma garantia de 95%, a vazão é mínima, com apenas $4,34 \text{ m}^3/\text{s}$ e $3,31 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, mostrando uma diminuição substancial na oferta de água quando a garantia é mais alta. Isso indica que os reservatórios da RMF também são sensíveis à garantia, com uma capacidade de armazenamento inicialmente robusta, mas com uma capacidade limitada de manter altas vazões quando a garantia aumenta. Esses resultados enfatizam a importância da gestão cuidadosa destes reservatórios para garantir um equilíbrio adequado entre a oferta de água e a garantia desejada.

5.3.2 Simulação utilizando modelos do CMIP6 para o século XX

Nesta seção será analisado o comportamento dos modelos participantes do CMIP6 em relação ao volume hídrico, atendimento das demandas e garantias das vazões regularizadas dos reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano no século XX, especificamente no período compreendido entre janeiro de 1985 a dezembro de 2014 e sob a influência ainda de demandas estáticas. Através da análise desses modelos, busca-se compreender como as projeções climáticas do passado influenciam diretamente a disponibilidade de água nessa região e suas implicações para o século atual. Faz-se importante destacar que o período selecionado permite uma análise histórica abrangente que engloba as condições climáticas e hidrológicas ao longo de quase três décadas, mesmo sabendo que há reservatórios criados em um período mais recente (O reservatório Castanhão, por exemplo, inaugurado em 2003). Isso possibilita a avaliação de padrões climáticos de longo prazo e tendências significativas que podem afetar a gestão de recursos hídricos.

5.3.2.1 Volume hídrico dos reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano

A Figura 48 mostra a simulação da operação do reservatório de Aracoiaba para os modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.

Para o reservatório de Aracoiaba, o modelo BCC-CSM2-MR exibiu flutuações expressivas no volume útil, com variações notáveis entre 0% e 50% e alguns períodos com registros de volume útil entre 50% e 100%. Em seguida, o HadGEM3-GC31-LL também exibiu flutuações mais expressivas quando comparada aos demais modelos, mas mantendo-se operando abaixo de 50% do volume útil. Os modelos IPSL-CM6A-LR e MIROC6 também apresentaram flutuações, mas principalmente em períodos específicos e com faixa de operação também abaixo de 50% da capacidade útil. Por outro lado, o modelo MRI-ESM2-0 teve flutuações detectáveis apenas somente em um curto período a partir de 2011, indicando que o volume útil permaneceu igual ou abaixo de 0% em quase todo o período analisado indicando uma situação crítica de escassez de água. A Tabela 16 apresenta informações quanto ao atendimento (Atendimento Total (100%), Atendimento Parcial (0-100%) e Não Atendimento (0%)) das demandas de abastecimento humano e irrigação pelo reservatório de Aracoiaba e para cada modelo.

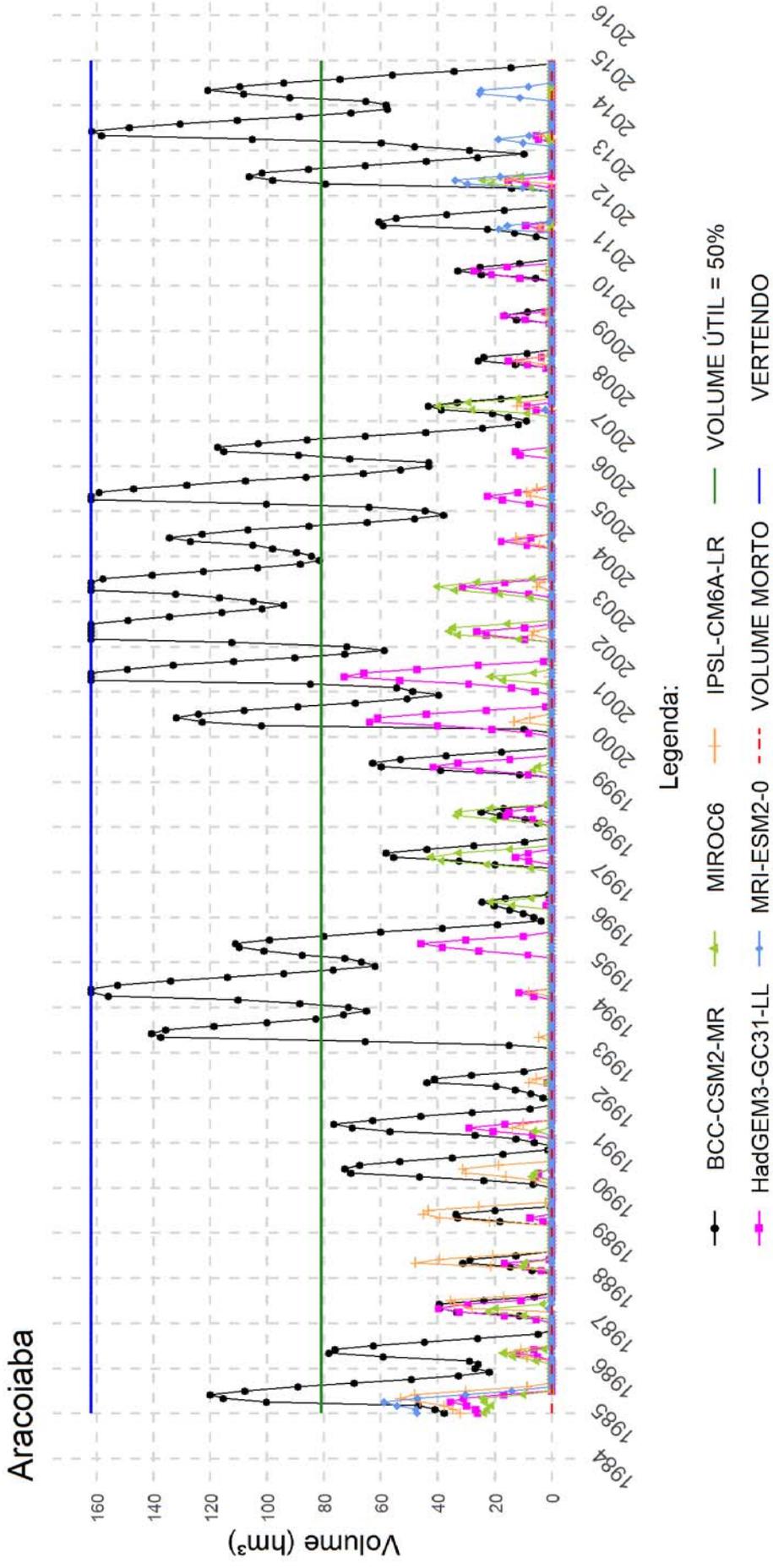
Tabela 16 - Percentual de atendimento no tempo (Atendimento Total (100%), Atendimento Parcial (0-100%) e Não Atendimento (0%)) das demandas de abastecimento humano e irrigação pelo reservatório de Aracoiaba para os modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0.

Percentual de atendimento no tempo	Abastecimento Humano			Irrigação		
	(100%)	(0-100%)	(0%)	(100%)	(0-100%)	(0%)
BCC-CSM2-MR	100%	-	-	92,22%	7,77%	-
HadGEM3-GC31-LL	65%	32,5%	2,5%	56,94%	8,05%	35%
IPSL-CM6A-LR	65,55%	30,27%	4,16%	52,22%	14,16%	34,44%
MIROC6	56,66%	38,88%	4,44%	42,77%	13,88%	43,33%
MRI-ESM2-0	50%	46,11%	3,88%	30,83%	19,16%	50%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo BCC-CSM2-MR foi o único que teve suas necessidades de água para o abastecimento humano totalmente satisfeitas durante o período de simulação. Este modelo também teve o menor percentual de tempo para atendimento parcial da irrigação em detrimento dos demais modelos. Para os demais e para as duas demandas, houve variações em seu suprimento de água. As maiores variações (0-100%) foram apontadas pelo modelo MRI-ESM2-0.

Figura 43 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório de Aracoiaba no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 49 mostra a simulação da operação do reservatório do Banabuiú para os modelos analisados, no período compreendido entre janeiro de 1985 a dezembro de 2014.

Ao comparar os modelos em relação à variação do volume útil no reservatório do Banabuiú, observa-se que quatro dos cinco modelos (excetua-se o BCC-CSM2-MR) apresentaram um comportamento geral de oscilação acima de 50% do volume útil, indicando uma diminuição gradual na disponibilidade de água em alguns períodos, mas com a manutenção de níveis relativamente elevados na maior parte do período analisado. No entanto, cada modelo mostrou diferenças na frequência e na duração dessas oscilações. Os modelos BCC-CSM2-MR, IPSL-CM6A-LR e MRI-ESM2-0 exibiram mais flutuações e transições temporárias para níveis mais baixos, indicando uma sensibilidade maior às variações na disponibilidade de água. Por outro lado, os modelos HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 apresentaram oscilações mais estáveis. Os modelos BCC-CSM2-MR, IPSL-CM6A-LR e MRI-ESM2-0 podem ter parâmetros mais sensíveis aos efeitos climáticos, levando a flutuações na disponibilidade de água. HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 parecem suavizar essas flutuações, possivelmente devido a configurações que atenuam as variações climáticas. Essas diferenças sugerem que cada modelo representa de forma distinta a dinâmica do reservatório de Banabuiú e suas respostas às variações na disponibilidade de água, o que pode ter implicações significativas para o gerenciamento de recursos hídricos na região.

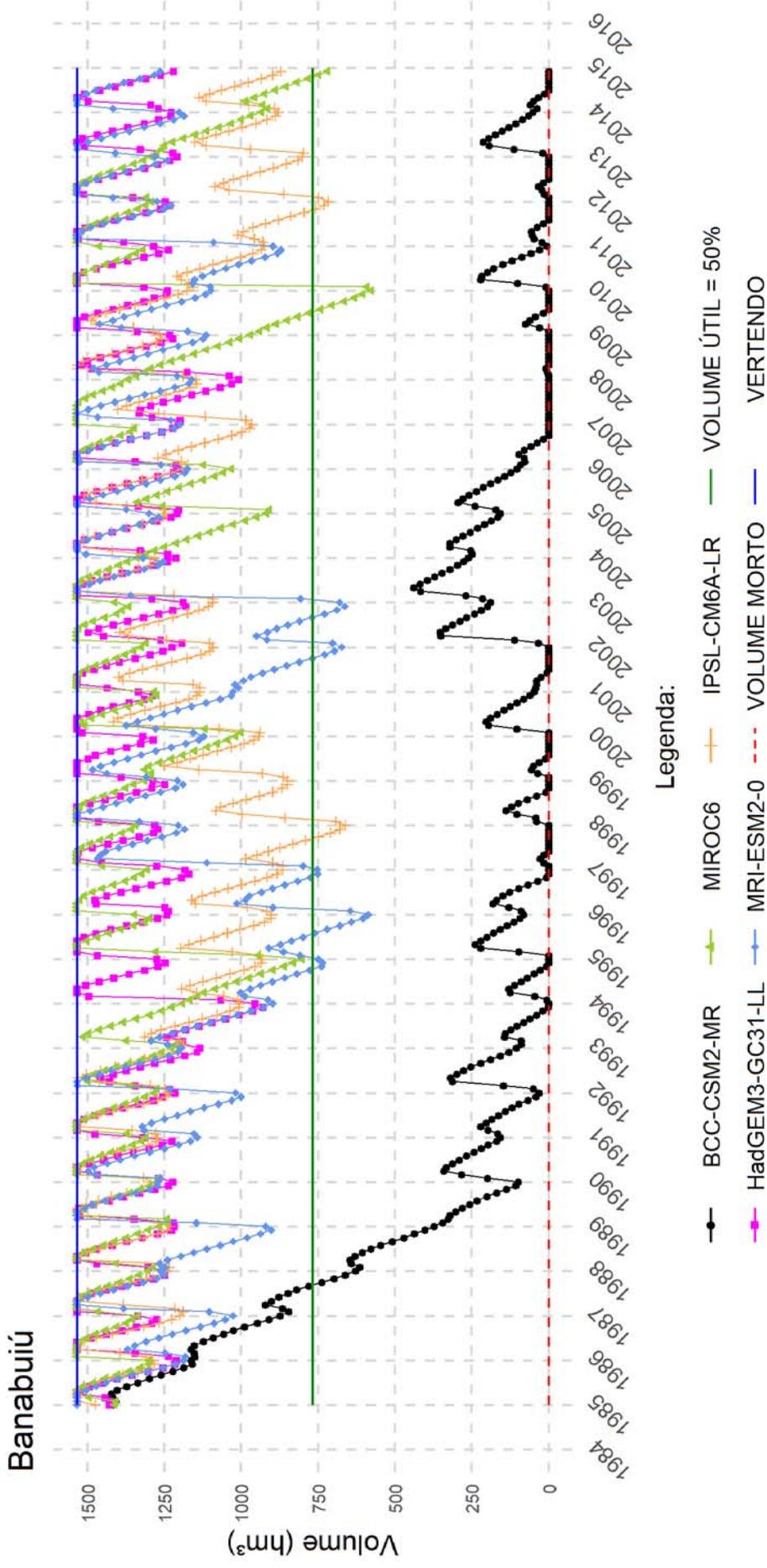
O modelo BCC-CSM2-MR foi o único que teve suas necessidades de água sofrendo variações no suprimento das demandas de abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação. As maiores variações (0-100%) foram apontadas para a irrigação. Esta demanda também apontou o maior percentual de tempo em que não foi atendida. A Tabela 17 apresenta informações quanto ao atendimento (Atendimento Total (100%), Atendimento Parcial (0-100%) e Não Atendimento (0%)) das demandas de abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação pelo reservatório do Banabuiú para o modelo BCC-CSM2-MR.

Tabela 17 - Percentual de atendimento no tempo (Atendimento Total (100%), Atendimento Parcial (0-100%) e Não Atendimento (0%)) das demandas de abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação pelo reservatório de Aracoíaba para o modelo BCC-CSM2-MR.

	Percentual de atendimento no tempo		
	(100%)	(0-100%)	(0%)
Abastecimento Humano	95,83%	4,16%	-
Dessedentação Animal	95%	0,83%	4,16%
Irrigação	77,22%	17,77%	5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório de Banabuiú no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.

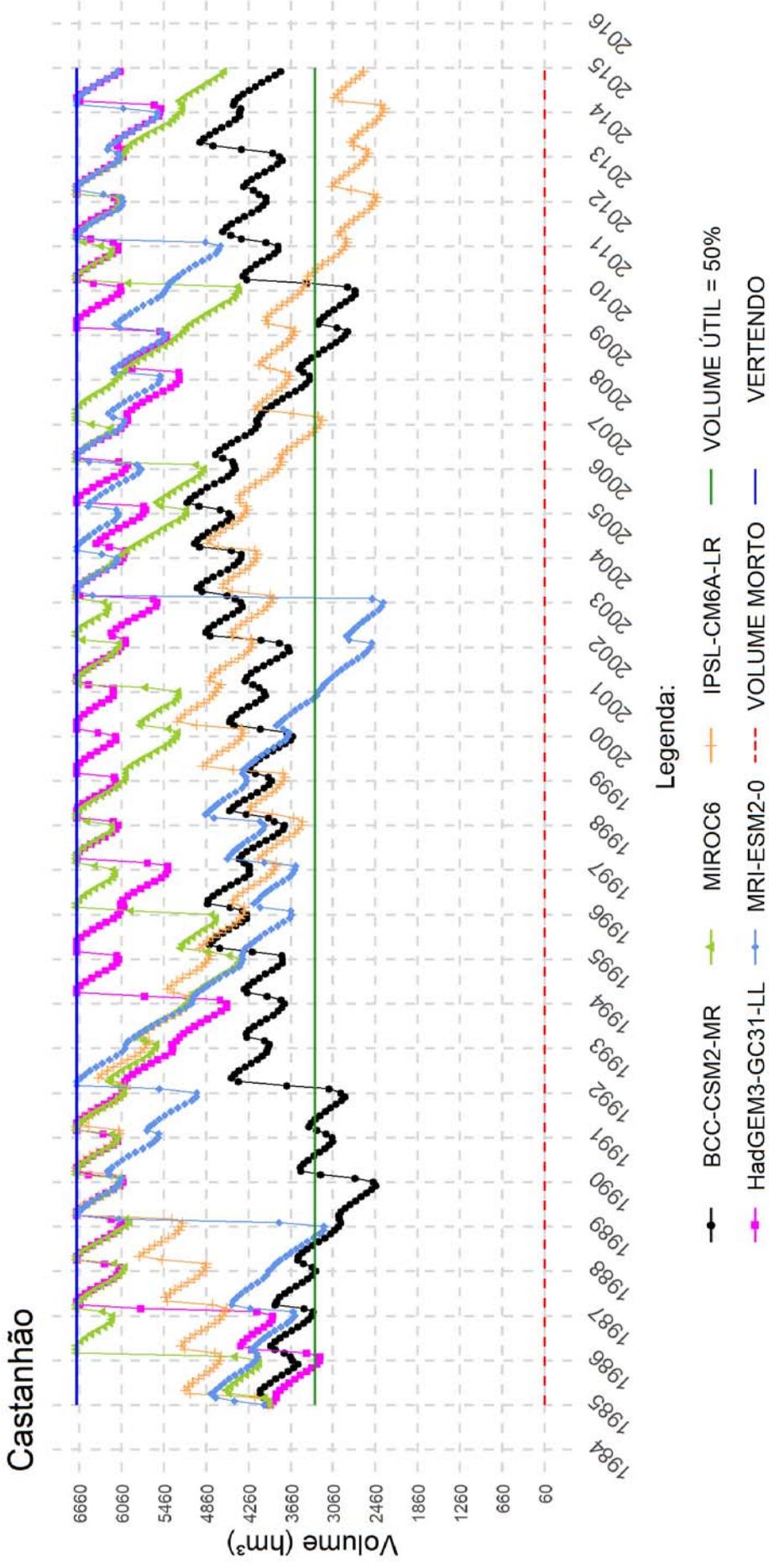


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 50 mostra a simulação da operação do reservatório de Castanhão para os modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0, no período compreendido entre janeiro de 1985 a dezembro de 2014.

A análise comparativa dos modelos em relação ao volume útil do reservatório do Castanhão revela diferentes padrões de comportamento. O BCC-CSM2-MR apresentou flutuações próximas e acima de 50% da capacidade útil do reservatório em grande parte do período, com somente dois períodos em que o volume útil oscilou entre categorias mais baixas, sugerindo variações transitórias na disponibilidade de água. Por outro lado, o HADGEM3-GC31-LL manteve uma tendência geral de volume útil mais alto, com apenas um período de oscilação para valores ligeiramente mais baixos. Isso indica uma maior estabilidade na disponibilidade de água ao longo do período analisado em comparação com o modelo BCC-CSM2-MR. O IPSL-CM6A-LR apresentou flutuações mais significativas comparado ao BCC-CSM2-MR, com um curto período contemplando a situação de vertimento. O MIROC6 apresentou algumas oscilações, mantendo-se predominantemente em níveis acima de 50% do volume útil. Em contraste, o modelo MRI-ESM2-0 exibiu uma maior variabilidade, com múltiplas ocorrências de vertimento e valores de volume útil mais baixos em determinados períodos, indicando uma sensibilidade maior às flutuações na disponibilidade de água. O conjunto de modelos indicou que a área coberta pelo reservatório teve suas necessidades de água para o abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação totalmente satisfeitas durante o período de medição de 360 meses. Esses resultados contrastam com os resultados encontrados por Gondim *et al.* (2018) que analisou os impactos das mudanças climáticas na demanda de água para a agricultura irrigada, considerando-se, a variedade das culturas irrigadas e a eficiência dos sistemas de irrigação adotados, assim como os cenários de mudanças climáticas no modelo HadRM3. Os resultados apontaram, segundo projeções para 2040, em todos os cenários analisados, uma diminuição na disponibilidade de água e o aumento de demanda de água para irrigação, sinalizando riscos quanto à ocorrência das falhas no atendimento dessa demanda no Castanhão e entorno.

Figura 50 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório do Castanhão no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.



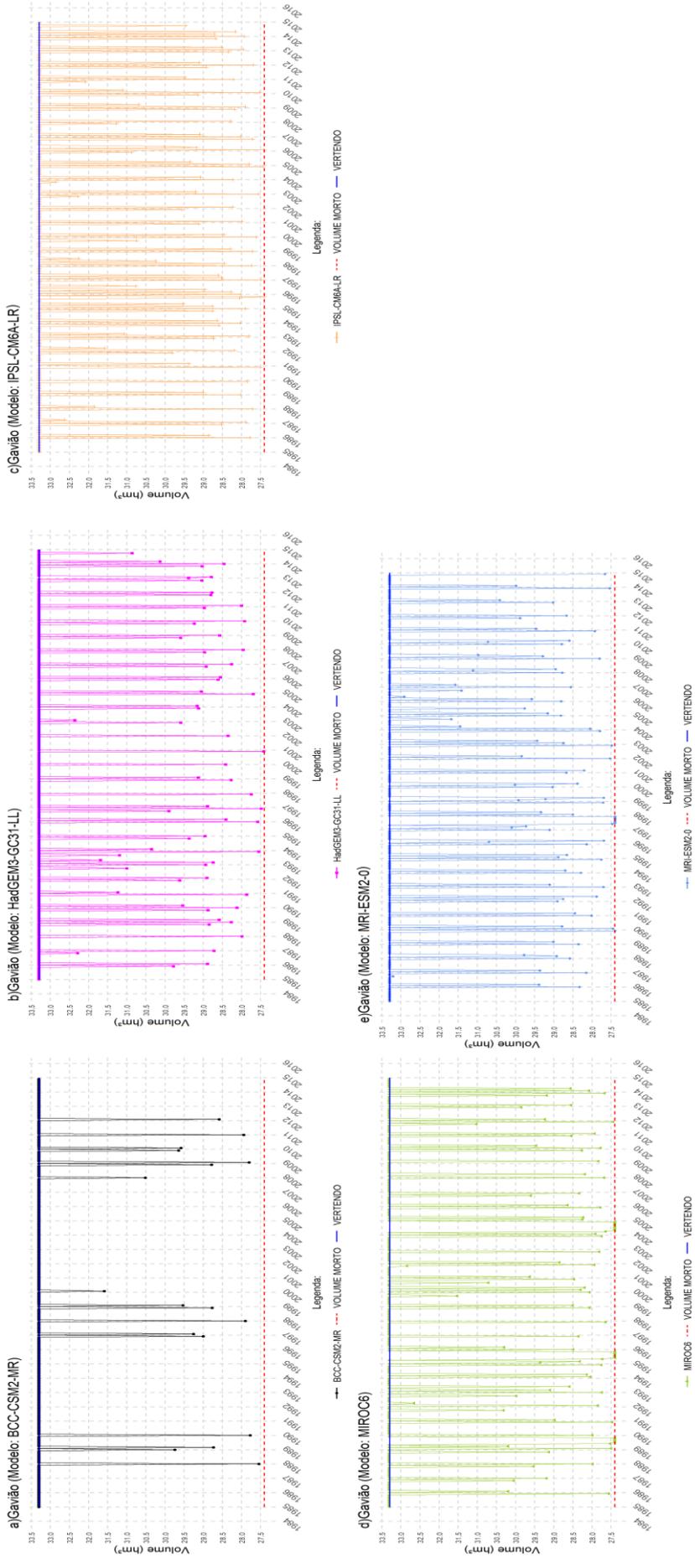
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 51 mostra a simulação da operação do reservatório do Gavião para os modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0, no período compreendido entre janeiro de 1985 a dezembro de 2014.

Durante o período de análise para o modelo BCC-CSM2-MR, o reservatório do Gavião manteve seu volume útil em torno de 33,3 hm³ na maior parte do tempo, com poucas flutuações, indicando ainda que o reservatório estava vertendo água durante grande parte do período analisado. No entanto, todos os modelos analisados apresentaram períodos em que o volume útil do reservatório caiu para valores próximos da capacidade mínima de operação. O HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, e MRI-ESM2-0 tiveram múltiplas dessas ocorrências, sugerindo flutuações mais frequentes. Essas variações no volume útil e no vertimento nos modelos sugerem diferentes estratégias de gestão de água e níveis de estabilidade operacional ao longo do tempo. O reservatório do Gavião apresenta uma situação desafiadora, com 360 meses em que a demanda industrial não foi satisfeita, registrando uma taxa de atendimento de 0% por todos os modelos. O reservatório também teve sua demanda de abastecimento humano relatada como parcialmente atendida (0-100%), o que sugere que as áreas abastecidas pelo Gavião podem ter experimentado flutuações em seu suprimento de água, com níveis entre 0% e 100%, durante 100% do tempo também por todos os modelos.

Este cenário, já obtido anteriormente na simulação com os dados observados, reforça a preocupante falta de abastecimento de água destinada às atividades demandadas pelo abastecimento humano e para a indústria pelo Gavião durante todo o período analisado. Esses resultados concordam com Sabóia (2016) que concluiu, conforme indicado pelo modelo BCC-CSM1, que terá fortes diminuições nas intensidades de chuvas máximas na RMF. Esse cenário pode ter impactos significativos no atendimento das demandas do açude Gavião, uma vez que a redução nas intensidades de chuvas máximas pode afetar a recarga do reservatório, influenciando diretamente na disponibilidade de água e, conseqüentemente, na capacidade de atender às demandas associadas ao açude. Essa disparidade indica a necessidade de uma investigação aprofundada das causas subjacentes a essa lacuna no fornecimento de água industrial pelo Gavião, bem como a implementação de medidas para assegurar um suprimento adequado e confiável no futuro.

Figura 45 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Gavião no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 52 mostra a simulação da operação do reservatório do Orós para os modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0, no período compreendido entre janeiro de 1985 a dezembro de 2014.

Na análise do comportamento dos cinco modelos em relação ao reservatório do Orós, pode-se observar distinções significativas em termos de disponibilidade hídrica. O MRI-ESM2-0 e IPSL-CM6A-LR apresentou flutuações mais significativas, com diversos períodos em que o reservatório oscilou entre diferentes faixas de volume útil, indicando uma sensibilidade relativamente alta às variações na disponibilidade de água. No entanto, o HadGEM3-GC31-LL e o MIROC6 manteve níveis mais estáveis na maior parte do período e com situações de vertimento, com poucas oscilações, sugerindo uma resposta menos sensível às flutuações na disponibilidade hídrica. O BCC-CSM2-MR, por sua vez, exibiu uma diminuição gradual de seu volume útil na década inicial, passando do nível de 50% do volume útil, seguido de algumas flutuações, para períodos com a capacidade mínima de operação, em níveis mais baixos em comparação com os outros modelos, indicando uma situação crítica de escassez de água e sendo, portanto, o modelo mais pessimista.

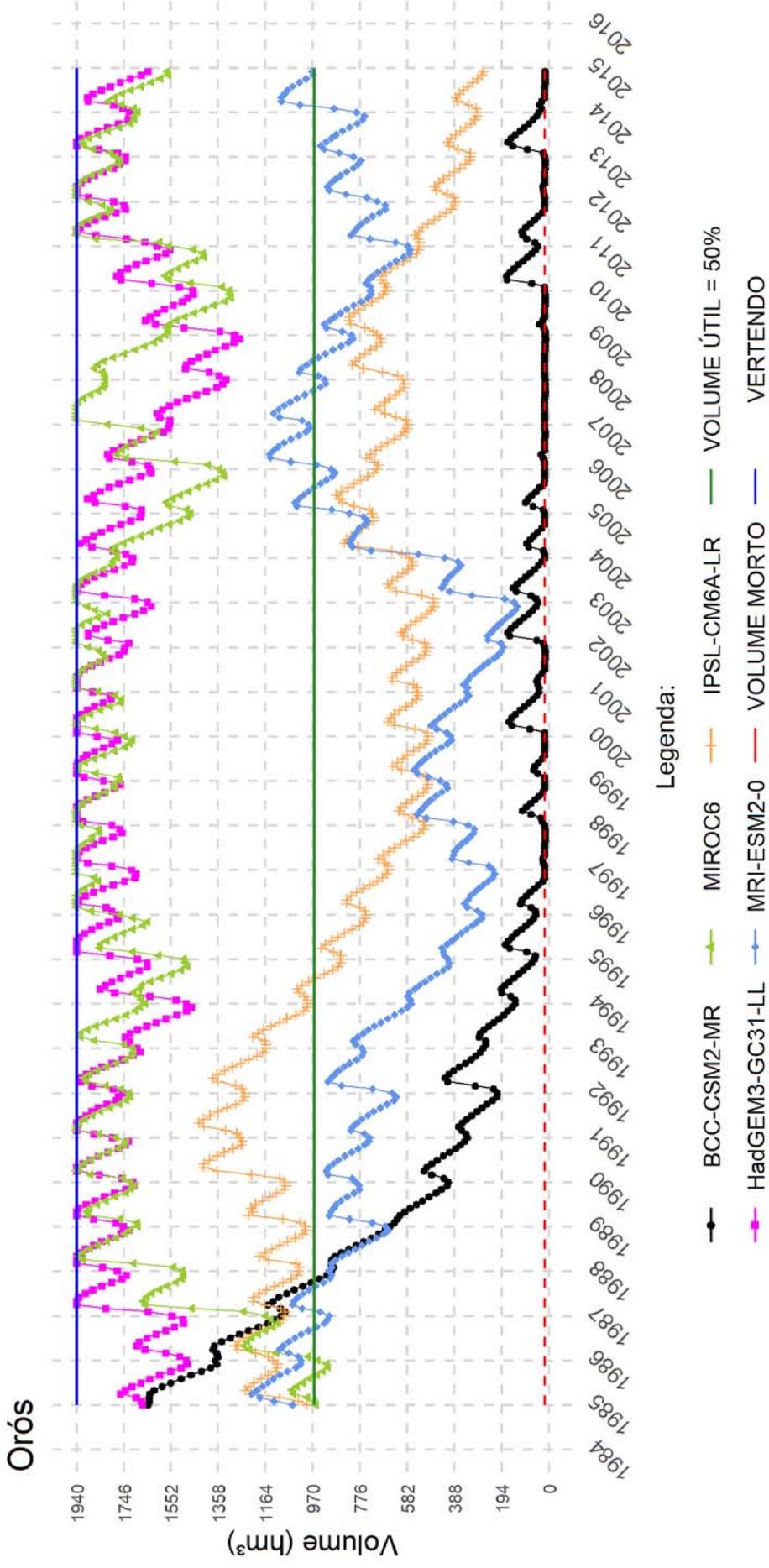
A Tabela 18 apresenta informações quanto ao atendimento (Atendimento Total (100%), Atendimento Parcial (0-100%) e Não Atendimento (0%)) das demandas de abastecimento humano e irrigação pelo reservatório do Orós para o modelo BCC-CSM2-MR. O modelo BCC-CSM2-MR foi o único que teve suas necessidades de água sofrendo variações no suprimento das demandas de abastecimento humano e irrigação. As maiores variações (0-100%) foram apontadas para a irrigação. Esta demanda também apontou o maior percentual de tempo em que não foi atendida.

Tabela 18 - Percentual de atendimento no tempo (Atendimento Total (100%), Atendimento Parcial (0-100%) e Não Atendimento (0%)) das demandas de abastecimento humano e irrigação pelo reservatório do Orós para o modelo BCC-CSM2-MR.

	Percentual de atendimento no tempo		
	(100%)	(0-100%)	(0%)
Abastecimento Humano	81,66%	2,77%	15,55%
Irrigação	71,66%	10%	18,33%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório do Orós no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.



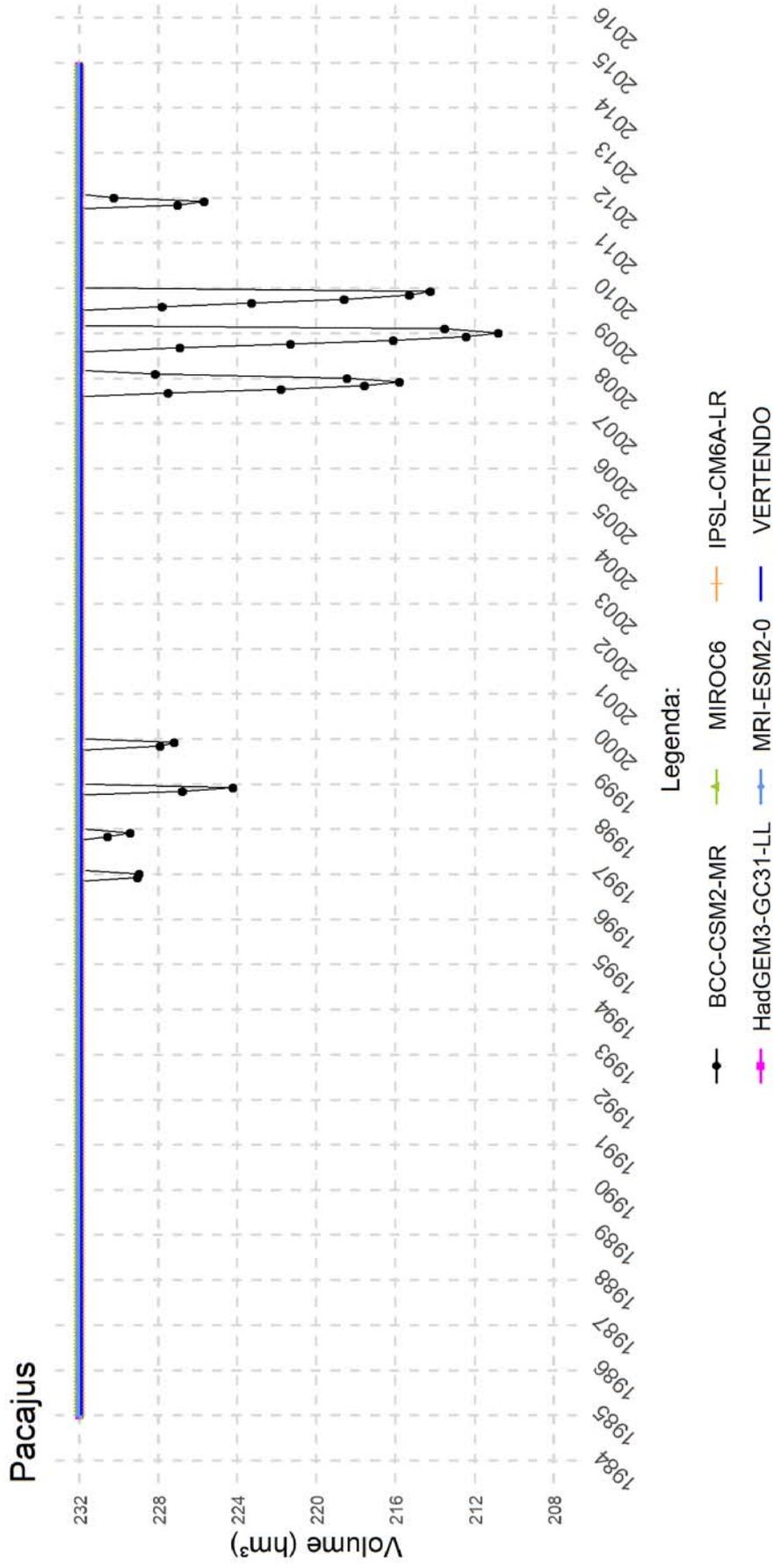
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 53 mostra a simulação da operação do reservatório do Pacajus para os modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0, no período compreendido entre janeiro de 1985 a dezembro de 2014.

A análise comparativa entre os modelos HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 revela que estes modelos indicaram que o volume útil do reservatório estava em 100% de sua capacidade durante todo o período analisado e ocorrendo vertimento de água excedente. Essa consistência nos resultados entre os modelos sugere que todos eles concordaram quanto à capacidade máxima do reservatório e à situação de vertimento. O BCC-CSM2-MR foi o único que apresentou períodos de flutuações, sugerindo variações transitórias na disponibilidade de água, mas mantendo-se com níveis acima de 50% da capacidade útil do reservatório.

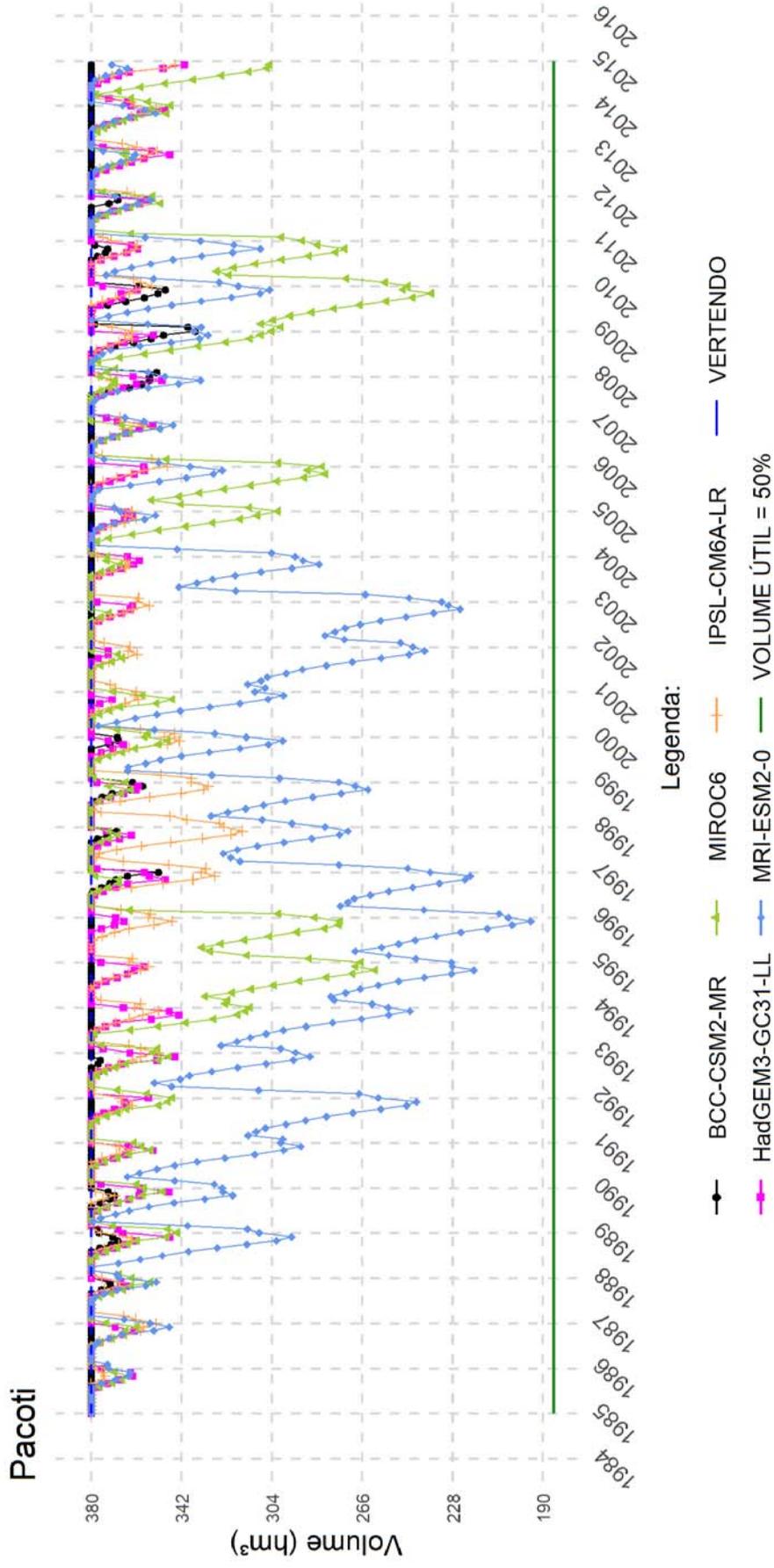
Em seguida, a Figura 54 mostra a simulação da operação do reservatório de Pacoti para os modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0, no período compreendido entre janeiro de 1985 a dezembro de 2014. O MRI-ESM2-0, seguido do MIROC6, apresentaram flutuações mais significativas, com diversos períodos em que o reservatório oscilou entre diferentes faixas de volume útil, indicando uma sensibilidade relativamente alta às variações na disponibilidade de água. No entanto, o primeiro modelo se manteve em níveis mais baixos comparado ao segundo, indicando uma disponibilidade de água potencialmente mais limitada ao longo do período analisado e sendo, portanto, o modelo mais pessimista. BCC-CSM2-MR e HadGEM3-GC31-LL mantiveram níveis mais estáveis na maior parte do período e com situações de vertimento, com poucas oscilações, sugerindo uma resposta menos sensível às flutuações na disponibilidade hídrica. O IPSL-CM6A-LR apresentou comportamento semelhante aos modelos supracitados, mas com algumas flutuações mais proeminentes.

Figura 47 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório de Pacajus no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 48 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório do Pacoti no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.

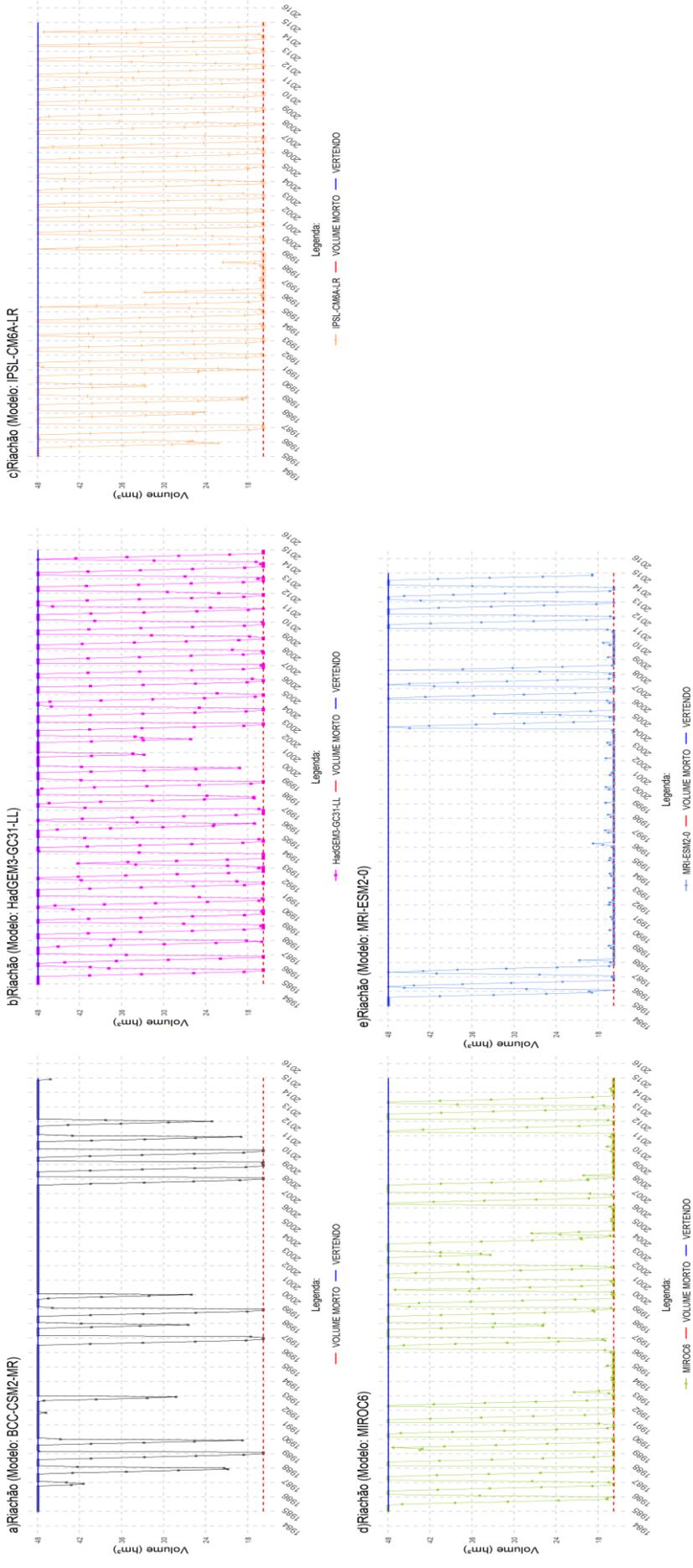


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 55 mostra a simulação da operação do reservatório de Riachão para os modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0, no período compreendido entre janeiro de 1985 a dezembro de 2014.

Para o Riachão, todos os modelos analisados apresentaram padrões distintos de comportamento ao longo do período analisado. Durante o período de análise para o modelo BCC-CSM2-MR, o reservatório do Riachão manteve-se em situação de vertimento na maior parte do tempo, com algumas flutuações. No entanto, todos os modelos analisados apresentaram períodos em que o volume útil do reservatório caiu para valores próximos da capacidade mínima de operação. O HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR e MIROC6 tiveram múltiplas dessas ocorrências, sugerindo flutuações mais frequentes. Essas variações no volume útil e no vertimento a partir dos modelos sugerem diferentes estratégias de gestão de água e níveis de estabilidade operacional ao longo do tempo. O modelo MRI-ESM2-0 se destacou por não apresentar situações de vertimento ao longo da maior parte da série temporal, mantendo-se com volume mínimo da capacidade útil do reservatório. Esses padrões divergentes entre os modelos ressaltam as diferentes respostas simuladas para o reservatório do Riachão, sugerindo que cada modelo representa cenários hidrológicos únicos e destacando a importância de considerar essa variabilidade na gestão dos recursos hídricos. O conjunto de modelos indicou que as áreas abastecidas pelos reservatórios Pacajus, Pacoti e Riachão tiveram suas necessidades de água para o abastecimento humano e indústria totalmente satisfeitas durante o período de simulação de 360 meses.

Figura 49 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Riachão no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2014.



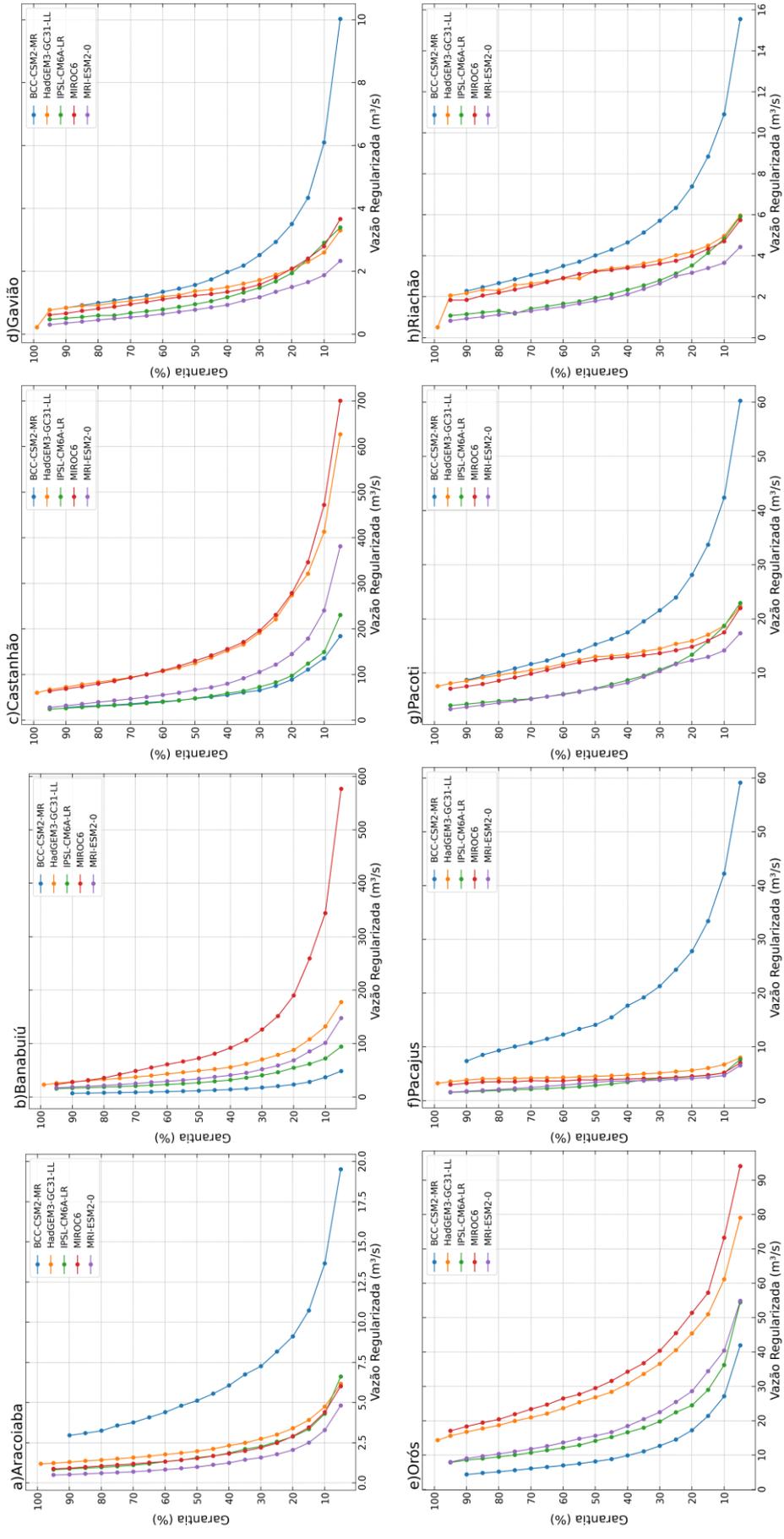
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.2.2 Garantia da oferta hídrica

A Figura 56 apresenta a relação entre as porcentagens de garantias associadas a diferentes valores de vazão regularizada em m^3/s para todos os modelos (BCC-CSM2-RM, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0) nos reservatórios de Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão.

Os dados mostraram flutuações e diferenças nas vazões entre os modelos em diferentes níveis de garantia. É importante notar que a relação entre garantia e vazão não é uniforme em todos os níveis de garantia, e algumas flutuações podem ocorrer. Isso pode ser influenciado por diversos fatores, como a complexidade dos modelos, a resolução espacial, as características da bacia hidrográfica dos reservatórios analisados e as condições climáticas simuladas. Observa-se que, em geral, o modelo BCC-CSM2-RM tende a ter vazões mais altas em relação à garantia do que os demais modelos em grande parte dos reservatórios que compõem a Região Metropolitana de Fortaleza. Isso sugere que este modelo pode ser mais eficaz na regularização da vazão em condições de garantia reduzida. Conforme a garantia diminui de 99% para 5%, observa-se um aumento gradual na vazão regularizada em todos os modelos avaliados. Em Banabuiú e Orós, o modelo MIROC6 se destacou com as maiores vazões em condições de garantia reduzida, sugerindo uma maior sensibilidade às variações na garantia destes reservatórios, ao passo que, no Castanhão, HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 apresentaram comportamento semelhante.

Figura 50 - Garantias de oferta hídrica associadas a diferentes valores de vazão para todos os modelos (BCC-CSM2-RM, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0) nos reservatórios (a) Aracoíaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacotí (g) Riachão (h) Riachão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.3 Simulação utilizando modelos do CMIP6 para o século XXI

Nesta seção será analisado o comportamento dos modelos participantes do CMIP6 em relação ao volume hídrico, atendimento das demandas e garantias das vazões regularizadas dos reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano no século XXI, especificamente no período compreendido entre janeiro de 2015 a dezembro de 2050 e sob a influência de demandas previstas pelo modelo de crescimento exponencial abordado no capítulo 3. Através da análise desses modelos, busca-se compreender como as projeções climáticas e o crescimento das demandas influenciam diretamente a disponibilidade de água nessa região e suas implicações para o século atual. Isso possibilita a avaliação de padrões climáticos de longo prazo e tendências significativas que podem afetar a gestão de recursos hídricos.

5.3.3.1 Volume hídrico dos reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano

A Figura 57 mostra a simulação da operação do reservatório de Aracoiaba para os modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0, no período compreendido entre janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).

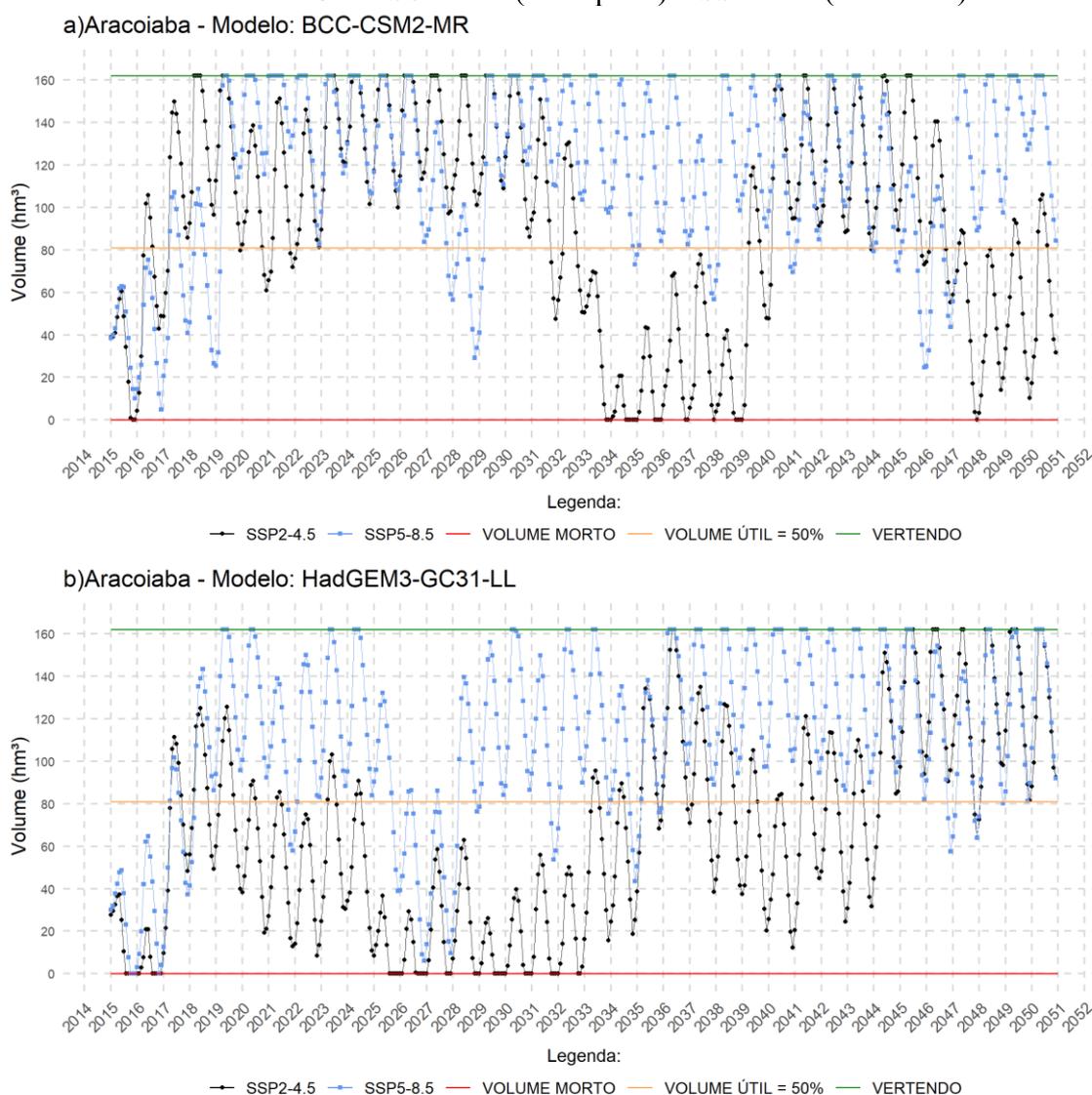
Para o reservatório de Aracoiaba, todos os modelos exibiram flutuações significativas no volume útil entre os cenários, com variações notáveis entre 0% e 100% do volume útil. No cenário SSP2-4.5, o reservatório Aracoiaba registrou os piores níveis de estoque, alcançando períodos nos quais o volume atingiu zero por aproximadamente 10,64%, 9,49%, 7,63% e 5,32% do tempo nos modelos HadGEM3-GC31-LL, MIROC6, MRI-ESM2-0 e BCC-CSM2-RM, respectivamente.

No cenário SSP5-8.5, as condições mais desfavoráveis de armazenamento foram apontadas pelos modelos MRI-ESM2-0, MIROC6, IPSL-CM6A-LR e HadGEM3-GC31-LL, com valores temporais mais reduzidos comparados aos do outro cenário analisado. Este cenário também apresentou o melhor aporte de água em três dos cinco modelos, atingindo volumes máximos e acionando a vertedoura por 23,37%, 19,21% e 16,89% do tempo nos modelos BCC-CSM2-RM, HadGEM3-GC31-LL e MIROC6, respectivamente.

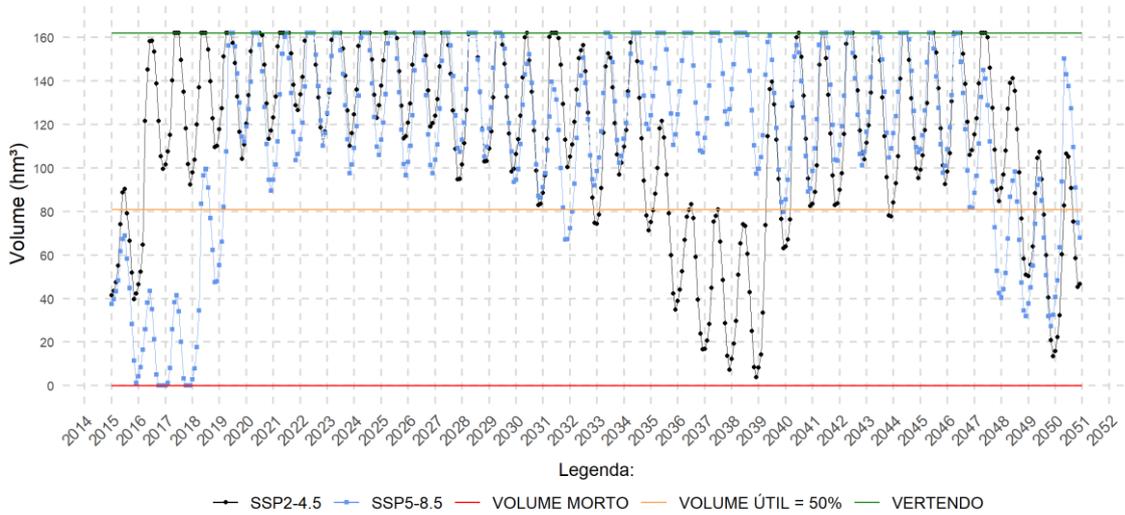
Falhas no atendimento das demandas de irrigação e abastecimento humano foram apontadas somente pelos modelos HadGEM3-GC31-LL e MIROC6. Para a demanda de abastecimento humano, este último apontou atendimento parcial (0-100%) em 4 meses no

cenário SSP2-4.5 ao passo que o HadGEM3-GC31-LL indicou 3 meses de atendimento parcial. Este apontou também falha no atendimento da demanda de irrigação, não atendendo-a totalmente (0%) em 3 meses no cenário SSP2-4.5 e atendendo-a parcialmente em 1 mês em ambos os cenários. O modelo da família HadGEM também apresentou falhas para as demandas da RMF, embora que em um percentual de tempo maior e considerando cenários diferentes, no estudo setorial do projeto FORTALEZA 2040 (Souza Filho, 2018).

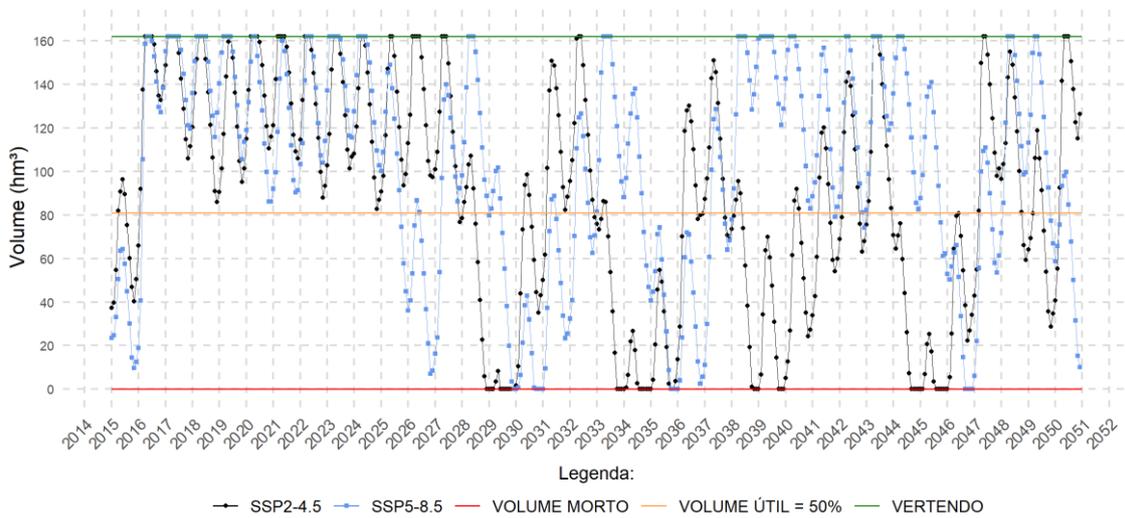
Figura 51 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório de Aracoiaba no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).



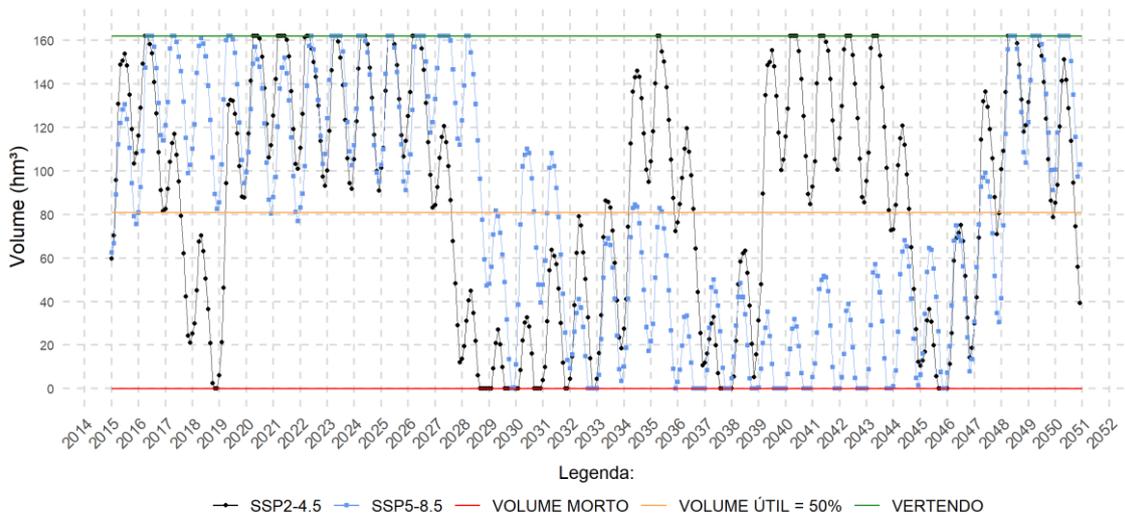
c) Aracoiaba - Modelo: IPSL-CM6A-LR



d) Aracoiaba - Modelo: MIROC6



e) Aracoiaba - Modelo: MRI-ESM2-0

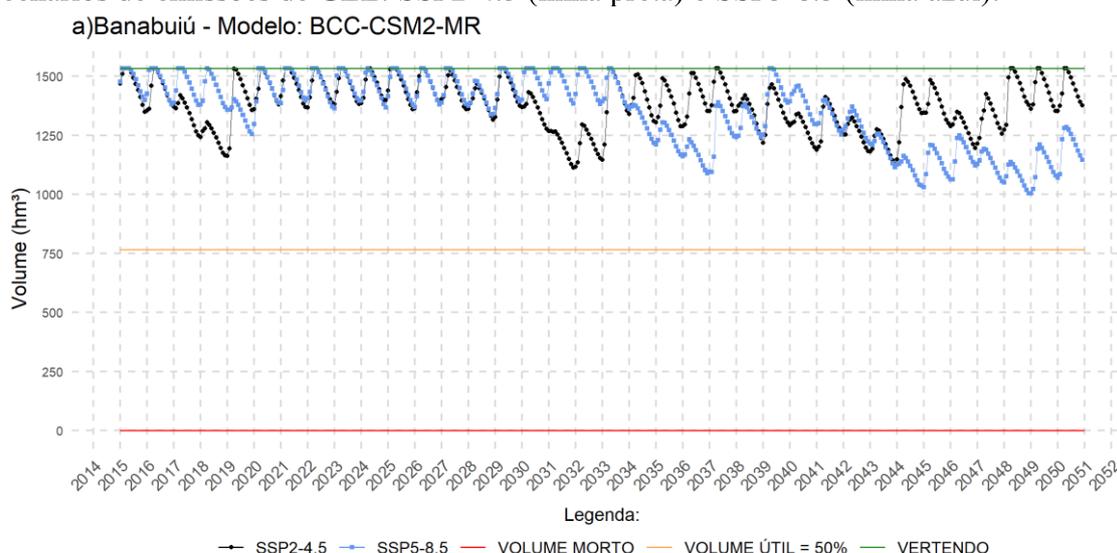


Fonte: Elaborado pelo autor.

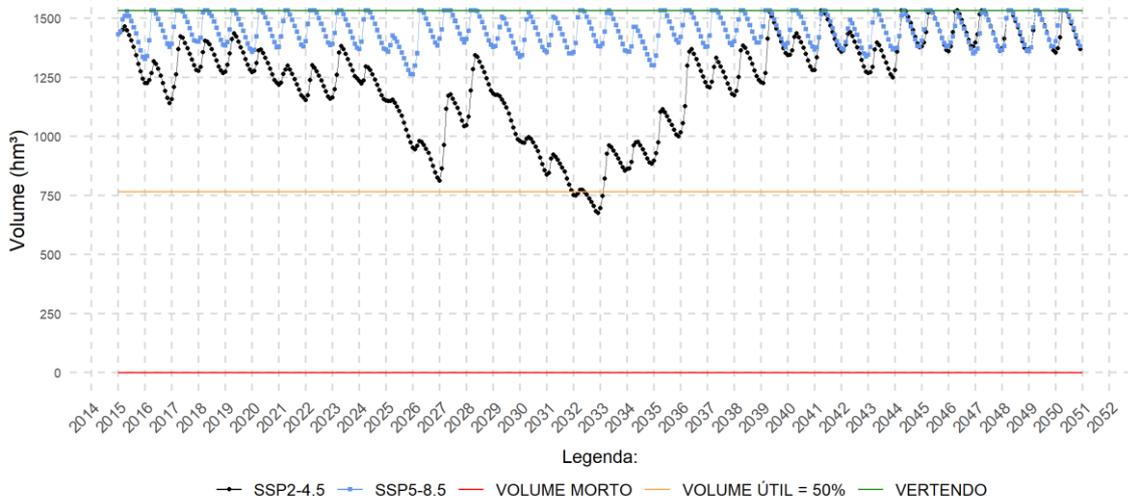
A Figura 58 mostra a simulação da operação do reservatório do Banabuiú para os modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0, no período compreendido entre janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).

Ao comparar os modelos em relação à variação do volume útil no reservatório do Banabuiú, observa-se que todos os modelos apresentaram um comportamento geral de oscilação acima de 50% do volume útil, indicando uma diminuição gradual na disponibilidade de água em alguns períodos, mas com a manutenção de níveis relativamente elevados na maior parte do período analisado. O modelo BCC-CSM2-RM apresentou uma melhor convergência entre os cenários, mesmo coexistindo com algumas flutuações, e apresentando-se com seu estoque acima de 65% do volume útil em todo o período analisado. Dentre todos os modelos este apresentou-se com o melhor aporte hídrico, atingindo a situação de vertimento em 7,63% do tempo para o cenário de menor emissão de GEE. Para o cenário SSP5-8.5, o HadGEM3-GC31-LL se destacou com 15,27% do tempo em que sua capacidade máxima foi atingida. O BCC-CSM2-RM veio em seguida apontando 11,34% do tempo. Os modelos não apontaram falhas no atendimento das demandas de irrigação, abastecimento humano e dessedentação animal em nenhum dos cenários analisados.

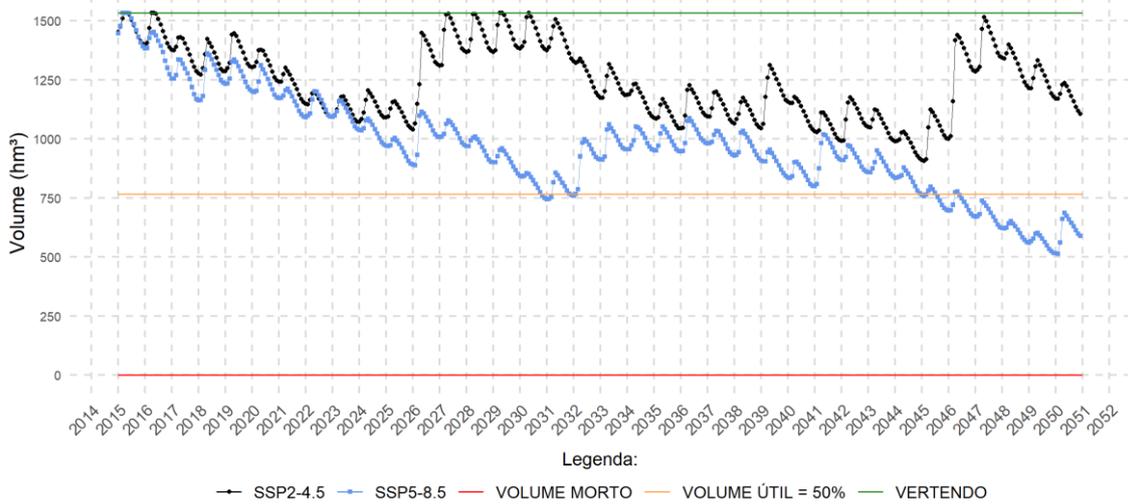
Figura 52 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Banabuiú no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).



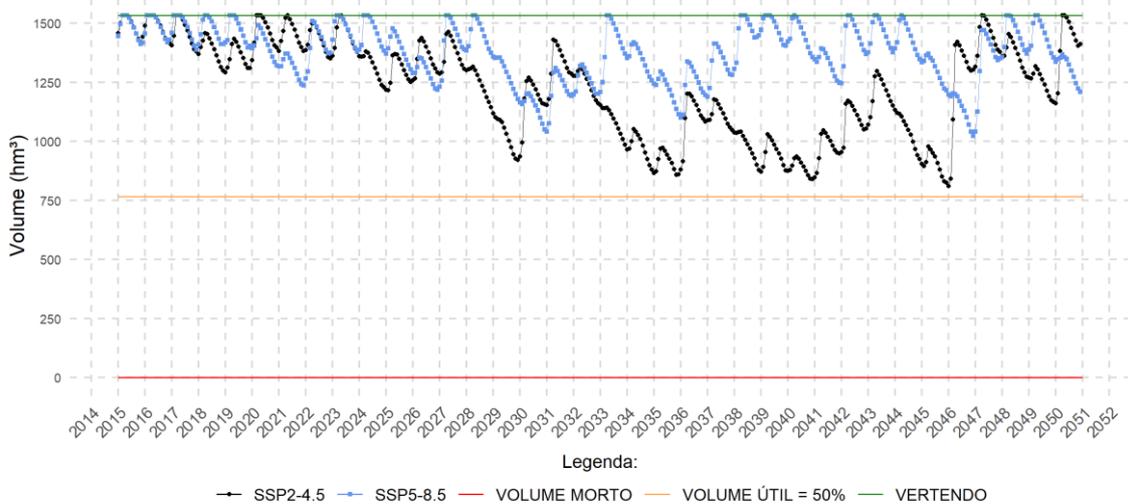
b) Banabuiú - Modelo: HadGEM3-GC31-LL

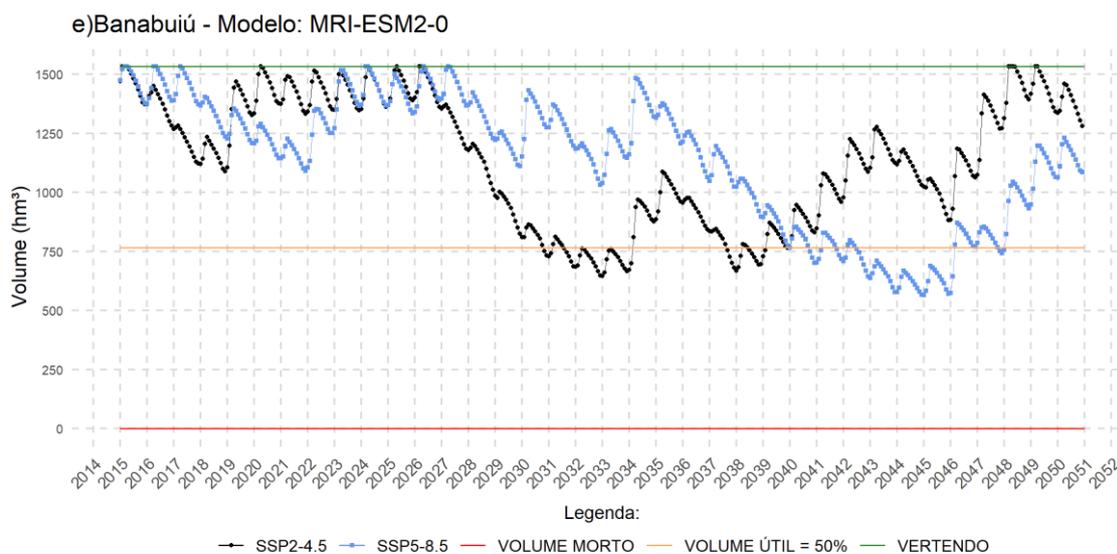


c) Banabuiú - Modelo: IPSL-CM6A-LR



d) Banabuiú - Modelo: MIROC6





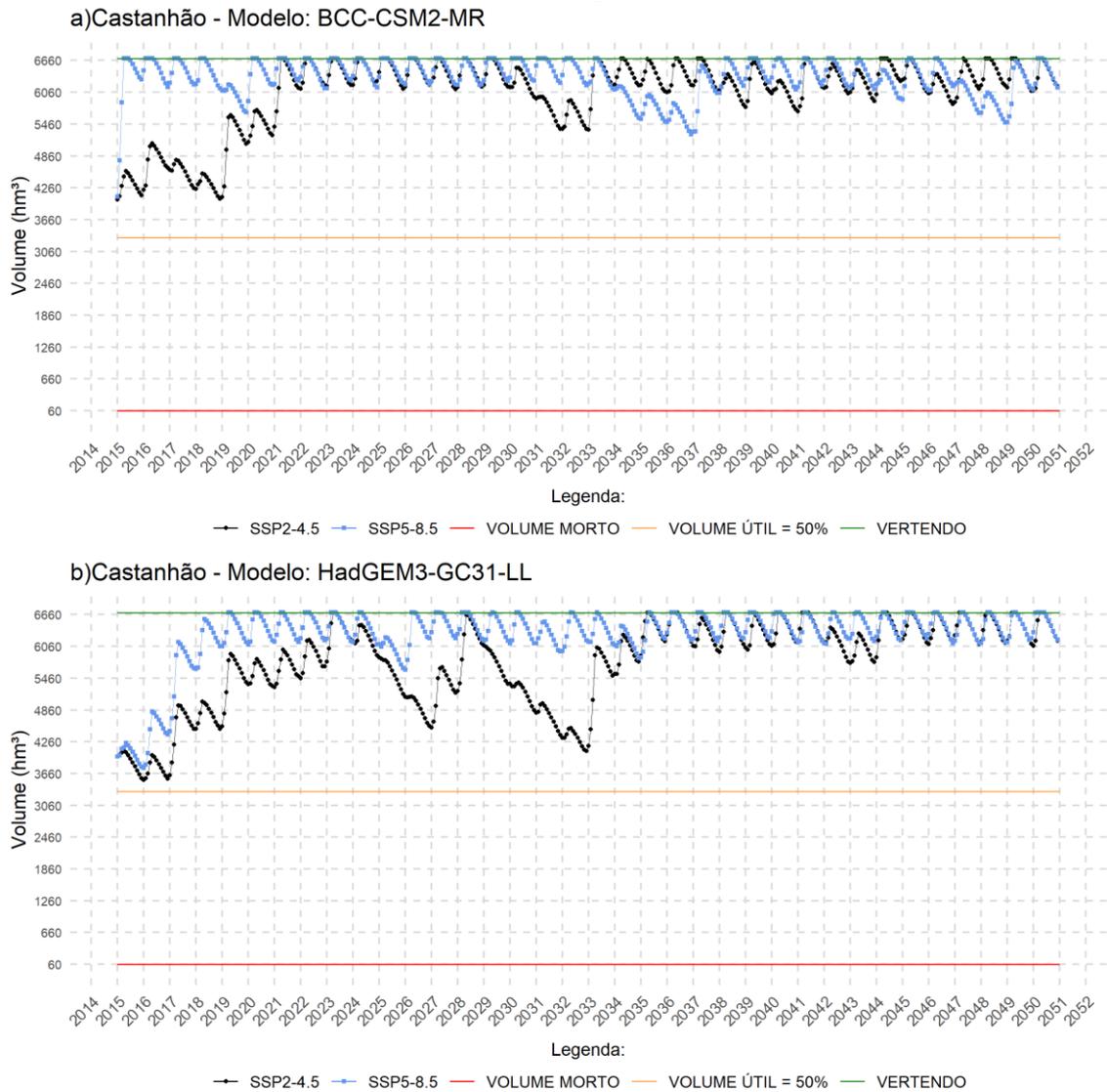
Fonte: Elaborado pelo autor.

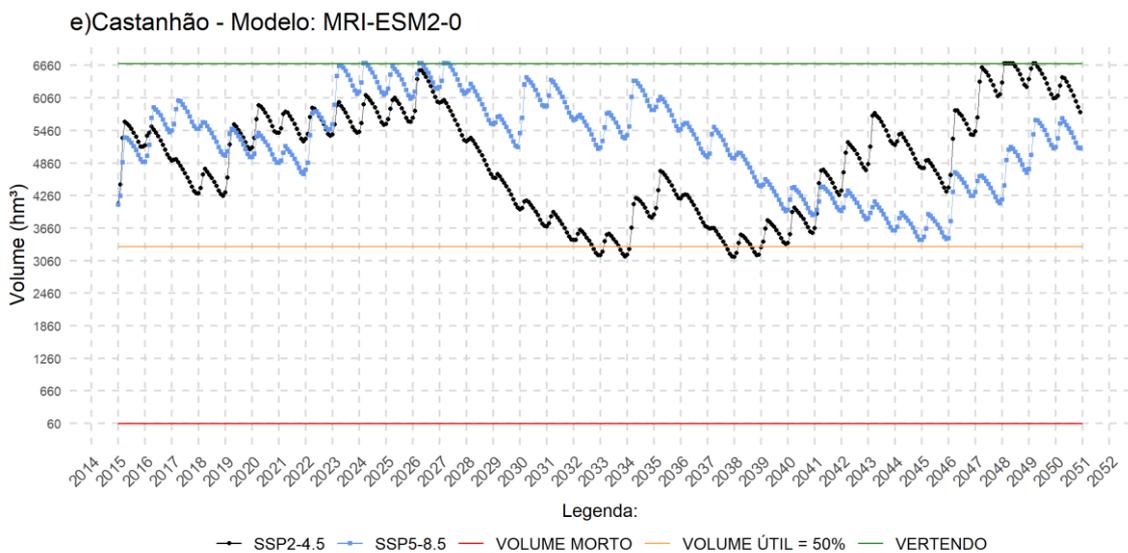
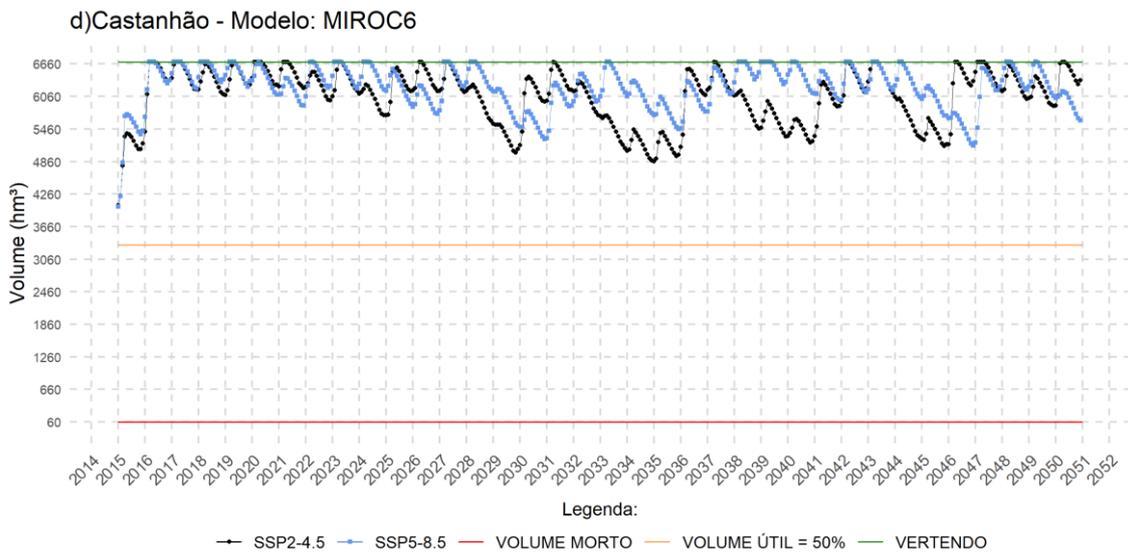
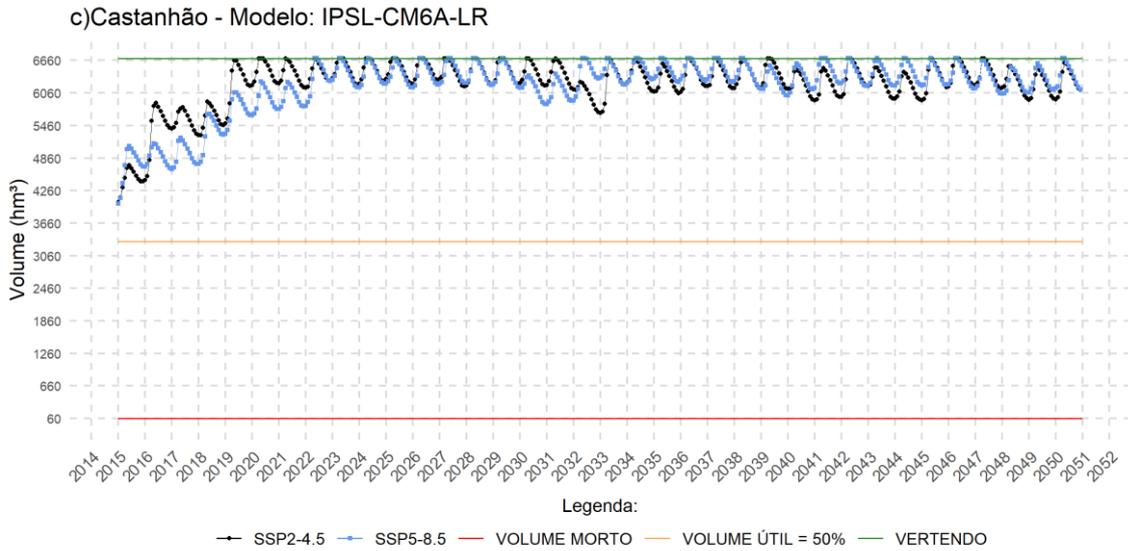
A Figura 59 mostra a simulação da operação do reservatório do Castanhão para os modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0, no período compreendido entre janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).

Ao analisar os modelos em relação à variação do volume útil no reservatório do Castanhão, observou-se um padrão comum de oscilação em quatro dos cinco modelos (excetuando-se o MRI-ESM2-0), se mantendo predominantemente acima de 50% da capacidade do reservatório. No geral, há uma diminuição gradual na disponibilidade de água em alguns períodos, observado principalmente no cenário SSP2-4.5, mas mantendo os níveis relativamente elevados na maior parte do tempo analisado. Diferente do que foi reportado para Banabuiú, aqui o modelo IPSL-CM6A-LR se destacou pela melhor convergência entre os cenários mesmo apresentando algumas flutuações nos anos iniciais, e mantendo seus estoques acima de 80% do volume útil durante a maior parte do período. Estes resultados concordam com os de Silveira (2014) que teve os modelos IPSL-CM5A-LR e o IPSL-CM5A-MR projetando um aumento da média anual de vazões na bacia do Castanhão, o que implica em um potencial aumento no volume hídrico do reservatório. Entretanto, neste estudo, novamente o BCC-CSM2-MR demonstrou o melhor desempenho em termos de aporte hídrico, alcançando a condição de vertimento em 11,57% e 20,13% do tempo nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente. De outra forma, o modelo MRI-ESM2-0 apresentou as maiores variações sazonais no volume útil dentre os demais modelos. Em ambos os cenários, não foram identificadas falhas nos modelos em atender às demandas de irrigação, abastecimento humano

e dessedentação animal.

Figura 53 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Castanhão no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).

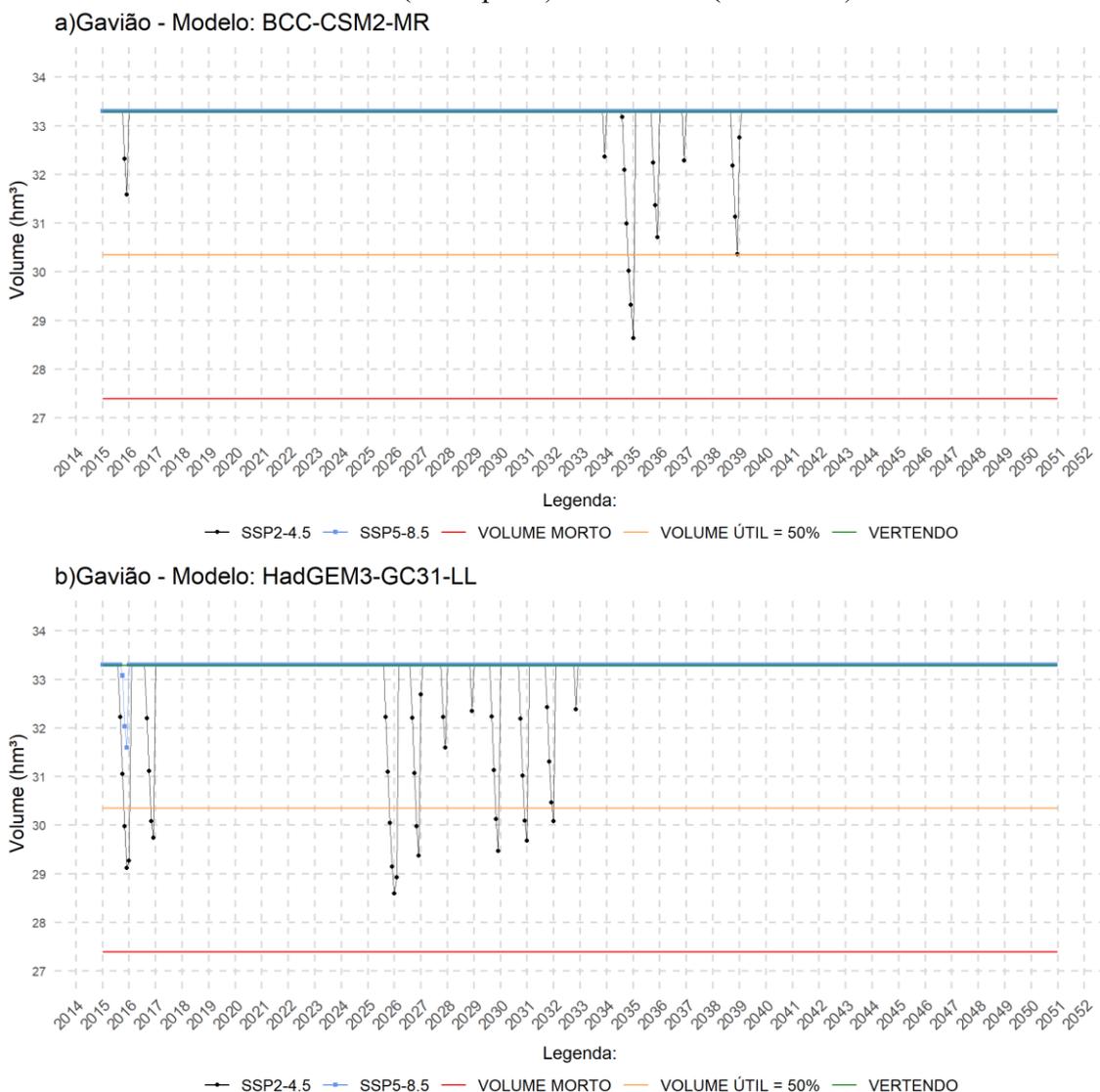




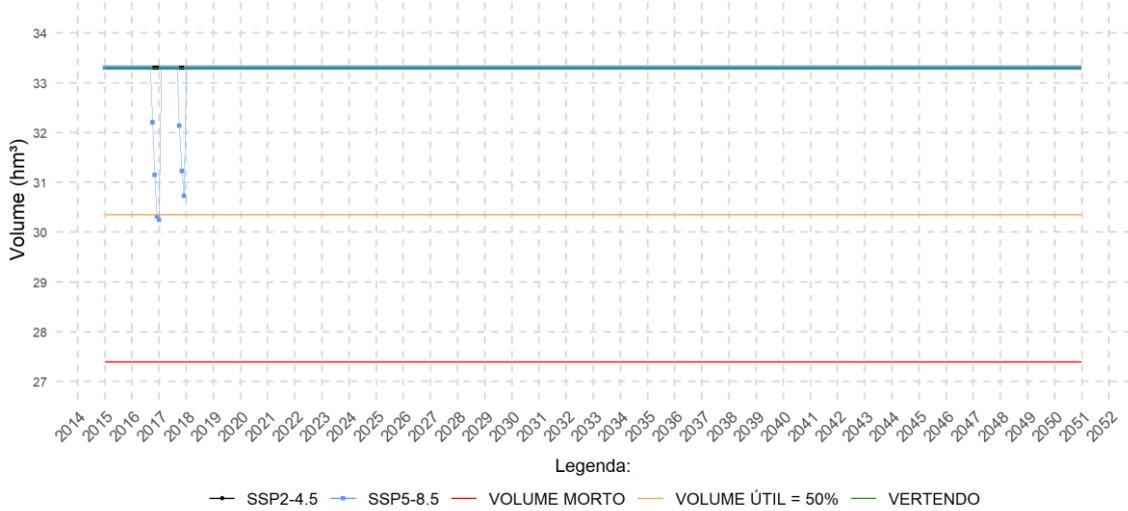
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 60 mostra a simulação da operação do reservatório Gavião para os modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0, no período compreendido entre janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).

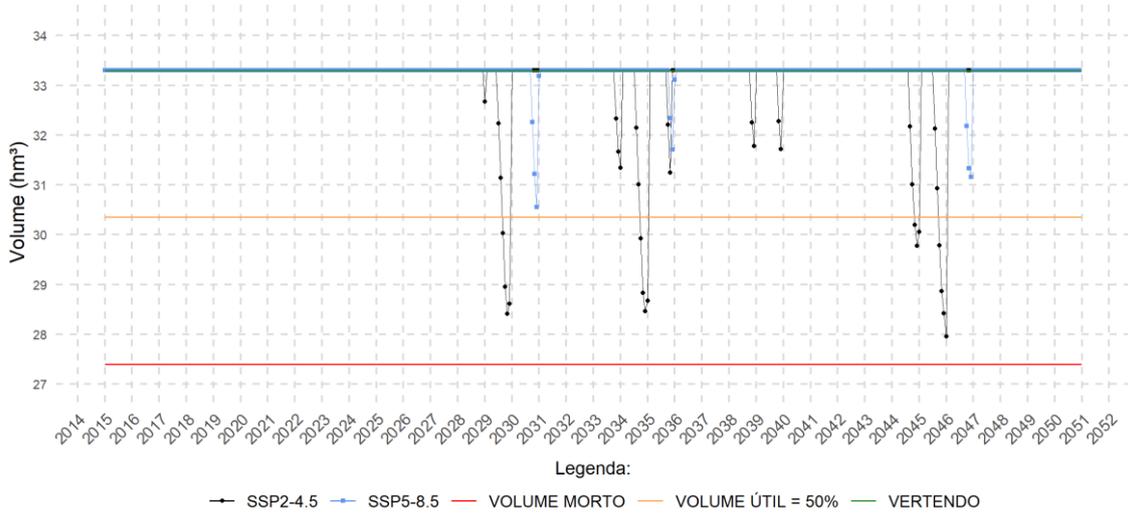
Figura 60 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Gavião no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).



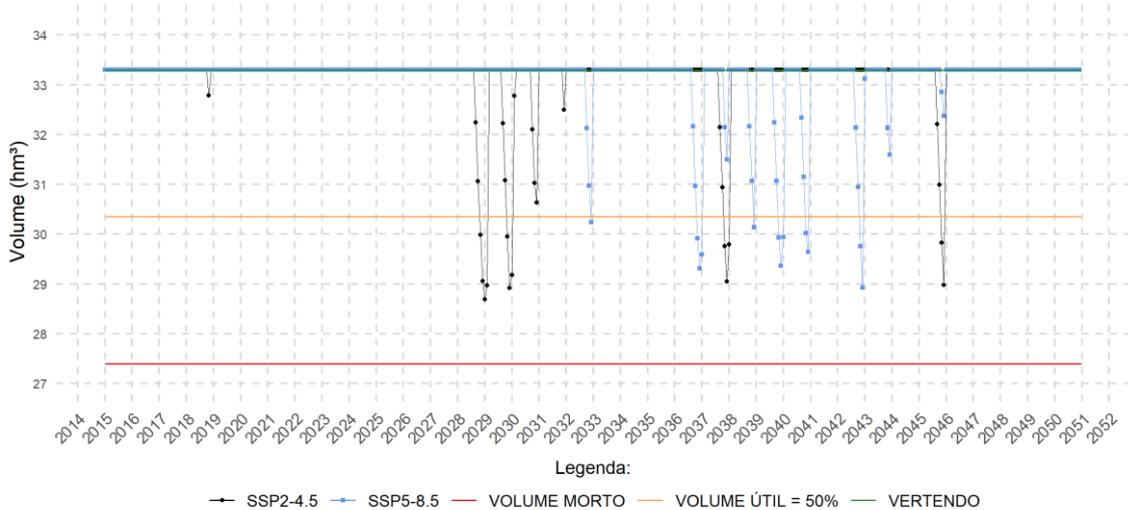
c) Gavião - Modelo: IPSL-CM6A-LR



d) Gavião - Modelo: MIROC6



e) Gavião - Modelo: MRI-ESM2-0



Fonte: Elaborado pelo autor.

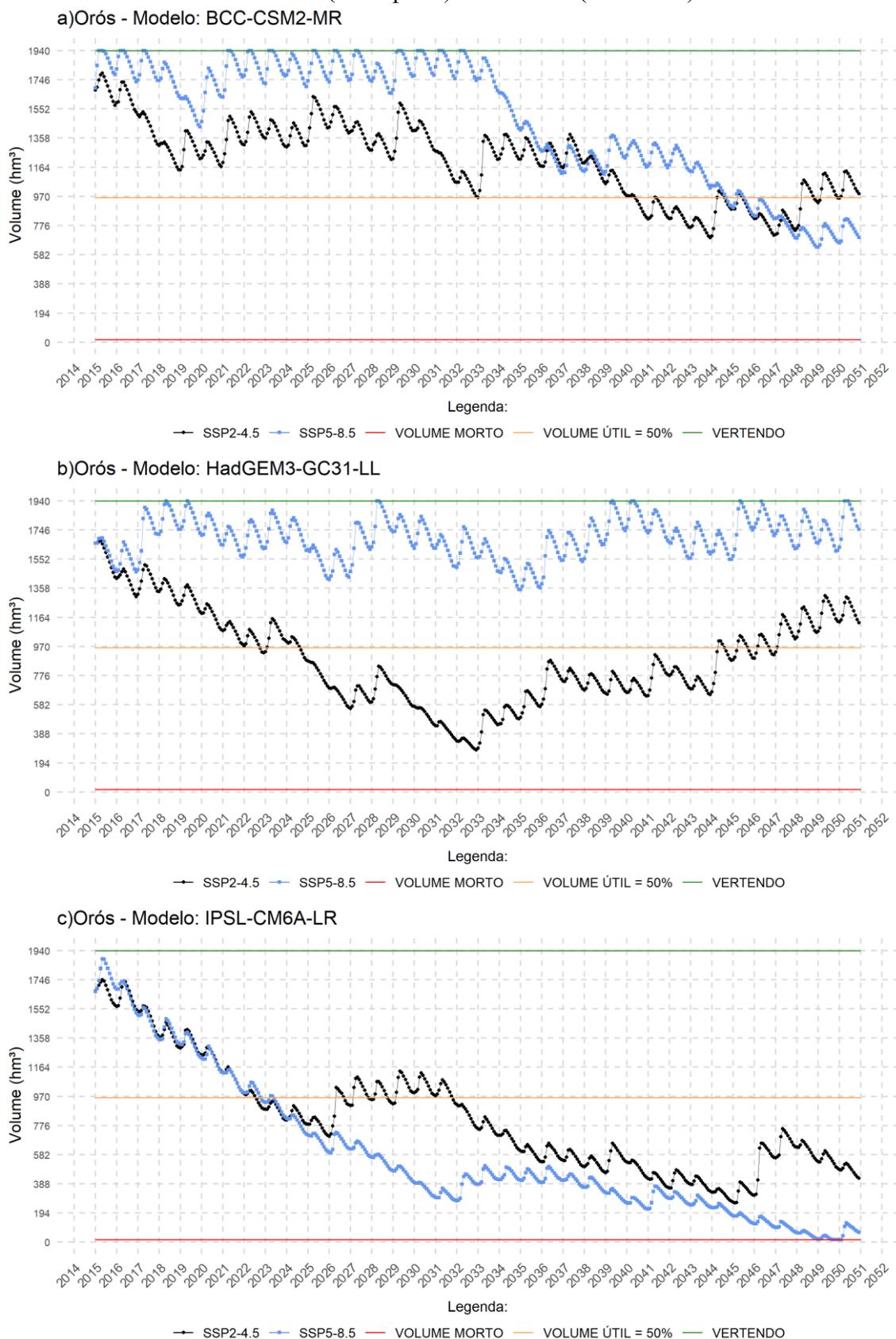
A comparação entre os cenários revelou que os modelos BCC-CSM2-MR e IPSL-CM6A-LR foram os únicos a indicar que o reservatório Gavião atingiu 100% de sua capacidade máxima durante todo o período avaliado nos cenários SSP5-8.5 e SSP2-4.5, respectivamente. O modelo IPSL-CM6A-LR também se destacou ao apresentar a menor quantidade de flutuações, observadas apenas no cenário SSP5-8.5. Isso sugere variações transitórias breves na disponibilidade de água, mantendo-se, em geral, com níveis acima de 50% da capacidade útil do reservatório e exibindo o melhor desempenho em termos de aporte hídrico. Em síntese, apesar das flutuações observadas nos demais modelos, lideradas em ocorrências pelos modelos HadGEM3-GC31-LL, MIROC6 e MRI-ESM2-0, principalmente no cenário SSP2-4.5, os modelos são consistentes ao indicar que o reservatório atingiu sua capacidade máxima e liberou água excedente na maior parte do período analisado. Tanto no cenário SSP2-4.5 quanto no cenário SSP5-8.5, os modelos não revelaram lacunas no atendimento das demandas relacionadas à indústria e abastecimento humano.

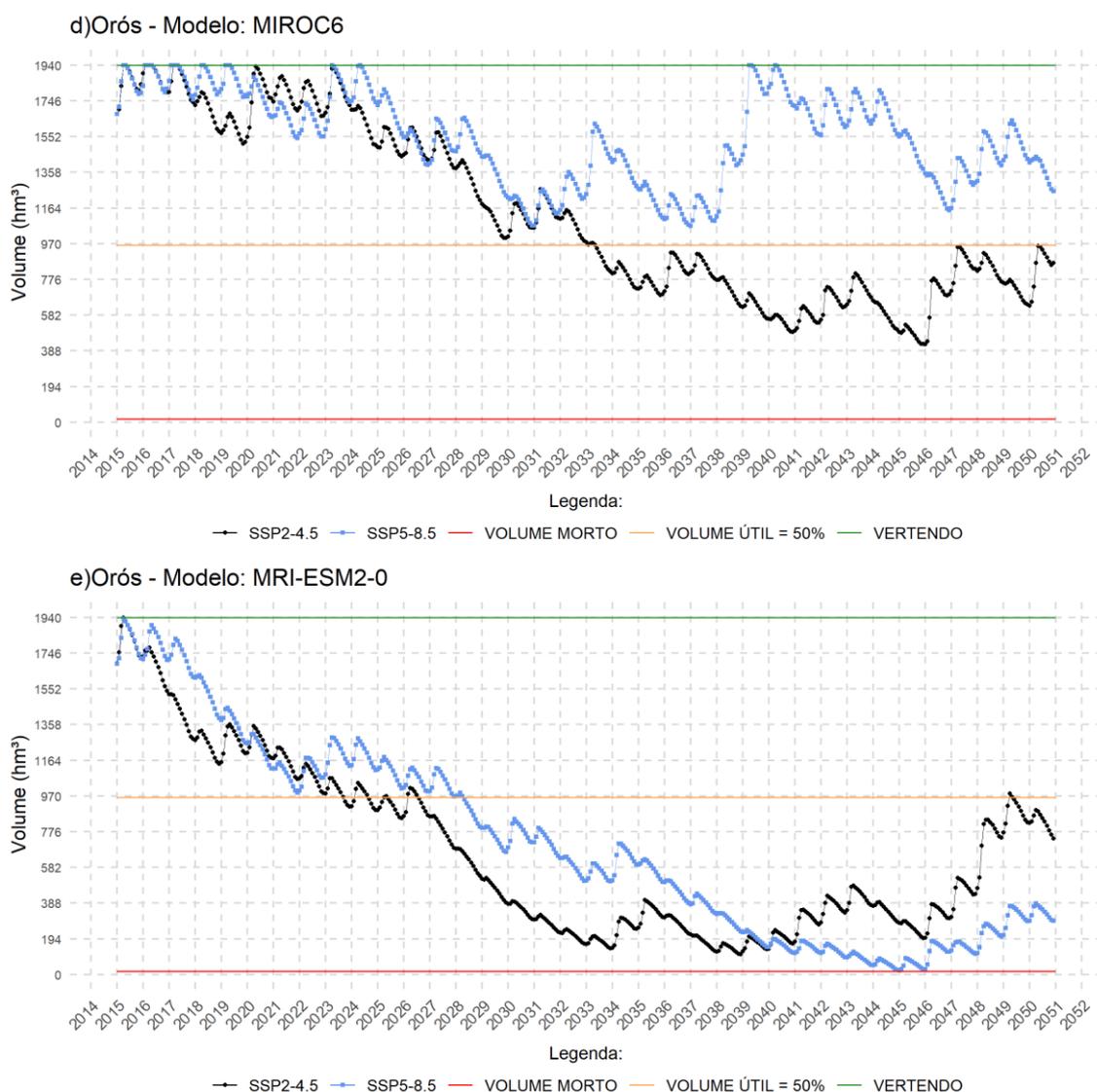
A Figura 61 mostra a simulação da operação do reservatório do Orós para os modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0, no período compreendido entre janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).

Para o reservatório do Orós, todos os modelos exibiram flutuações significativas no volume útil entre os cenários, com variações notáveis entre 0% e 100% da capacidade do reservatório. As condições mais desfavoráveis de armazenamento foram apontadas pelo modelo IPSL-CM6A-LR no cenário SSP5-8.5, em que o reservatório chegará a passar 6 meses com volume igual a zero. O melhor aporte de água foi identificado em dois dos cinco modelos, atingindo volumes máximos e acionando a vertedoura por 8,33% e 2,08% do tempo nos modelos MIROC6 e BCC-CSM2-RM e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente. No geral, há uma diminuição gradual na disponibilidade de água em alguns períodos, observado, principalmente, no cenário SSP2-4.5 pelos modelos HadGEM3-GC31-LL, MIROC6 e MRI-ESM2-0. Aqui o modelo MRI-ESM2-0 se mostrou mais estável, convergindo entre os cenários mesmo apresentando variações sazonais.

Falhas no atendimento das demandas de irrigação e abastecimento humano foram apontadas somente no cenário SSP5-8.5 e pelo modelo IPSL-CM6A-LR. Para a demanda de abastecimento humano e irrigação, este apontou atendimento parcial (0-100%) em 2 meses. De outra forma, as demandas de abastecimento humano e irrigação não foram atendidas (0%) em 2 e 4 meses, respectivamente.

Figura 54 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Orós no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).



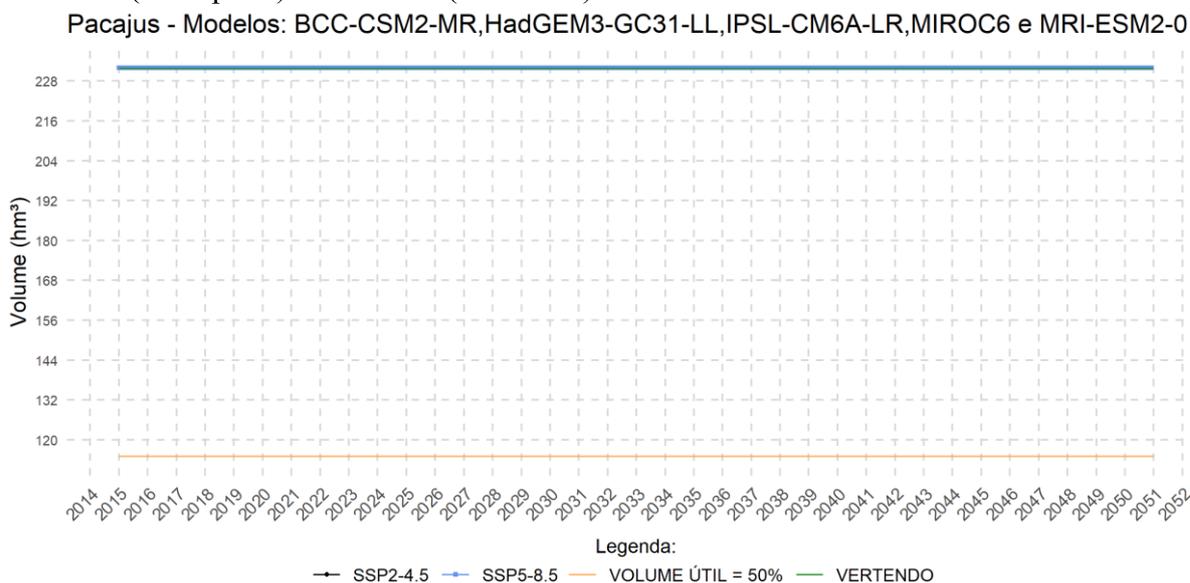


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 62 mostra a simulação da operação do reservatório Pacajus para os modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0, no período compreendido entre janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).

A análise comparativa entre os cenários, revelou que todos os modelos convergiram quanto ao volume útil do Pacajus, indicando que estava em 100% de sua capacidade máxima durante todo o período analisado nos cenários SSP5-8.5 e SSP2-4.5. Durante o período observado, o volume útil do reservatório do Pacajus permaneceu constante em 232 hm³, sempre se mantendo em um nível de vertimento. Essa análise indica que o reservatório estava constantemente liberando água durante todo o período registrado. Tanto no cenário SSP2-4.5 quanto no cenário SSP5-8.5, os modelos não apresentaram lacunas no cumprimento das demandas relacionadas à indústria e abastecimento humano.

Figura 55 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 para o reservatório de Pacajus no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).



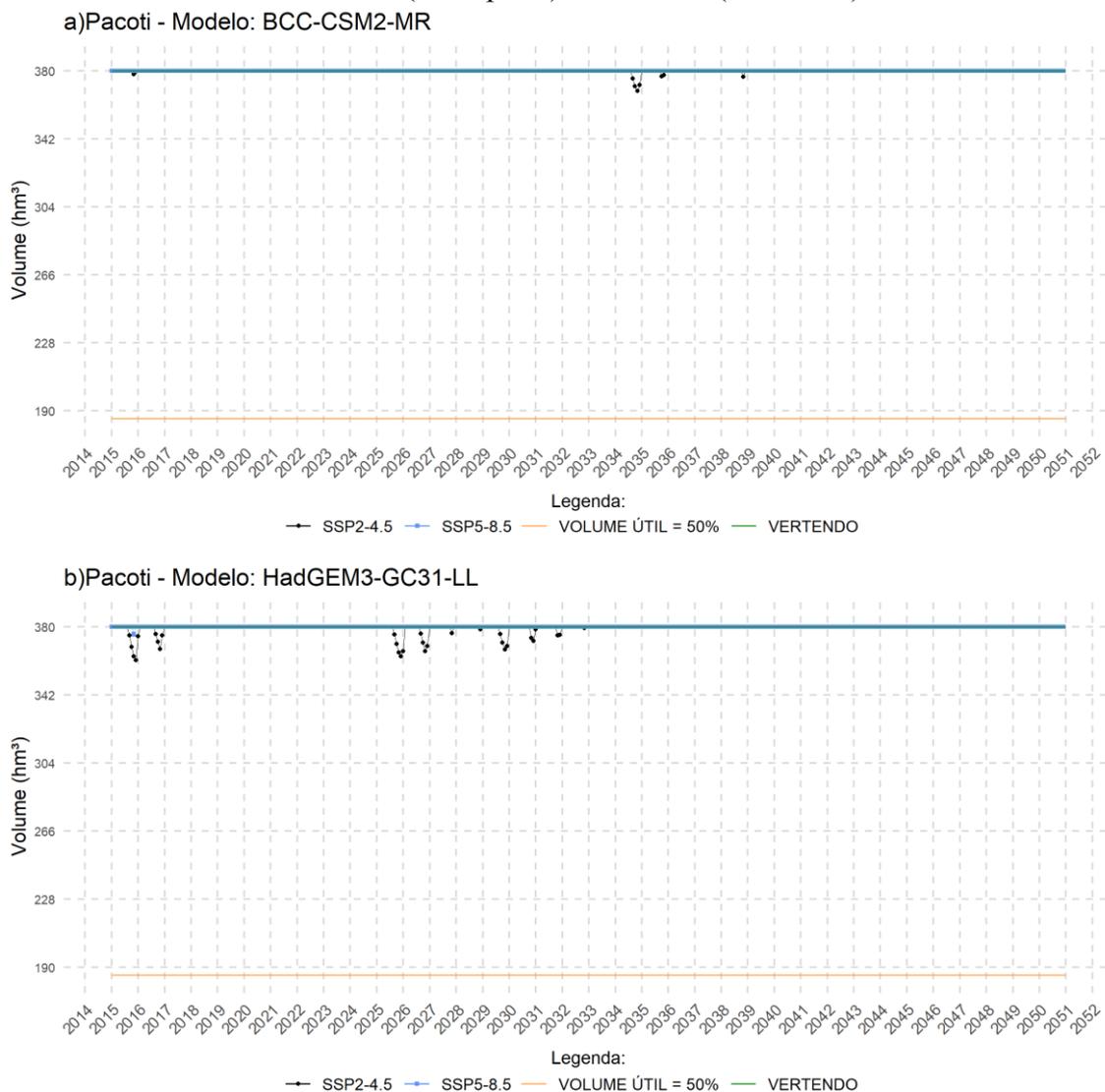
Fonte: Elaborado pelo autor.

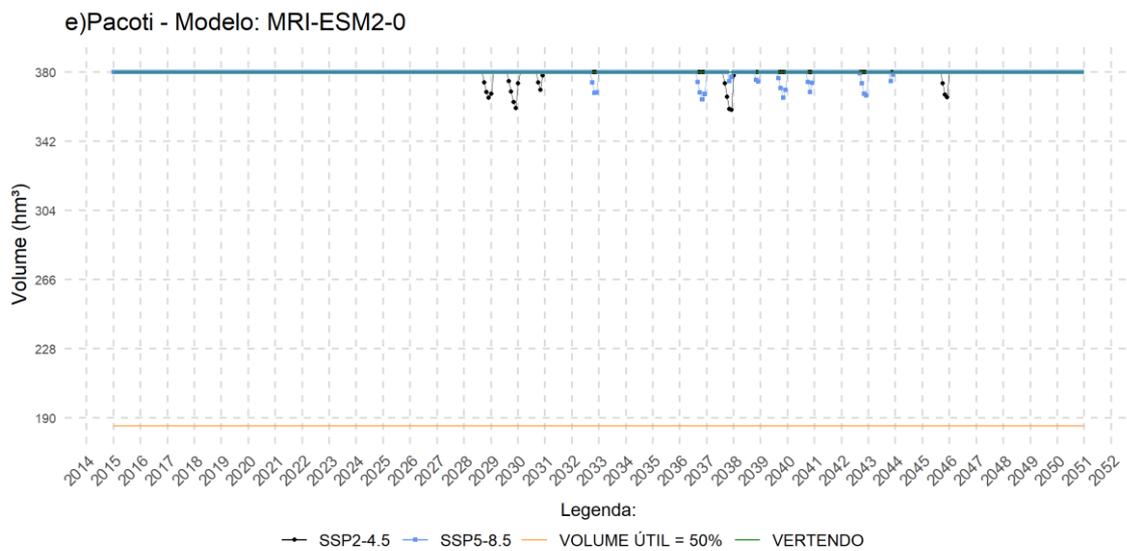
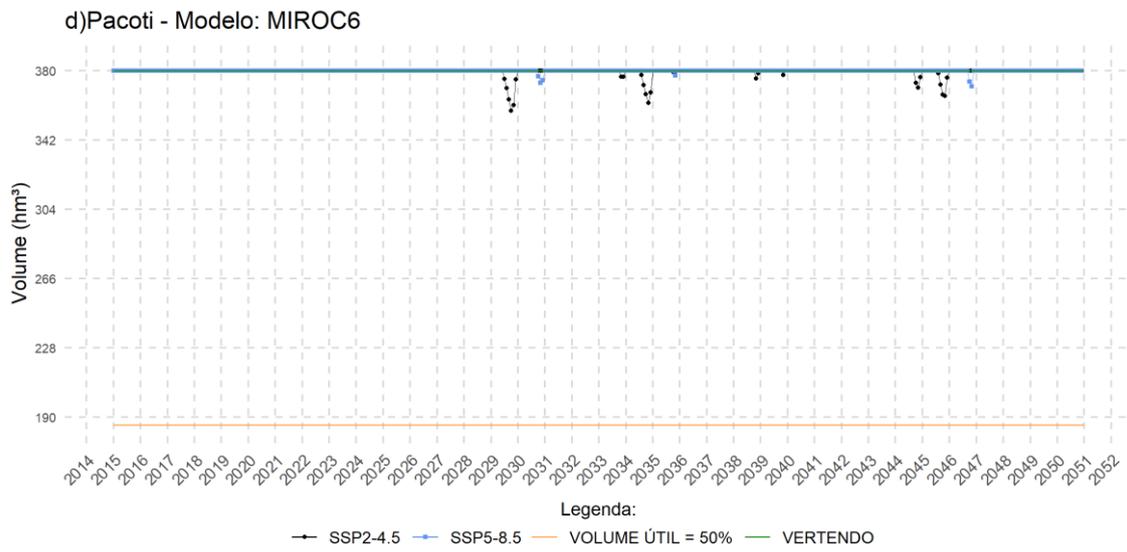
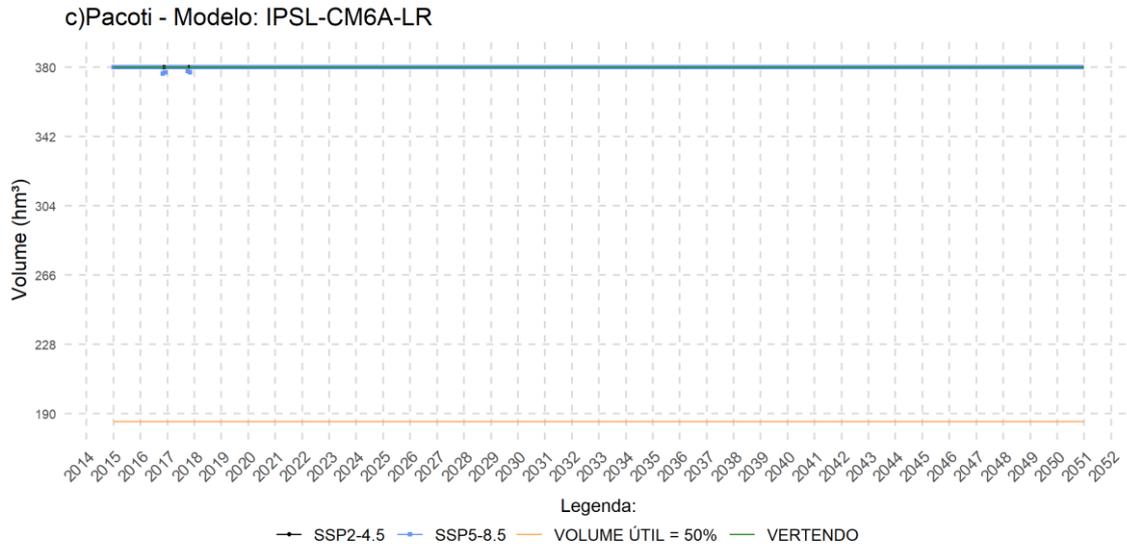
As Figuras 63 e 64 mostram a simulação da operação dos reservatórios Pacoti e Riachão, respectivamente, para os modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0, no período compreendido entre janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).

A análise comparativa entre os cenários, revelou que os modelos BCC-CSM2-MR e IPSL-CM6A-LR foram os únicos que indicaram que o volume útil de ambos os reservatórios estavam em 100% de sua capacidade máxima durante todo o período analisado nos cenários SSP5-8.5 e SSP2-4.5, respectivamente. O modelo IPSL-CM6A-LR foi o único também que apresentou a menor quantidade de flutuações e apenas para o cenário SSP5-8.5, sugerindo curtas variações transitórias na disponibilidade de água, mas mantendo-se, no geral, com níveis próximos ou iguais à capacidade máxima dos reservatórios e com o melhor desempenho em termos de aporte hídrico em ambos os cenários. Em resumo, apesar das flutuações apresentadas pelos demais modelos, estes são consistentes em indicar que os reservatórios atingiram sua capacidade máxima e estava liberando água excedente na maior parte do período analisado. Tanto no cenário SSP2-4.5 quanto no cenário SSP5-8.5, os modelos não apresentaram lacunas no cumprimento das demandas relacionadas à indústria e abastecimento humano. Estes resultados são concordantes com os de Silveira *et al.* (2014), que apresentou um maior número

de modelos, com destaque também para o IPSL-CM5A-MR, indicando aumento da vazão média anual e implicando em um potencial aumento no volume hídrico dos reservatórios da RMF em comparação com as demais bacias em estudo.

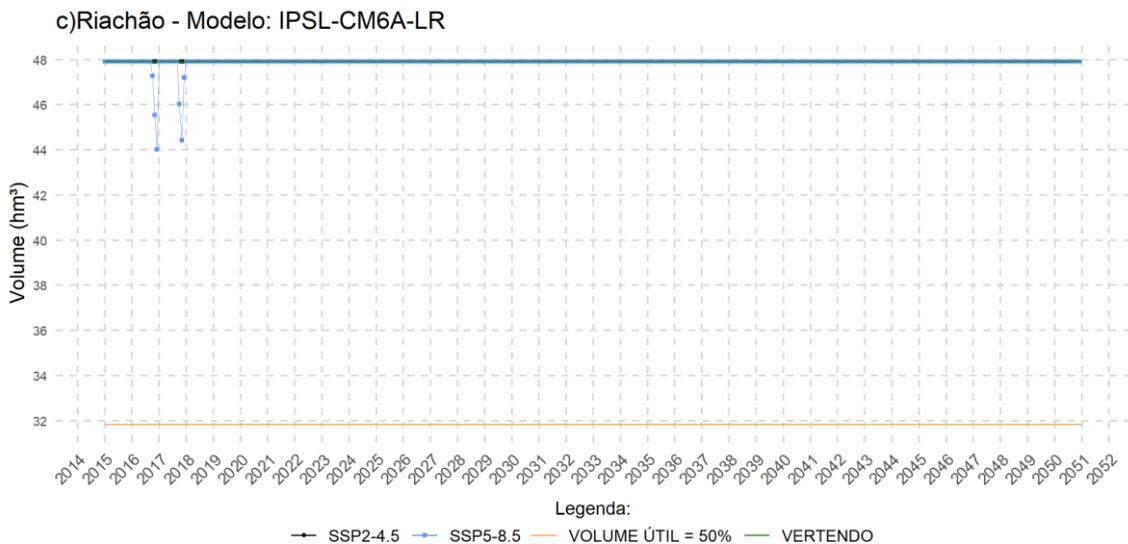
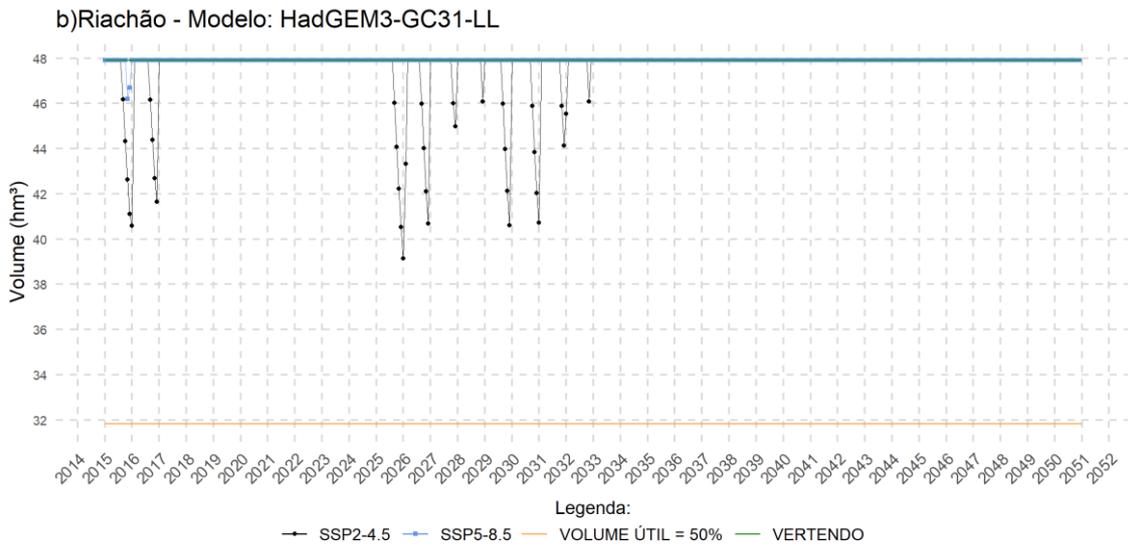
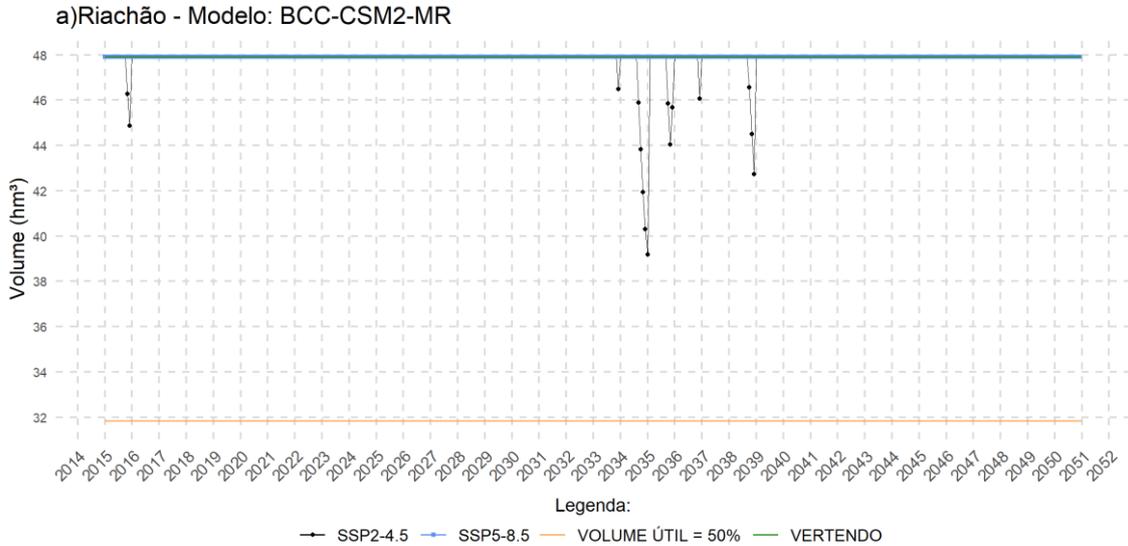
Figura 56 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório de Pacoti no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).

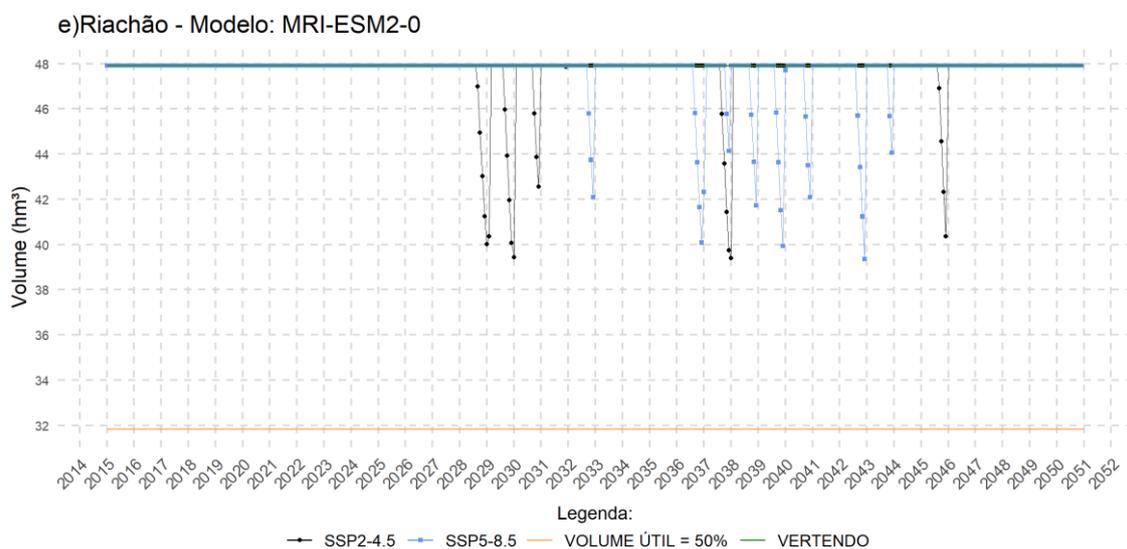
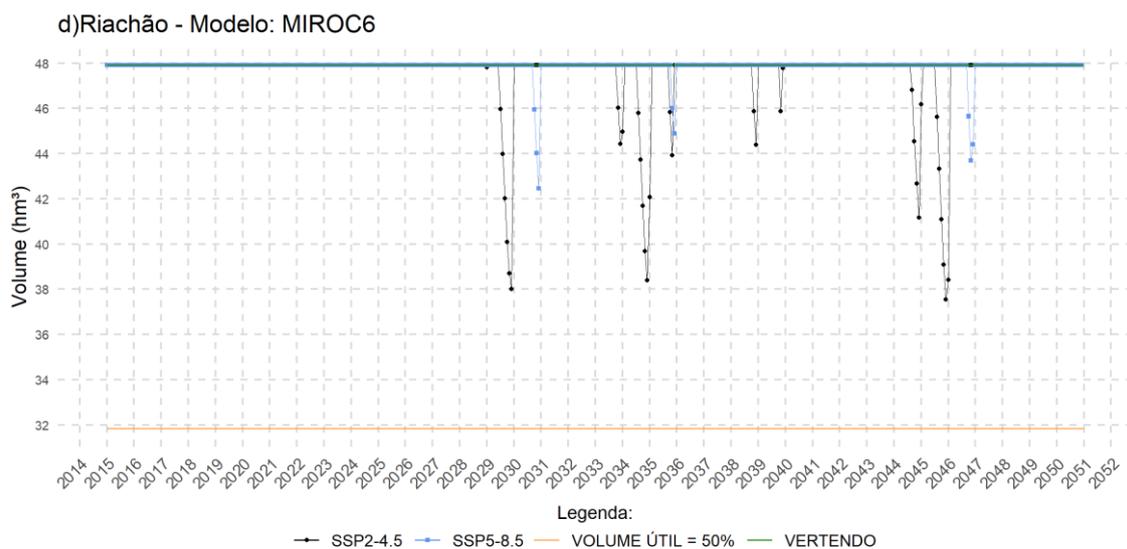




Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 57 - Volume hídrico simulado pelo SIGA pelos modelos (a) BCC-CSM2-MR, (b) HadGEM3-GC31-LL, (c) IPSL-CM6A-LR, (d) MIROC6 e (e) MRI-ESM2-0 para o reservatório do Riachão no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050, para os dois cenários de emissões de GEE: SSP2-4.5 (linha preta) e SSP5-8.5 (linha azul).

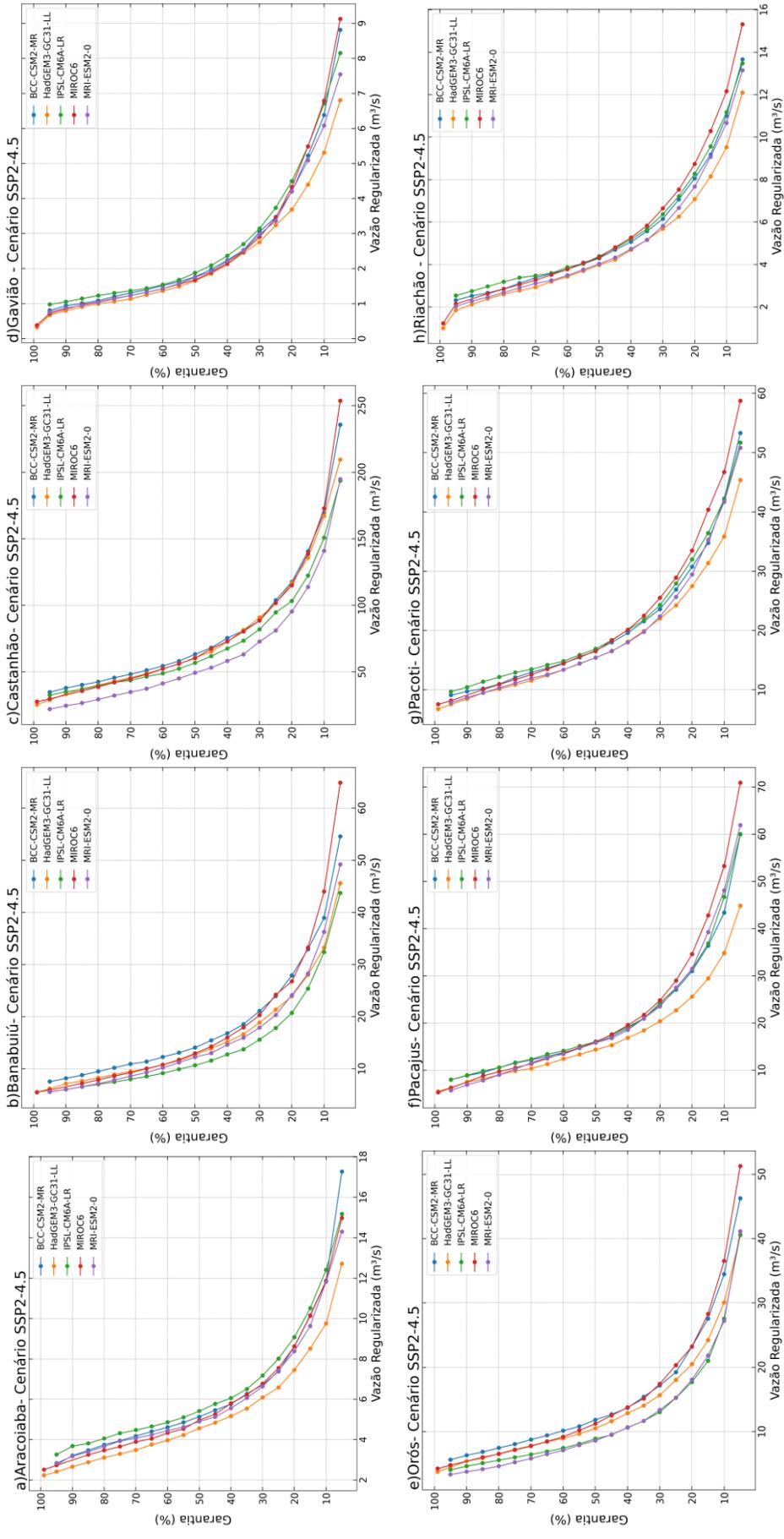




Fonte: Elaborado pelo autor.

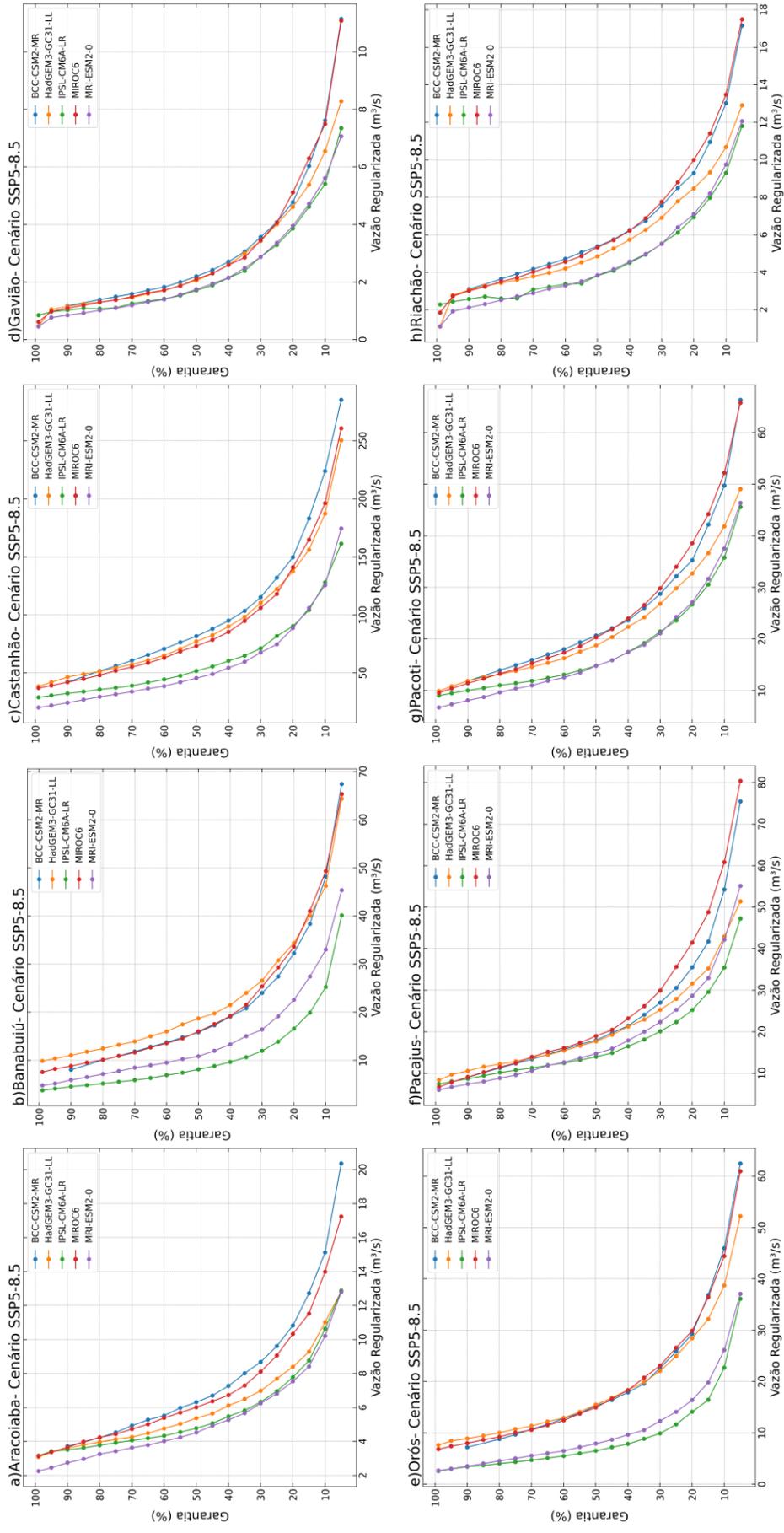
As Figuras 65 e 66 apresentam a relação entre as porcentagens de garantias associadas a diferentes valores de vazão regularizada em m^3/s para todos os modelos, nos oito reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano, no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2050 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente.

Figura 58 - Garantias de oferta hídrica associadas a diferentes valores de vazão para todos os modelos (BCC-CSM2-RM, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0) nos reservatórios (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão no cenário SSP2-4.5.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59 - Garantias de oferta hídrica associadas a diferentes valores de vazão para todos os modelos (BCC-CSM2-RM, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0) nos reservatórios (a) Aracoiaba (b) Banabuiú (c) Castanhão (d) Gavião (e) Orós (f) Pacajus (g) Pacoti (h) Riachão no cenário SSP5-8.5.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados mostraram flutuações e diferenças nas vazões entre os modelos em diferentes níveis de garantia e nos dois cenários. Conforme a garantia diminui de 99% para 5%, observa-se um aumento gradual na vazão regularizada em todos os modelos avaliados e de forma mais significativa para o cenário SSP5-8.5. Observa-se que, em geral, para o cenário SSP2-4.5, o modelo MIROC6 tende a ter vazões mais altas em comparação ao IPSL-CM6A-LR em grande parte dos reservatórios que compõem a RMF – à medida que as condições de garantia são reduzidas. No cenário SSP5-8.5, isto se repete, mas somente nos reservatórios de Pacajus, Pacoti e Riachão.

Em Banabuiú, Castanhão e Orós no contexto do cenário SSP2-4.5, o MIROC6 também se destacou com as maiores vazões em condições de garantia reduzida – resultados concordantes com o aumento na disponibilidade de água para os reservatórios do JMS (Jaguaribe, Metropolitano e Salgado) através da análise do Q90 realizada por Estácio (2020), e que também teve o MIROC6 sugerindo uma maior sensibilidade às variações na garantia destes reservatórios e neste cenário, ao passo que, no Castanhão para o cenário SSP5-8.5, o modelo BCC-CSM2-MR teve vazões superiores em condições de garantia reduzida. Em Banabuiú e Orós, os modelos BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 apresentaram comportamento semelhante apontando as maiores vazões regularizadas.

5.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo, foi realizada uma análise abrangente das simulações de volume hídrico, atendimento de demandas e garantia da oferta hídrica com base em dados observacionais e modelos do CMIP6 no Hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano. A análise abrangente das métricas de validação revelou que o modelo SIGA apresentou um desempenho sólido na simulação dos volumes acumulados mensais do sistema hídrico em estudo. Altos valores de coeficiente de correlação, valores significativos de R^2 e valores aceitáveis para PBIAS e NSE fortaleceram a confiança na capacidade do modelo em replicar as dinâmicas hidrológicas observadas.

Os resultados revelaram variações nos níveis de água dos reservatórios ao longo das décadas, com momentos de escassez intercalados por períodos de disponibilidade. Alguns reservatórios mantiveram padrões consistentes de liberação de água, enquanto outros mostraram flutuações sazonais. No entanto, é importante notar que alguns reservatórios apresentaram uma tendência de diminuição gradual em seus volumes em certo ponto, levantando preocupações sobre o abastecimento de água. Em períodos de baixa garantia, os reservatórios liberam vazões mais altas, refletindo uma gestão flexível. A relação entre garantia e vazão não é linear, indicando estratégias específicas de gestão. À medida que a garantia se aproxima de 100%, a vazão regularizada tende a se estabilizar.

Para as simulações obtidas a partir a partir do experimento *historical* dos modelos participantes do CMIP6, também foram identificadas variações significativas no volume útil dos reservatórios no período compreendido entre janeiro de 1985 a dezembro de 2014. Para Aracoiaba, os modelos exibiram flutuações distintas, com o MRI-ESM2-0 sendo o mais pessimista. Em Banabuiú, quatro modelos apresentaram oscilações acima de 50%, com variações na frequência e duração. Castanhão revelou padrões variados, destacando a sensibilidade do MRI-ESM2-0. No Gavião, o BCC-CSM2-MR indicou vertimento frequente, e todos os modelos registraram quedas no volume útil, indicando diversas estratégias de gestão. Para Orós, o MRI-ESM2-0 e IPSL-CM6A-LR mostraram sensibilidade às variações, enquanto HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 mantiveram níveis mais estáveis. BCC-CSM2-MR revelou uma queda gradual, sendo o modelo mais pessimista. Na análise de Pacajus, os modelos indicaram consistência na capacidade máxima e vertimento, exceto o BCC-CSM2-MR, que mostrou flutuações transitórias. Pacoti revelou sensibilidade no MRI-ESM2-0 e MIROC6, com o primeiro sendo mais pessimista. BCC-CSM2-MR e HadGEM3-GC31-LL mantiveram

estabilidade. Para Riachão, os modelos apresentaram padrões distintos, destacando respostas únicas e ressaltando a importância de considerar a variabilidade na gestão dos recursos hídricos.

O modelo BCC-CSM2-MR foi o único que revelou variações notáveis na satisfação das demandas hídricas ao longo do período analisado para alguns dos reservatórios analisados. Em Aracoiaba, o modelo demonstrou eficiência ao atender plenamente à demanda de abastecimento humano. No entanto, em Banabuiú e Orós, mostrou variações significativas, especialmente na irrigação, indicando uma sensibilidade do modelo às flutuações na disponibilidade hídrica. O Castanhão teve suas necessidades totalmente atendidas, enquanto Gavião enfrentou desafios na demanda industrial. Pacajus, Pacoti e Riachão tiveram 100% de satisfação nas demandas de abastecimento humano e indústria segundo todos os modelos. Essa resposta diferenciada destaca a necessidade de considerar as características específicas de cada reservatório ao avaliar o desempenho dos modelos na gestão de recursos hídricos. Os dados mostram flutuações nas vazões entre modelos em diferentes garantias. O modelo BCC-CSM2-RM tende a ter vazões mais altas na RMF. À medida que a garantia diminui, há um aumento gradual na vazão regularizada. O modelo MIROC6 destacou-se em Banabuiú e Orós em garantias reduzidas, enquanto no Castanhão, HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 apresentaram comportamento semelhante. Essas variações podem ser influenciadas por múltiplos fatores, como complexidade dos modelos e características da bacia hidrográfica.

Os modelos de simulação para os reservatórios Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus, Pacoti e Riachão, sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, mostraram variações significativas nos volumes úteis quando submetidos às séries de demandas futuras. Esses resultados evidenciam a complexidade das interações entre os modelos climáticos e os reservatórios, ressaltando a necessidade de considerar essas nuances ao planejar o gerenciamento de recursos hídricos na região. Uma gestão cuidadosa e adaptativa dos recursos hídricos é essencial para lidar com essa variabilidade e garantir um suprimento confiável de água para as diversas necessidades. Essa informação é fundamental para o planejamento e gestão dos recursos hídricos da região que abrange o hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano, pois pode ajudar a determinar como os reservatórios respondem às variações nas condições climáticas e como eles podem ser usados de forma mais eficiente para atender às necessidades da comunidade, da agricultura e de outros setores dependentes de água.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao longo deste estudo, foram utilizadas metodologias avançadas e diversas ferramentas de análise para avaliar os impactos das ações humanas e dos fenômenos climáticos no Sistema Jaguaribe-Metropolitano. Por meio da análise estatística descritiva, da investigação das variabilidades sazonal, interanual e decadal, além do uso de indicadores como o SPI e o SRI, foi possível compreender melhor os padrões de precipitação e vazão. Como resultado, observou-se que eventos extremos de secas e chuvas já são uma realidade e podem se tornar mais frequentes no futuro. Além disso, verificou-se a possível influência dos fenômenos climáticos, como o ENOS, a ODP e a OMA, juntamente com a resposta da anomalia de TSM, nos padrões de precipitação no estado do Ceará. Esses resultados destacam a importância de monitorar esses eventos climáticos para subsidiar o planejamento, previsão e mitigação dos efeitos de secas intensas na região, bem como o avanço dessas secas pode impactar setores agrícolas e hidrológicos. Essas informações fornecem a base para tomadas de decisão diante das variações sazonais e interanuais frequentes do clima.

Adicionalmente, Modelos estatísticos como ETS, com diversas configurações de parâmetros, foram empregados para projetar a demanda hídrica futura considerando diferentes cenários de crescimento populacional, industrial e de irrigação. As projeções dos modelos revelaram um aumento contínuo da demanda hídrica nas bacias dos açudes de Aracoiaba, Banabuiú, Castanhão, Gavião, Orós, Pacajus e Riachão, relacionado ao abastecimento humano. Esse aumento é impulsionado pelo crescimento populacional, urbanização, aumento do consumo per capita e pela falta de medidas adequadas de gestão e conservação dos recursos hídricos. Essas projeções destacam a necessidade urgente de adotar medidas para garantir a disponibilidade de água no futuro, enfrentando o desafio do aumento constante da demanda. É fundamental investir em alternativas de gestão e conservação dos recursos hídricos, além de buscar novas fontes de abastecimento.

A comparação dos dados observados provenientes de fontes confiáveis, como o GPCC e o CRU, com as projeções dos modelos participantes do projeto CMIP6 permitiu uma análise detalhada dos padrões de variação da precipitação, vazão e temperatura. Em síntese, as mudanças climáticas projetadas para as últimas três décadas do século XXI, no cenário de altas emissões de gases de efeito estufa, podem trazer grandes impactos. Entre eles estão conflitos pelo uso da água, desaceleração econômica e escassez de água nas cidades devido ao aumento da temperatura, redução da precipitação e possível diminuição da disponibilidade hídrica nas bacias estudadas. Diante desse cenário, é crucial realizar um gerenciamento e planejamento

efetivos dos recursos hídricos, visando a implementação de medidas de mitigação e garantindo a segurança hídrica, especialmente em uma região com clima semiárido.

Por fim, no capítulo cinco, utilizando dados provenientes dos modelos do CMIP6 explorou-se ainda os cenários de emissões SSP2-4.5 e SSP5-8.5, levando em consideração também o potencial crescimento da demanda hídrica nos cenários futuros. Essa abordagem atualizada proporcionou uma compreensão mais abrangente e precisa dos possíveis impactos das mudanças climáticas na disponibilidade de água na região do Sistema Jaguaribe-Metropolitano. Nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e considerando demandas futuras, o BCC-CSM2-RM se destacou, mantendo estoques acima de 65%, indicando uma melhor capacidade de regulação e estabilidade no Banabuiú. No reservatório de Castanhão, o modelo supracitado teve também o melhor desempenho em termos de aporte hídrico, acionando a vertente em 11,57% e 20,13% do tempo nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente. Para o Gavião, Pacoti e Riachão o modelo indicou que o reservatório atingiu 100% de sua capacidade máxima, sugerindo maior confiabilidade nesses casos. Portanto, em diversos cenários e reservatórios analisados, o BCC-CSM2-RM demonstrou consistência e bom desempenho em termos de regulação hídrica, destacando-se em comparação com os outros modelos considerados, além de ter se mostrado bastante sensível quanto ao atendimento das demandas e à garantia da vazão. Ao analisar o conjunto completo de reservatórios, enquanto o IPSL-CM6A-LR também teve destaque positivo em alguns casos (como estabilidade em Castanhão e atingimento de 100% de capacidade em Gavião, Pacoti e Riachão), também houve situações em que indicou condições desfavoráveis, como em Orós no cenário SSP5-8.5. Assim, a avaliação do desempenho dos modelos adotados neste estudo dependerá do contexto específico de cada reservatório e cenário.

Com base nos resultados e nas lacunas identificadas no estudo do Sistema Jaguaribe-Metropolitano, algumas recomendações para trabalhos futuros incluem:

- a) aperfeiçoar a rede de operação, considerando a utilização de novas fontes de abastecimento de água para Fortaleza, pautado no contexto de gestão integrada de águas urbanas conforme cenarizado no estudo setorial CEARÁ 2050 (Souza Filho, 2018). Por este modelo, o abastecimento da cidade será realizado por quatro meios: águas interestaduais (oriundas da transposição do São Francisco), águas inter-regionais (provenientes da bacia do Jaguaribe), águas locais do sistema atual de abastecimento e águas locais de fontes alternativas (reuso, águas pluviais, águas subterrâneas, dessalinização e hidrogênio verde);
- b) aperfeiçoar os modelos climáticos e hidrológicos utilizados, incorporando

dados mais recentes e/ou refinando as projeções. Isso pode incluir a análise de incertezas associadas às projeções climáticas e a consideração de novos dados observacionais. Além de considerar os cenários futuros com base em novos dados e projeções dos níveis dos reservatórios e padrões de demanda hídrica. Além disso, este estudo foi baseado em apenas cinco MCGs. Recomenda-se, de acordo com Jones *et al.* (2004), o uso de tantos GCMs quanto possível em estudos de impactos das mudanças climáticas, apesar da baixa resolução, a fim de refletir, pelo menos em parte, a incerteza científica da resposta do clima. Assim, pesquisas futuras podem utilizar para análise da disponibilidade hídrica, um conjunto maior de modelos, bem como um horizonte temporal até o final do século, que é quando os maiores impactos são esperados;

- c) a crescente demanda d'água e os seus impactos no ciclo hidrológico, bem como o intenso e desenfreado avanço dos usos antrópicos, podem comprometer a disponibilidade hídrica das bacias analisadas, e conseqüentemente os seus múltiplos usos, ocasionando situações de conflito no processo de alocação entre os diferentes usuários. Sugere-se, então que o planejamento e gestão dos recursos hídricos se faça de forma integrada, levando em consideração diversos segmentos: hídrico, econômico, social e territorial. Para este último, se faz necessário compreender como as modificações antrópicas impactam no ciclo hidrológico das bacias analisadas. Para atender essa necessidade, podem ser utilizados os modelos hidrológicos do tipo distribuídos ou semi-distribuídos, que simulam os impactos de cenários de mudança ambiental (por exemplo, mudança climática e no uso do solo) em bacias hidrográficas atrelado à avaliação da transição no espaço, utilizando de ferramentas robustas como a análise de pixel e geoestatística (interface - métodos de clusterização).

Com estas conclusões e desafios identificados, futuros estudos podem se aprofundar na integração de novas fontes de abastecimento, refinamento de modelos climáticos, e uma abordagem mais ampla na gestão integrada dos recursos hídricos para enfrentar os crescentes desafios da disponibilidade hídrica no Sistema Jaguaribe-Metropolitano.

REFERÊNCIAS

- AGHAKOUCHAK, A. *et al.* Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. **Rev Geophys**, v. 53, n. 2, p. 452-480, 2015.
- AGUIAR, A. J. A.; SÁ, I. B.; LIMA, J. E.; OLIVEIRA, V. P. Monitoramento e análise da vazão no rio Jaguaribe e seus principais afluentes. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v. 15, n. 2, p. 129-139, 2018.
- ALBUQUERQUE, T. C. *et al.* Impactos da variabilidade e mudança climática sobre a hidrologia de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 23, n. 2, p. 1-16, 2018.
- ALBUQUERQUE, T. C. *et al.* Análise temporal dos recursos hídricos superficiais em bacias hidrográficas. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 79-86, 2018.
- ALBUQUERQUE, T. M. A. **Estudo dos processos de gestão de seca: aplicação no estado do Rio Grande do Sul**. 2010. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010.
- ALIZADEH-CHOOBARI, O. Contrasting global teleconnection features of the eastern Pacific and central Pacific El Niño events. **Dynamics Of Atmospheres And Oceans**, [s.l.], v. 80, p.139-154, dez. 2017.
- ANA, A. N. DE Á. Reservatórios do Semiárido Brasileiro: hidrologia, balanço hídrico e operação. **Relatório Final**, p. 88, 2016.
- ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Conjuntura dos Recursos Hídricos. **Informe Anual**, v. 1, p. 105, 2019.
- ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. ENSO-related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during warm and cold Pacific decadal oscillation regimes. **International Journal of Climatology**, v. 25, p. 2071-2030, 2005.
- ARAÚJO, J. A.; OLIVEIRA, C. A. C.; CARVALHO, F. M. Análise hidrológica da bacia do Rio Jaguaribe (Ceará-Brasil) por meio do modelo HEC-HMS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 6, p. 2243-2257, 2018.
- ARAÚJO, G. V. *et al.* Avaliação da qualidade das águas superficiais do rio Jaguaribe e seus principais afluentes, Ceará, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 1, p. 1-15, 2019.
- ARCE. AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DELEGADOS DO ESTADO DO CEARÁ. **Plano de Segurança Hídrica | Região Metropolitana de Fortaleza**. Fortaleza: ARCE, 2016.
- BACCI, L.A. **Combinação de Métodos de Séries Temporais para Previsão de Demanda de Café no Brasil**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2007.
- BARBOSA, A. C. B. **Oscilações Intrasazonais no Indo-Pacífico e na Zona de Convergência do Atlântico Sul: Estudo Observacional e Numérico**. 2012. Tese (Doutorado)

– Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2012.

BARI, S. H. *et al.* Analysis of seasonal and annual rainfall trends in the northern region of Bangladesh. **Atmospheric Research**, v. 16, n. 1, p. 148-158, 2016.

BEZERRA, J. M. Os Perímetros Irrigados no Ceará: Desenvolvimento Rural e Expansão do Agronegócio. **Revista de Geografia Agrária**, v. 12, n. 24, p. 57-76, 2017.

BEZERRA, J. R. M. *et al.* Water resources management in Ceará, Brazil: A review. **Water Resources Management**, v. 33, n. 10, p. 3305-3322, 2019.

BLOCK, P. J. *et al.* A Streamflow Forecasting Framework using Multiple Climate and Hydrological Models. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, p. 828-843, 2009.

BOX, G. E. P. *et al.* **Time series analysis: forecasting and control**. Hoboken: Wiley, 2015.

BRASIL. Diário Oficial da União. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. [1997].

BRITO, S. S. B. *et al.* Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **Int. J. Climatol.**, v. 38, p. 517-529, 2018.

CAMPOS, J. N. B. *et al.* Sobre a eficiência de pequenos e grandes reservatórios. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS*, 24., 2001, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 2001.

CAMPOS, J. N. B. *et al.* Influência do regime sazonal de vazões na disponibilidade hídrica de reservatórios. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 15., 2003, Curitiba. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 1-12.

CRISPIM, A.B. *et al.* A ocupação desigual do espaço geográfico semiárido: o contexto do município de Quixadá/CE. **Revista Equador**, v. 5, n. 4, p. 56-74, 2016.

CEARÁ. Indústria 4.0 no Vale do Iguatu - CE: possibilidades e desafios. **Revista de Tecnologia e Inovação**, v. 8, n. 1, p. 56-68, 2021.

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos. **Sub-Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe Características Gerais**. Fortaleza, 2018.

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos. **Sub-Bacia Hidrográfica do Banabuiú: Características Gerais**. Fortaleza, 2018.

CERÓN, W. L. *et al.* Comparison of spatial interpolation methods for annual and seasonal rainfall in two hotspots of biodiversity in South America. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, n. 1, p. e20190674, 2021.

CHATFIELD, C. **The analysis of time series: an introduction**. Chapman & Hall/CRC, 2004.

CID, D. A. C. **Alocação intertemporal e múltiplos usuários: estudo de caso sistema Jaguaribe-metropolitano**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2017.

CID, D. A. C. *et al.* Análise da Segurança da Água em Cenários de Mudanças Climáticas: o Caso de Fortaleza. **Expressão Gráfica e Editora**, v. 1, p. 715-724, 2019.

CODEVASF. COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA. **Perímetros irrigados**. [s.l:s.n.]. Disponível em: <<https://www.codevasf.gov.br/linhas-de-negocio/irrigacao/projetos-publicos-de-irrigacao>>.

COGERH. COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Plano de Gerenciamento das Águas das Bacias Metropolitanas**. Fortaleza: COGERH, 2010.

COGERH. COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Inventário Ambiental do Açude Pacoti**. Fortaleza: COGERH, 2011.

COGERH. COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Inventário Ambiental do Açude Riachão**. Fortaleza: COGERH, 2011.

COGERH. COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Manual de Operação da Sala de Situação do Ceará**. Fortaleza: COGERH, 2016.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH). **Inventário Ambiental do Açude Gavião**. Fortaleza: COGERH, 2017.

COGERH. COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Sub-Bacia Hidrográfica do Médio Jaguaribe Características Gerais**. Fortaleza, 2019.

COGERH. COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Projeto Gerenciamento de Risco, Alocação e Operação do Sistema de Recursos Hídricos - Estudo de Cálculo das Afluências aos Reservatórios Estratégicos do Ceará: Definição das Vazões Oficiais**. Fortaleza, 2022.

COLLISCHONN, B.; CLARKE, R. T. Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto. **RBRH**, v. 21, n. 4, p. 719–727, 2016.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharias e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.

COSTA, A. A. As the Earth heats up, Brazil Digs Deeper. **NACLA Report on the Americas**, v. 49, n. 4, p. 444-450, 2017.

COUTINHO, J. A. P. *et al.* Influência do uso e ocupação do solo na qualidade da água de bacias hidrográficas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 921-930, 2017.

CUNHA, D. G. F. Monitoramento hidrológico em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 4, p. 57-68, 2013.

ENFIELD, D. B.; MESTAS-NUÑEZ, A. M.; TRIMBLE, P. J. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 10, p. 7841-7848, 2001.

ESTÁCIO, Á. B. S. **Climate change and model parameter uncertainties propagated to ungauged reservoir catchments in Ceará: A study for water availability assessment.** 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2020.

EYRING, V. *et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, p. 1937-1958, 2016.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO CEARÁ (FIEC). **Balanco Anual da Indústria Cearense - 2020.** [s.l:s.n.]. Disponível em:<https://www.sfiec.org.br/publicacoes/balanco_anual/balanco2020.pdf>.

FERNANDES, D. S. *et al.* **Índices para a quantificação da seca.** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009.

FERNANDES, R. O. *et al.* Reservoir yield intercomparison of large dams in Jaguaribe Basin-CE in climate change scenarios. **RBRH**, v. 22, p. e11, 2017.

FERNANDES, R. O. *et al.* Impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica de grandes reservatórios de regiões semiáridas. **Expressão Gráfica e Editora**, v. 1, p. 699-719, 2019.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, p. 15-28, 2005.

FERREIRA, C. B. Agricultura irrigada no Ceará: panorama histórico e perspectivas futuras. **Revista de Desenvolvimento Econômico do Ceará**, v. 2, n. 3, p. 35-48, 2011.

FILHO, F. S.; LUCENA, L. P.; SOUZA NETO, A. F. Monitoramento da demanda hídrica em bacias hidrográficas de pequeno porte no estado do Ceará, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 2, p. 1-15, 2019.

FLÖRKE, M.; SCHNEIDER, C.; MCDONALD, R. I. Water stress in global transboundary river basins: significance of upstream water use on downstream stress. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 6, p. 064014, 2018.

FOLLAND, C. K. *et al.* Predictability of Northeast Brazil rainfall and real-time forecast skill 1987-98. **Journal of Climate**, v. 12, p. 1937-1958, 2001.

FOX, D. G. Judging Air Quality Model Performance – review of the Woods Hole workshop. **American Meteorological Society**, v. 62, n. 5, p. 599-609, 1981.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The state of the world's biodiversity for food and agriculture.** Rome: FAO, 2018. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/CA3129EN/CA3129EN.pdf>>.

FUNCEME. FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Manual do SIGA: FUNCEME - CE, BRASIL (2020. V2).** Fortaleza: FUNCEME, 2020.

FUNCEME (FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS). **Evolução do volume hídrico**. Fortaleza: FUNCEME, 2023. Disponível em: <<http://www.funceme.br/hidro-ce-zend/>>.

GIANNINI, A.; SARAVANAN, R.; CHANG, P. The predictioning role of Tropical Atlantic variability in the development of the ENSO teleconnection: implications for the prediction of Nordeste rainfall. **Climate Dynamics**, v. 22, n. 8, p. 839-855, 2004.

GODET, M. **Manual de prospectiva estratégica: da antecipação à ação**. Porto Alegre: Bookman, 1991; 2012.

GONDIM, R. S. **Mudanças climáticas e impactos na demanda de água para irrigação na bacia do Jaguaribe**. 2009. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2009.

GONÇALVES, H. C. **Estudo do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. 2014. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, PE, 2014.

GONDIM, R. *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, n. 550, 2018.

GONDIM, R. S. *et al.* **Agricultura irrigada e medidas adaptativas para o enfrentamento das mudanças climáticas**. Expressão Gráfica e Editora, v. 1, p. 737-750, 2019.

GUIMARÃES, S. O. *et al.* Projeções de Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro dos Modelos do CMIP5 e do CORDEX. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 337-365, 2016.

GUTTMAN, N. B. Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 35, n. 2, p. 311-322, 1999.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

HARGREAVES, G. H. Defining and Using Reference Evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 120, n. 6, p. 1132-1139, 1994.

HARRIS, I. *et al.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific Data**, v. 7, p. 109, 2020.

HASTENRATH, S. On modes of tropical circulation and climate anomalies. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 35, n. 12, p. 2222-2231, 1978.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Q.J.R. Meteorol. Soc.**, v. 103, p. 77-92, 1977.

HOEKSTRA, A. Y.; MEKONNEN, M. M. The water footprint of humanity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 9, p. 3232-3237, 2012.

HYNDMAN, R. J. *et al.* **Forecasting with Exponential Smoothing**. [s.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

HYNDMAN, R. J.; ATHANASOPOULOS, G. **Forecasting: principles and practice**. [s.l.]: OTexts, 2018.

HYNDMAN, R. J.; ATHANASOPOULOS, G. **Forecast: Forecasting functions for time series and linear models**. [s.l:s.n.]. 2021.

IPEA. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Desenvolvimento rural e agricultura irrigada no Ceará**. Brasília: IPEA, 2010.

IPECE. INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Ceará em Mapas - Cenário demográfico**. [s.l:s.n.]. Disponível em: <<http://cearaemmapas.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/15/2020/06/Mapa-Cen%C3%A1rio-Demogr%C3%A1fico.pdf>>.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Geneva: IPCC, 2014.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

KNIGHT, J. R.; FOLLAND, C. K.; SCAIFE, A. Climate impacts of the Atlantic multidecadal oscillation. **Geophysical Research Letters**, v. 33, p. L17706, 2006.

KÖPPEN, W.; THORNTHWAITE, C. W. Climate classification. [s.l.]: **Reidel Publishing Company**, 1977.

LAFON, T. *et al.* Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 6, p. 1367-1381, 2013.

LIMA, B. P.; MAMEDE, G. L.; LIMA NETO, I. E. Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 125–135, 2018.

LIMA, M. A. S.; LIRA, M. A. T. A Variabilidade Climática e os Desastres Naturais no Estado do Ceará (1991-2019). **Revista Brasileira de Meteorologia** [online], v. 36, n. 3 suppl, p. 603-614, 2021.

LIMA, R. A. R. *et al.* Avaliação dos impactos da variação de temperatura sobre a demanda de água para irrigação no Ceará. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 4, p. 183-195, 2015.

LIRA, S. B.; SANTOS, L. M.; BARROS, M. C. M. *et al.* Gestão integrada de recursos hídricos em bacias hidrográficas: o caso do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Jaguaribe (CE). **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 353-365, 2018.

- LUCENA, D. B.; SERVAIN, J.; GOMES FILHO, M. F. Rainfall Response in Northeast Brazil from Ocean Climate Variability during the Second Half of the Twentieth Century. **Journal of Climate**, v. 24, p. 6174-6184, 2011.
- LYRA, A. A.; CHOU, S. C.; SAMPAIO, G. O. Sensitivity of the Amazon biome to high-resolution climate change projections. **Acta Amazonica**, v. 46, n. 2, p. 175-188, 2016.
- MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. **Journal of the Econometric Society**, v. 13, p. 245-259, 1945.
- MANTUA, N. J. et al. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 78, p. 1069–1080.
- MANTUA, N. **PDO Index**. [s.l.:s.n.]. 2017. Disponível em: <<http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest.txt>>.
- MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, Impactos e adaptação as mudanças de clima no semiárido do Brasil. **Parcerias Estratégicas**, v. 1, n. 1, p. 149-176, 2009.
- MARENGO, J. A. *et al.* Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1973-1985, 2018.
- MARENGO, J.A. *et al.* Assessing drought in the drylands of Northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. **Nat. Hazards**, v. 103, n. 1, p. 2589-2611, 2020.
- MARTINS, L. *et al.* Avaliação da severidade da seca no reservatório de Caxitoré com base no índice de escoamento normalizado, no índice de reservatório e no volume estocado. *In*: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 12., 2014, Natal. **Anais [...]**. Natal: ABRH, 2014. p. 1-8.
- MAURO, C. A. Conflitos pelo uso da água. **Caderno Prudentino de Geografia: Presidente Prudente**, volume especial, n. 36, p. 81-105, jun. 2014.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In*: PROCEEDINGS OF THE EIGHTH CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., 1993, Anahaim. **Anais [...]**. Anahaim: American Meteorological Society, 1993. p. 179-184.
- MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. Drought monitoring with multiple time scales. *In*: PROCEEDINGS OF THE NINTH CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 9., 1995, Dallas. **Anais [...]**. Dallas: American Meteorological Society, 1995. p. 233-236.
- MENDONÇA, J. C. M. *et al.* Estresse hídrico na região Nordeste: estudo de caso sobre o Ceará. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 3, p. 1-16, 2019.
- MENESCAL, R. A. *et al.* Gestão dos Recursos Hídricos e a Garantia do Abastecimento Humano de Grandes Aglomerados Urbanos no Semiárido - O Caso de Fortaleza. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 1, p. 217-232, 2004.
- MENEZES, H. E. A. *et al.* Veranico e a produção Agrícola no estado da Paraíba, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 181-186, 2010.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis**. Washington: World Resources Institute, 2005.

MILONE, G.; ANGELINI, F. **Estatística Aplicada**. São Paulo: Atlas, 1995.

MODALA, N. R. **Assessing the Impacts of Climate Change on Cotton Production in the Texas High Plains and Rolling Plains**. 2014. Tese (Doutorado), Texas A & M University, Texas, 2014.

MOORE, D. S. **The Basic Practice of Statistics**. New York: W. H. Freeman, 2007.

MONTENEGRO, S. M. G. L. et al. Recursos hídricos em bacias hidrográficas: importância e desafios. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 23, n. 2, p. 367-379, 2019.

MOREIRA, J. G. V.; NAGHETTINI, M. Detecção de Tendências Monotônicas Temporais e Relação com Erros dos Tipos I e II: Estudo de Caso em Séries de Precipitações Diárias Máximas Anuais do Estado do Acre. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p.394-402, 2016.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. **Previsão de Séries Temporais**. São Paulo: Atual, 1987.

MOURA, A.D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **J. Atmos. Sci.**, v. 38, p. 2653-2675, 1981.

MUNIZ, L. F. M. *et al.* Classificação climática para o Estado do Ceará utilizando distintos sistemas de caracterização. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22.*, 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABRH, 2017. p. 1-8.

NIVA, I. et al. New 21st century projections of precipitation and other climatic variables reveal large uncertainties in hydrological cycle intensification and the future water cycle. **Earth's Future**, v. 8, n. 1, p. e2019EF001483, 2020.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **J. Climate**, v. 9, n. 10, p. 2464-2479, 1996.

OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures**. [s.l.:s.n.], 2017.

OLIVEIRA, L. C. *et al.* Frequência e distribuição espacial de veranicos no Estado do Ceará. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS NATURAIS DO SEMIÁRIDO – SBRNS, 2.*, 2015, Quixadá. **Anais [...]**. Quixadá: UFC, 2015. p. 1-6.

OLMSTEAD, S. M. Climate change adaptation and water resource management: a review of the literature. **Energy Economics**, v. 46, p. 500-509, 2014.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Escassez de água, desafio à Sustentabilidade**. Organização das Nações Unidas, 2017.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Mudanças Climáticas e Cidades**. Rio de Janeiro: P BMC, 2016.

PAULINO, V. E. N. *et al.* Trends in Crop Reference Evapotranspiration and Climatological Variables Across Ceará State – Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 1, p. 79-88, 2019.

PEREIRA, G. S. **Desenvolvimento de Um Procedimento para Avaliação de Superfícies Irrigadas por Meio de Imagens de Satélite para Fiscalização de Outorga**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

PEZZI, L. P.; CAVALCANTI, I. F. A. The relative importance of ENSO and tropical Atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over South America: A numerical study. **Climate Dynamics**, v. 17, p. 205-212, 2001.

PIANI, C.; HAERTER, J. O.; COPPOLA, E. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, n. 1-2, p. 187-192, 2010.

PINHEIRO, A. M. N., SILVA, L. M. C. Gerenciamento dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 161-178, 2013.

PINHEIRO, E. *et al.* Relação entre duração dos eventos de El Niño com as condições do Atlântico Tropical e a precipitação no Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 497-508, 2018.

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

PORTELA, M. M. *et al.* Tendências em séries temporais de variáveis hidrológicas. **Revista de Recursos Hídricos**, v. 32, n. 1, p. 43-60.

RAY, S. T. *et al.* Patterns and sources of multidecadal oscillations in drought-sensitive tree-ring records from the central and southern Rocky Mountains. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 6, p. 1-4, 2003.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna: [s.n.], 2021.

REBOITA, M. S.; SANTOS, I. A. Influência de alguns padrões de teleconexão na precipitação no Norte e Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, n. 10, p. 29-47, 2014.

RIBEIRO, L. K. B.; LOPES, P. R. M.; FREITAS, B. M. Estudo hidrológico de bacias hidrográficas: uma abordagem comparativa entre as bacias do Acaraú e Jaguaribe-Metropolitano. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 1, p. 171-184, 2019.

RITCHIE, H.; ROSER, M. **Population Growth**. [s.l.]: Our World in Data, 2018.

ROCHA, J. C. S.; KHOURY, L. E. C.; DAMASCENO, Â.P. D. Direito das águas - trajetória

legal, conflitos e participação social. **Revista de Direito Sanitário**, v.18, n. 3, p. 143-166, mar. 2018.

ROCHA, R. V., SOUZA, F. A. ; SILVA, S. M. O. Análise da Relação entre a Precipitação Média do Reservatório Orós, Brasil - Ceará, e os índices PDO e AMO Através da Análise de Changepoints e Transformada de Ondeletas. **Revista Brasileira de Meteorologia** [online].v. 34, n. 1, p. 139-149, 2019.

ROSSI, R. A.; SANTOS, E. Conflito e regulação das águas no Brasil – a experiência do Salitre. **Cad. CRH**, v. 31, n. 82, p. 151-167, abr. 2018.

SABOIA, A. L.; SILVA, D. R. Conflitos por recursos hídricos no Estado do Ceará. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEÓGRAFOS, 7., 2014, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: VII CBG, 2014.

SABÓIA, M. A. M. **Estratégia robusta para a gestão de drenagem urbana em cenário de mudança do clima**. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016.

SANTOS, F. M. *et al.* Análise espacial da vulnerabilidade ambiental das bacias hidrográficas da região metropolitana de São Luís - MA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 5, p. 1956-1969, 2018.

SARAVANAN, R.; CHANG, P. Interaction between tropical Atlantic variability and El Nino-Southern Oscillation. **Journal of Climate**.v.13, n. 13, p. 2177 – 2194, 2000.

SCHNEIDER, U. *et al.* **GPCC Full Data Reanalysis Version 6.0 at 1.0°**: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data. [s.l.:s.n.]. 2011.

SCHNEIDER, U. *et al.* **GPCC Full data reanalysis version 6.0 at 0.5°**: Monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on GTS-based and Historic Data. [s.l.:s.n.]. 2020.

SEN, P. K. Estimates of regression coefficient based on Kendall's tau. **J. Am. Stat. Assoc.**, v. 63, p. 1379-1389, 1968.

SERRETI, M. T.; MARTINS, R. C; ALVES, F. Influência da Impermeabilização no Ciclo Hidrológico da Cidade de Belo Horizonte/MG. **Revista Petra**, v.1, n. 2, p. 311-327, 2015.

SHAMSUDDIN, S.; HARUN, S. Forecasting residential water demand using time series methods. **International Journal of Engineering & Technology**, v. 7, n. 4.30, p. 166-171, 2018.

SHUKLA, S.;WOOD, A.W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. **Geophysical Research Letters**, v. 35, L02405, 2008.

SHUMWAY, R. H.; STOFFER, D. S. **Time series analysis and its applications**: with R examples. [s.l.]:Springer, 2017.

SILVA, D.F. Influência da variabilidade interdecadal do clima associada ao ENOS sobre o Estado do Ceará. **Revista IberoAmericana de Ciências Ambientais**, v.4, n.2, p.86-98, 2013.

SILVA, G.A.M.; DRUMOND, A.; AMBRIZZI, T. The impact of El Niño on South American summer climate during different phases of the Pacific Decadal Oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 106, p. 307-319, 2011.

SILVA, D. F. Aplicação de Análises de Ondaletas para Detecção de Ciclos e Extremos Pluviométricos no Leste do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia** [online], v. 32, n. 2, p. 187-198, 2017.

SILVA, D.; GALVÍNCIO, J.; NÓBREGA, R. Influência da variabilidade climática e da associação de fenômenos climáticos sobre sub-bacias do rio São Francisco. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)**, v. 19, p. 46-56, 2011.

SILVA, G. K. *et al.* Análise de projeções das mudanças climáticas sobre o regime de precipitação nas Bacias do Sistema Jaguaribe, Ceará, Brasil. *In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, 15., 2020, Caruaru, Pernambuco. **Anais [...]**. Caruaru: ABRH, 2020. p. 1-10.

SILVA, G. K. *et al.* Análise da Variabilidade Espaço-Temporal do SPI: Um Estudo de Caso para a Sub-Bacia Choró, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira De Meteorologia**, v. 36, n. 3, p. 539–549, 2021.

SILVA, S. M. O.; SOUZA FILHO, F. A.; AQUINO, S. H. S. Avaliação do risco da alocação de água em período de escassez hídrica: o caso do sistema jaguaribe-metropolitano. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.22, n.4, p.749-760, 2017.

SILVEIRA, C. S. **Modelagem integrada de meteorologia e recursos hídricos em múltiplas escalas temporais e espaciais: aplicação no Ceará e no setor hidroelétrico brasileiro**. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2014.

SILVEIRA, C. S. *et al.* Mudanças climáticas e o setor hidroelétrico brasileiro: uma análise com base em modelos do IPCC-AR5. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 47, p. 46-60, 2018.

SILVEIRA, C. S. Tópicos de clima e recursos hídricos. [s.l.]: Editora CRV, 2019.

SINGH, P.; GNANASEELAN, C.; CHOWDARY, J. S. North-East monsoon rainfall extremes over the southern peninsular India and their association with El Niño. **Dynamics Of Atmospheres And Oceans**, v. 80, p.1-11, 2017.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS (SNIRH) - metadados.snirh.gov.br. [s.l.:s.n], 2023.

SOUZA, C. A.; REBOITA, M. S. Ferramenta para o Monitoramento dos Padrões de Teleconexão na América do Sul. **Terrae Didática**, v. 17, n. 00, p. e02109, 2021.

SOUZA FILHO *et al.* **Projeto: Avaliação da Segurança Hídrica de Fortaleza - FORTALEZA 2040**. Fortaleza: [s.n.], 2016.

SOUZA FILHO, F. A. *et al.* **Nexus clima, recursos hídricos, agricultura e energia na Bacia Estendida do Rio São Francisco**. 1ed. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2022.

- SOUZA FILHO, F. A. **Estudo Setorial Especial: recursos hídricos**. Fortaleza: [s.n.], 2018.
- SOUZA FILHO, F.A.; MOURA, A.D. **Memórias do Seminário Natureza e Sociedade nos Semi-Áridos**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2006.
- SOUZA NETO, A. F.; SOUZA, E. G. Comportamento da demanda hídrica urbana em Fortaleza, Ceará. **Revista Ambiente & Água**, v. 13, n. 1, p. 1-14, 2018.
- STEFFEN, W. *et al.* Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 33, p. 8252-8259, 2018.
- SUTTON, R. T.; HODSON, D. L. R. Atlantic Ocean forcing North America and european summer climate. **Science**, v. 309, p. 115–118, 2005.
- TAO, H. *et al.* Trends in extreme temperature indices in the Poyang Lake Basin, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 28, p. 1543-1553, 2014.
- TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, p. 485-498, 2012.
- TEDESCHI, R. G.; COLLINS, M. The influence of ENSO on South American precipitation during austral summer and autumn in observations and models. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 2, p. 618-635, 2016.
- TEDESCHI, R. G.; GRIMM, A. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Influence of Central and East ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral autumn and winter. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 15, p. 4797-4814, 2016.
- TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, v. 456, p. 12-29, 2012.
- THOM, H. C. S. A note on the gamma distribution. **Monthly Weather Review**, v. 86, n. 4, p. 117-122, 1958.
- THOM, H. C. S. **Some methods of climatological analysis**. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization, 1966.
- TOLEDO, C. E.; ARAÚJO, J. C.; ALMEIDA, C. L. The use of remote-sensing techniques to monitor dense reservoir networks in the Brazilian semiarid region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 10, p. 3683-3699, 2014.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 1, p. 61-78, 1998.
- TRENBERTH, K. E.; HOAR, T. J. El Niño and climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 23, p.3057-3060, 1997.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001.
- TZANAKAKIS, V. E.; PARANYCHIANAKIS, N. V.; ANGELAKIS, A. N. Water Scarcity.

CRC Press, v. 4, p. 4.1- 4.14, 2020.

UNESCO. **Water Security and the Global Water Agenda**. United Nations World Water Assessment Programme, 2013. Disponível em:
<<https://collections.unu.edu/eserv/UNU:2651/Water-Security-and-the-Global-Water-Agenda.pdf>>.

UNESCO. **Changing Face of Drought Management Policies**: case study series on drought management, Paris: UNESCO, 2014. Disponível em:
<<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000230269>>.

UNITED NATIONS. **Sustainable Development Goal 6**: Synthesis Report on Water and Sanitation. New York: United Nations, 2018. Disponível em:
>https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/19046GSDR_2018_Chapter_6.pdf
>.

UNITED NATIONS. **World Water Development Report 2021**: Valuing Water. Paris: UNESCO, 2021.

VAN DER HEIJDEN, K. **Scenarios**: the art of strategic conversation. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Safer water, better health**: Costs, benefits and sustainability of interventions to protect and promote health. Geneva: World Health Organization, 2008.

WMO. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Global Climate in 2011-2015**. World Meteorological Organization, 2016.

WONG, K. C.; WOO, K. H. Forecasting domestic water demand in Hong Kong using seasonal ARIMA models. **Journal of Hydrology**, v. 568, p. 590-600, 2019.

WWF. World Wildlife Fund. **The Water Risk Filter**. [S.l.], 2018. Disponível em:
<<https://waterriskfilter.panda.org/>>.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. **Journal of Hydrology**, v.181, n. 4, p. 23-48, 1996.

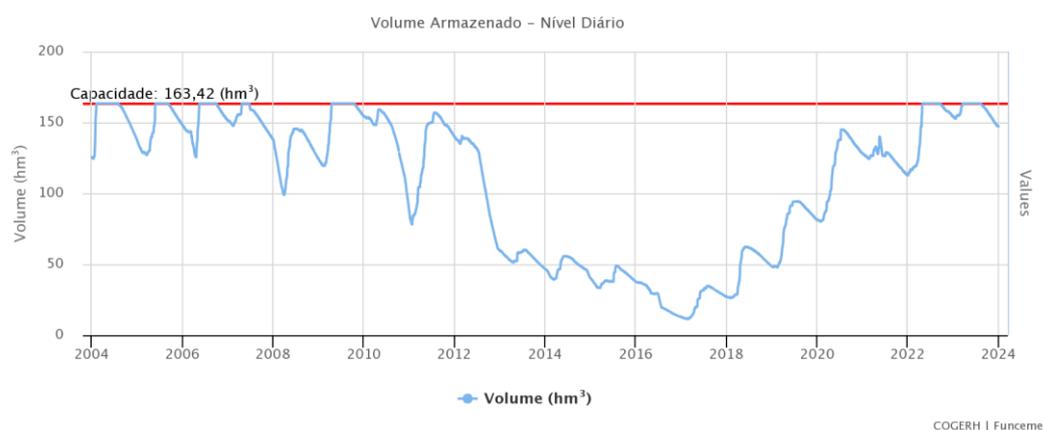
ZARGAR, A. *et al.* A review of drought indices. **Environ. Rev.**, v. 19, p. 333-349, 2011.

ZHU, N. *et al.* A Comprehensive Approach to Assess the Hydrological Drought of Inland River Basin in Northwest China. **Atmosphere**. v. 9, n.10, p. 370.

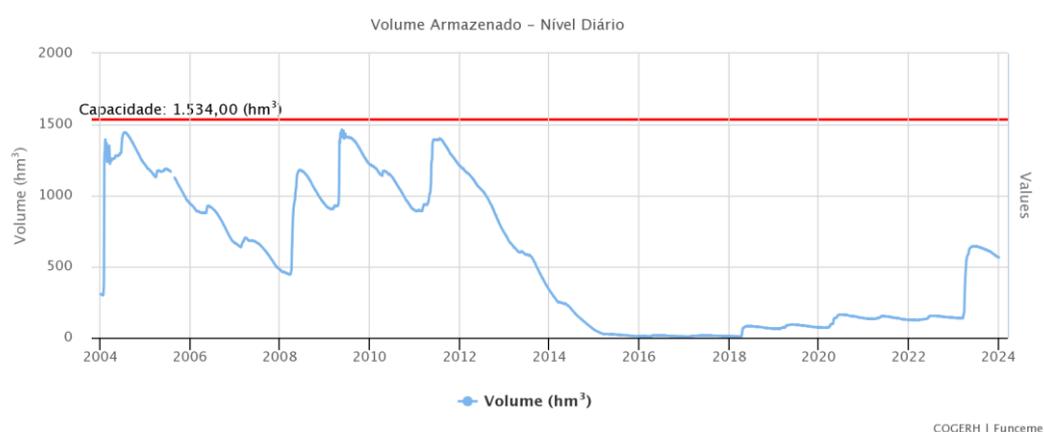
ANEXOS

Figura 68 – Evolução dos volumes armazenados nos reservatórios do Hidrossistema Jaguaribe Metropolitano.

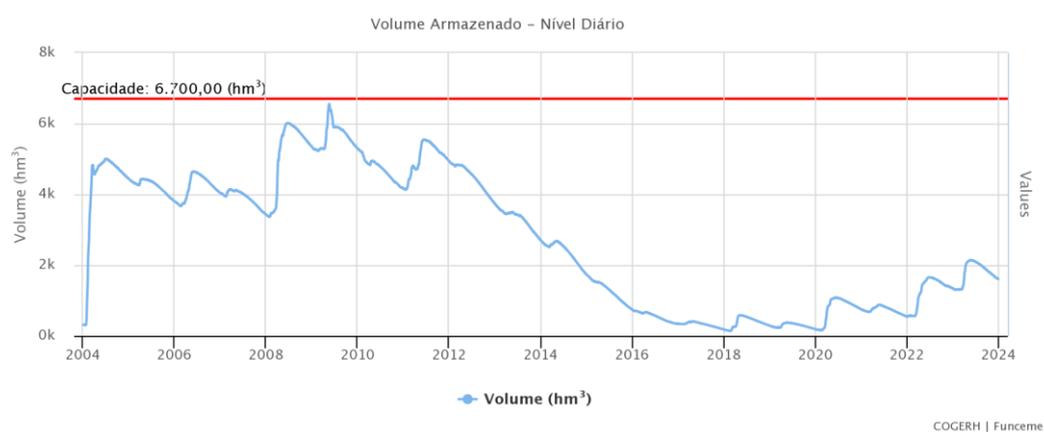
Reserv.: Aracoiaba – Capac.: 163,42 (hm³) – Vaz. Pereniz. Atual: 146,10 (L/s)



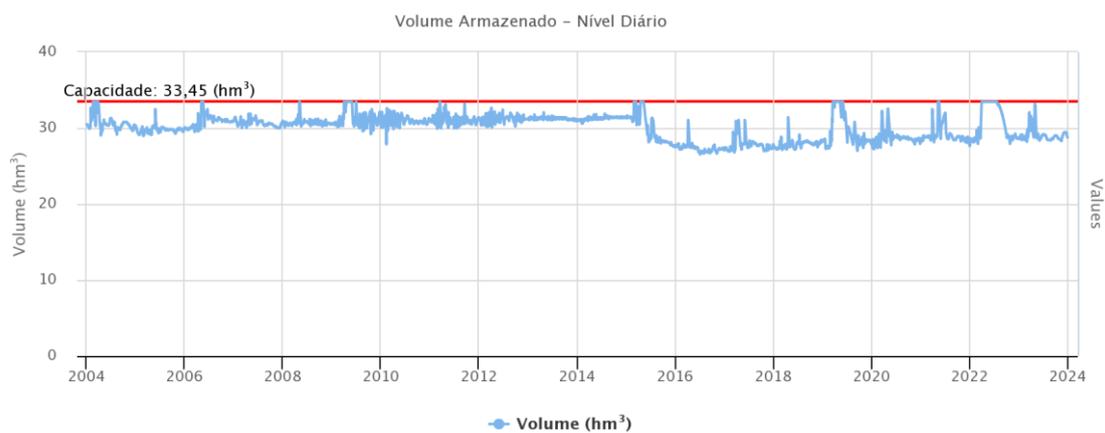
Reserv.: Banabuiú – Capac.: 1.534,00 (hm³) – Vaz. Pereniz. Atual: 2.992,00 (L/s)



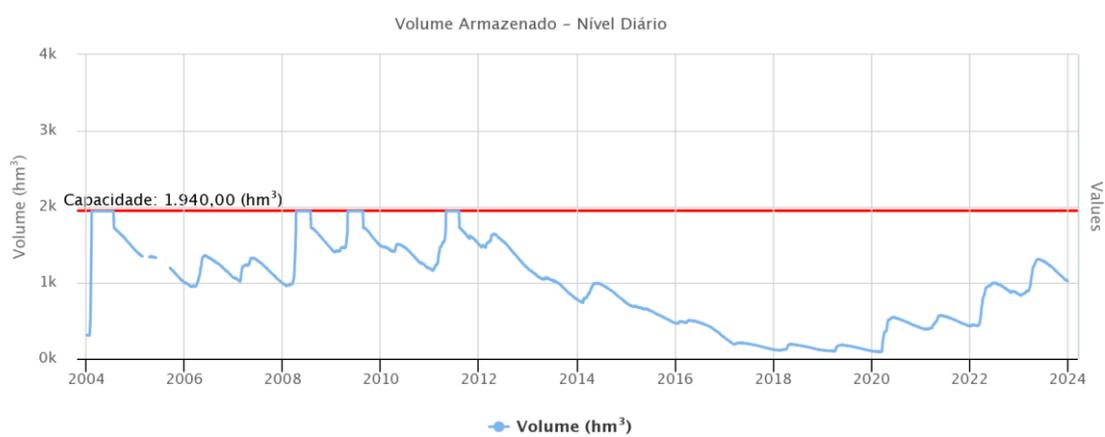
Reserv.: Castanhão – Capac.: 6.700,00 (hm³) – Vaz. Pereniz. Atual: 10.516,00 (L/s)



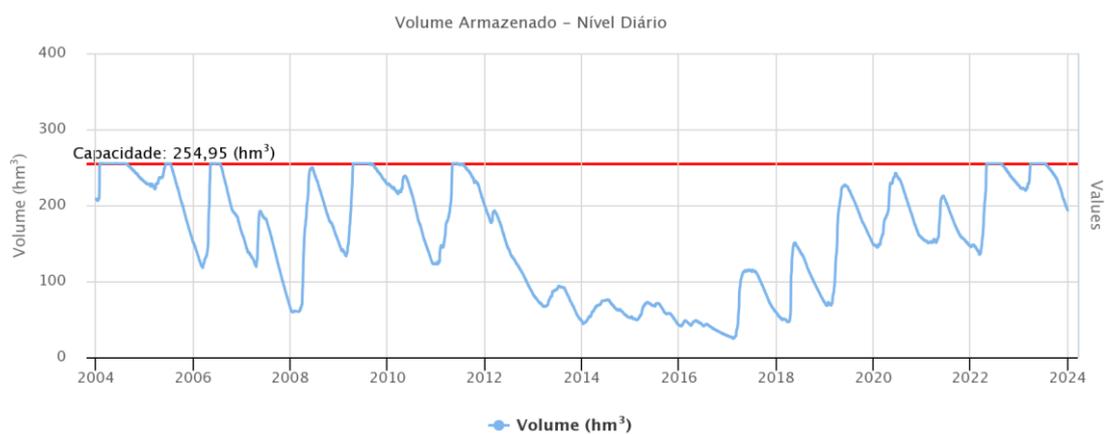
Reserv.: Gavião – Capac.: 33,45 (hm³) – Vaz. Pereniz. Atual: 0,00 (L/s)



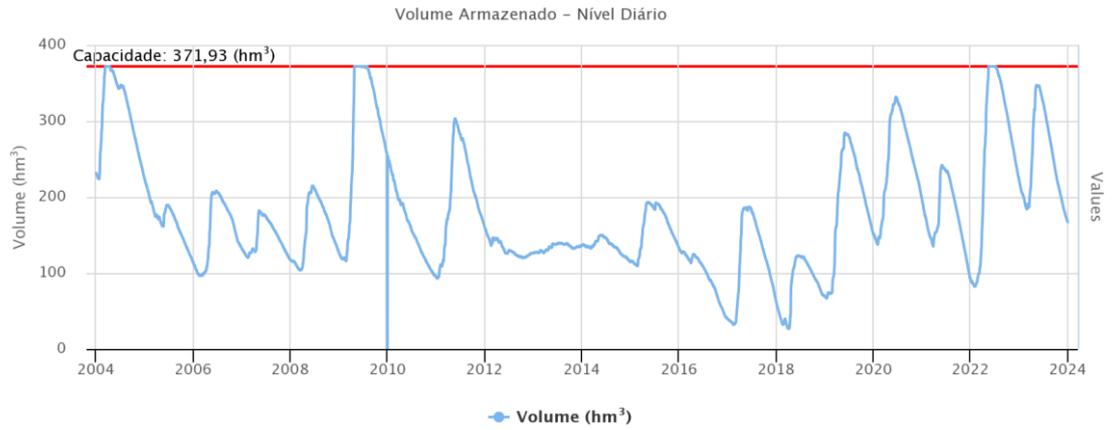
Reserv.: Orós – Capac.: 1.940,00 (hm³) – Vaz. Pereniz. Atual: 2.940,00 (L/s)



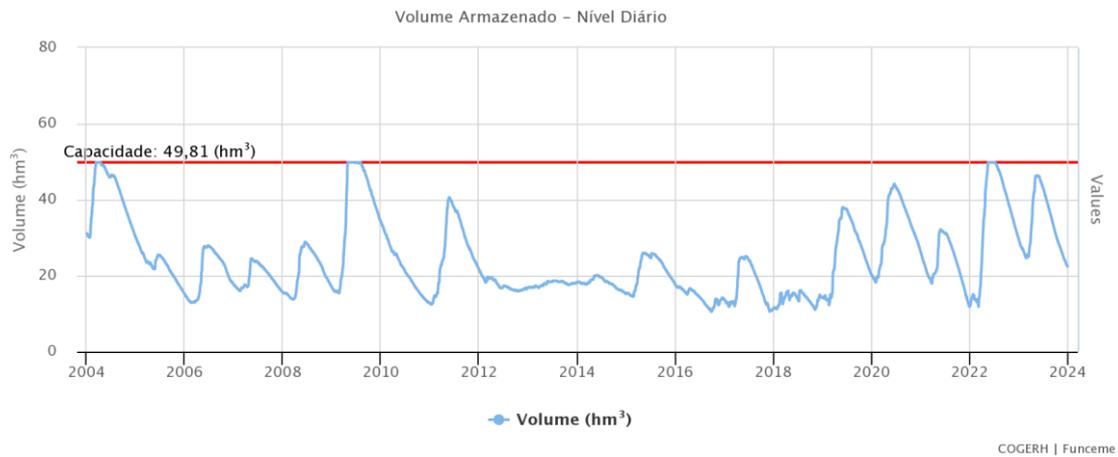
Reserv.: Pacajus – Capac.: 254,95 (hm³) – Vaz. Pereniz. Atual: 0,00 (L/s)



Reserv.: Pacoti – Capac.: 371,93 (hm³) – Vaz. Pereniz. Atual: 0,00 (L/s)



Reserv.: Riachão – Capac.: 49,81 (hm³) – Vaz. Pereniz. Atual: 0,00 (L/s)



APÊNDICES

CÓDIGO PARA CÁLCULO DA VARIABILIDADE SAZONAL

```

library(FitAR)
library(FitARMA)
library(lattice)
library(ggplot2)

getwd()
workdir <- "E:/dados/pr/funceme"
setwd(workdir)
obs<-read.table("totais_mensais_banabuiu.csv",header=F,sep=",")
obs1<-as.data.frame(obs)

test_data <- data.frame(obs1$V3,"date"= seq(from = as.Date("1975/1/1"), to =
as.Date("2020/12/31"), by = "month"))
test_data$month <- format(test_data$date, format='%m')
test_data<-as.data.frame(test_data)
test_data$month <- month.abb[as.numeric(format(test_data$date, "%m"))]
test_data$month <- factor(test_data$month, levels = month.abb)
#test_data$month<-factor(test_data$month,levels =
c("jan.", "fev.", "mar.", "abr.", "maio", "jun.", "jul.", "ago.", "set.", "out.", "nov.", "dez. "))

g1<-ggplot(data = obs,aes(x=test_data$month, y=obs1$V3,fill= obs1$V1))+
  stat_boxplot(geom = "errorbar",width=0.5)+
  geom_boxplot(fill="gray")+
  xlab("Mês")+ylab("Precipitação (mm)")+
  labs(title = "a)BH Banabui?",size=14)+
  theme(panel.background = element_rect(fill = "white", colour = "grey50",size = 1, linetype
= "solid"),panel.grid.minor = element_blank(),panel.grid.major = element_line(colour =
"grey90",linetype = "dashed"),plot.title = element_text(hjust = 0.5))+
  scale_y_continuous(breaks =seq(0,700,by=50),limits = c(0,700))

ggsave (
  filename = paste0("E:/resultados/pr", "/", "banabuiu_climatologia.png"),
  plot = g1,
  dpi = 600,
  width = 20,
  height = 15,
  units = "cm"
)

```

CÓDIGO PARA CÁLCULO DA TENDÊNCIA MANN-KENDALL-SEN

```

library (tidyverse)
library (ggplot2)
library (ggpubr)
library (readxl)
library(tseries)
require(Mcomp)
library(ggplot2)
library (pacman)

p_load(tidyverse, readxl, trend, Kendall, WaveletComp, stats, lubridate, forecast,
changept, eegkitdata, eegkit)
#cálculo da tendência
trend <- function (anual, dir_plots, labels_plot){
  TS <- ts (anual$Valor,frequency = 1, start = anual[1,1,1])
  kendall <- mk.test (TS)
  sen <- sens.slope (TS, conf.level = 0.95)
  df_mks <- cbind (p.value = kendall$p.value, sen_slope = sen$estimates,
                  S = kendall$estimates[1],var_S = kendall$estimates[2],
                  tau = kendall$estimates[3])
  df_mks <- as.data.frame(df_mks)
  rownames(df_mks) <- NULL

  #Série para gerar o df com os pontos da declividade SEN -----
  aux <- anual$Valor - df_mks$sen_slope*(anual$Ano-1975)#Mudar o ano inicial
  mediana_aux <- median (aux)
  sen_slope = mediana_aux + df_mks$sen_slope*(anual$Ano-1975)
  anual <-cbind (anual, Sen = sen_slope)

  plot <- ggplot(anual,aes(x=Ano))+
    geom_line(aes(y=Valor,colour = "Precipitação_Média", linetype =
"Precipitação_Média"))+
    geom_point(aes(y=Valor), color="black", size=2)+
    geom_line(aes(y=M10,colour = "M10", linetype = "M10"))+
    theme_minimal()+
    theme(panel.grid = element_line(colour = "grey90",linetype = "dashed"))+
    theme(panel.border = element_rect(linetype = "solid",color = "grey", fill =
NA))+
    scale_y_continuous("Precipitação (mm)",limits =
c(0,1800),breaks=seq(0,1800,150))+
    scale_x_continuous(limits = c(1975,2020),breaks=seq(1975,2020,5))+
    theme(legend.position = "bottom")

  if (df_mks$p.value <= 0.05){
    plot <- plot+
      geom_line(data = anual, aes(x = Ano, y = Sen, colour = "MKS", linetype = "MKS"),
size = 1)+
      scale_color_manual(name = "Legenda:",
                        values = c(Precipitação_Média = "Black",M10= "Blue", MKS = "Red"),
                        labels = c(Precipitação_Média = "Precipitação",M10="Média Móvel 10

```

```

anos", MKS = "Mann-Kendall-Sen"))+
  scale_linetype_manual(name = "Legenda:",
    values = c(Precipitação_Média = "solid",M10= "solid", MKS =
"dashed"),
    labels = c(Precipitação_Média = "Precipita??o",M10= "Média Móvel
10 anos", MKS = "Mann-Kendall-Sen"))+
  labs (x = labels_plot[5], y = labels_plot[6],
    title = labels_plot[1],
    subtitle = paste("p.value =", round(df_mks$p.value,2),"/",
      "Sen's Slope =", round(df_mks$sen_slope, 2), sep = " "))
} else {
  plot <- plot+
  scale_color_manual(name = "Legenda:",
    values = c(Precipitação_Média = "black", M10= "blue"),
    labels = c(Precipitação_Média = "Precipita??o",M10= "Média Móvel 10
anos"))+
  scale_linetype_manual(name = "Legenda:",
    values = c(Precipitação_Média = "solid",M10="solid"),
    labels = c(Precipitação_Média = "Precipitação",M10= "Média Móvel
10 anos"))+
  labs (x = labels_plot[5], y = labels_plot[6],
    title = labels_plot[1],
    subtitle = paste("p.value =", round(df_mks$p.value,2), sep = " "))
}

ggsave (
  filename = paste0(dir_plots, "/", "Tendencia_MKS", ".png"),
  plot = last_plot(),
  dpi = 300,
  width = 24,
  height = 12,
  units = "cm"
)

return (plot)
}
dir_TS <- "E:/dados/pr/funceme"
dir_plots <- "E:/resultados/pr/pacoti_riachao/funceme"
getwd()
workdir <- "E:/dados/pr/funceme"
setwd(workdir)
anual <- read.table("totais_anuais_pacoti_riachao.csv", sep = ",", header=F)
anual$M10 <- TTR::SMA(anual$V2,n=10)
anual <- arrange(anual, anual$V1)
names(anual) <- c("Ano", "Valor", "M10")
labels_plot <- c("Precipitação Média Anual BH Pacoti-Riachão",
  "Média Móvel 10 anos",
  "Precipitação (mm)",
  "Precipitação Média",

```

```
"Anos",  
"Precipitação (mm)",  
"Precipitação Média")  
trend (anual, dir_plots, labels_plot)
```

CÓDIGO PARA CÁLCULO DA TRANSFORMADA SIMPLES ONDALETA

```

library (pacman)
p_load(tidyverse, readxl, WaveletComp,lubridate)

dir_TS <- "E:/tese/tas"
dir_plots <- "E:/tese/tas"
getwd()
workdir <- "E:/tese/tas"
setwd(workdir)
anual <- read.table("cru_oros_anual.txt", sep = "\t", header=F)
anual <- arrange(anual, anual$V1)
names(anual) <- c("Ano", "Valor")
labels_plot <- c("Temperatura Média Anual",
                 "Temperatura",
                 "Anos",
                 )

anos <- seq(from = as.Date(paste0(as.character(min(anual$Ano)),"-12","-31")),
           to = as.Date(paste0(as.character(max(anual$Ano)),"-12","-31")), by = "year")

data.wavelets <- data.frame (date = anos, Pr = anual$Valor)
rownames(data.wavelets) <- anual$Ano
data.wavelets$Pr <- scale(data.wavelets$Pr)

wavelets <- analyze.wavelet(data.wavelets, my.series = "Pr",
                           loess.span = 0, method = "white.noise",
                           dt = 1, dj = 1/20,
                           lowerPeriod = 2,
                           upperPeriod = 64,
                           make.pval = TRUE, n.sim = 100)

png(filename="energia.png", width=16, height=12, units="cm", res=300)
wt.image(wavelets, color.key = "quantile", n.levels = 250,
         legend.params = list(lab = "N?veis de Energia", mar =
4.7,cex.lab=2,label.digits=2, n.ticks=10), periodlab = "Periodo", timelab = "Ano",
         show.date = TRUE)
dev.off()

png(filename="potencia.png", width=12, height=12, units="cm", res=300)

wt.avg(wavelets, show.siglvl = T,averagelab="Potência média Ondeletas",periodlab =
"Periodo (anos)", show.legend = T, legend.coords = "topright", verbose = TRUE)
dev.off()

banda_1 <- reconstruct(wavelets, my.series = "Pr", sel.lower= 2, sel.upper = 8,
show.legend = F, only.coi = F,
                        rescale = FALSE, only.sig = F, only.ridge = F, plot.waves = F, plot.rec =
TRUE)

```

```
banda_2 <- reconstruct(wavelets, my.series = "Pr", sel.lower= 9, sel.upper = 31,
show.legend = FALSE, only.coi = F,
rescale = FALSE, only.sig = F, plot.waves = F, plot.rec = TRUE)
```

```
banda_3 <- reconstruct(wavelets, my.series = "Pr", sel.lower= 32, sel.upper = 64,
show.legend = FALSE, only.coi = F,
rescale = FALSE, only.sig = F, plot.waves = F, plot.rec = TRUE)
```

```
data.wavelets$date <- year(data.wavelets$date)
rec_bd1 <- data.frame(date = data.wavelets$date, Pr = banda_1$series$Pr.r)
rec_bd2 <- data.frame(date = data.wavelets$date, Pr = banda_2$series$Pr.r)
rec_bd3 <- data.frame(date = data.wavelets$date, Pr = banda_3$series$Pr.r)
```

```
labels_plot <- c("Temperatura média anual padronizada",
"Temperatura",
"Temperatura (°C)",
"Ano")
```

```
plot_wv <- ggplot()+
  theme_bw()+
  geom_line(data = data.wavelets, aes(x = date, y = Tas, color = "Tas_Padro", linetype =
"Tas_Padro"), size = 1)+
  geom_point(data = data.wavelets, aes(x = date, y = Tas), size = 2, color = "black")+
  geom_line(data = rec_bd3, aes(x = date, y = Tas, color = "banda3", linetype =
"banda3"), size = 1)+
  geom_line(data = rec_bd2, aes(x = date, y = Tas, color = "banda2", linetype =
"banda2"), size = 1)+
  geom_line(data = rec_bd1, aes(x = date, y = Tas, color = "banda1", linetype =
"banda1"), size = 1)+
  scale_color_manual(name = "Legenda:",
values = c(Tas_Padro = "black", banda1 = "green", banda2 = "blue",
banda3 = "red"),
labels = c(Tas_Padro = "Temperatura média anual padronizada", banda1 =
"Banda de 2 a 8 anos",
banda2 = "Banda de 9 a 31 anos", banda3 = "Banda de 32 a 64
anos"))+
  scale_linetype_manual(name = "Legenda:",
values = c(Tas_Padro = "solid", banda1 = "dashed", banda2 = "dashed",
banda3 = "dashed"),
labels = c(Tas_Padro = "Temperatura média anual padronizada", banda1
= "Banda de 2 a 8 anos",
banda2 = "Banda de 9 a 31 anos", banda3 = "Banda de 32 a 64
anos"))+
  labs (x = labels_plot[4], y = labels_plot[2],
caption = labels_plot[2],
title = labels_plot[1])+
  theme(legend.position = "bottom")
```

```
plot(plot_wv)
```

```
ggsave (  
  filename = paste0(dir_plots, "/", "tas_anual_wv", ".png"),  
  plot = plot_wv,  
  dpi = 300,  
  width = 24,  
  height = 12,  
  units = "cm"  
)
```

CÓDIGO PARA CÁLCULO DO SPI / SRI

```
import pandas as pd
import numpy as np
import os
from standard_precip import spi
import matplotlib.pyplot as plt

caminho_arquivo_excel =
'F:\RODADA_2\series_vazoes_bacias_incrementais_8_bacias'

data = pd.read_csv(caminho_arquivo_excel, "/Banabuiu.csv", sep=';')
print(data)

spi_rain = spi.SRI()
sri_12monthly = spi_rain.calculate(data, 'data', 'vazx', freq="M", scale=12,
                                  fit_type="lmom", dist_type="gam")
print(sri_12monthly)
sri_12monthly.to_csv('sri12_banabuiu.csv', index=True)

from standard_precip.utils import plot_index
fig = plot_index(sri_12monthly, 'data', 'pr_scale_12_calculated_index')
plt.savefig("sri12_banabuiu", dpi=400)
```

Tabela 19 - Informações de Início, Fim, Duração, SPI Médio e Categoria dos eventos de seca de maior duração, durante os anos de 1975 e 2020, na escala SPI-12 para as bacias Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM.

Bacia	Início (MM/ANO)	Fim (MM/ANO)	Duração (meses)	SPI Médio	Variação da classificação
Banabuiú	04/1983	03/1984	12	-1,55	M/S
	02/1993	02/1994	13	-1,94	S/E
	03/1998	04/1999	14	-2,10	S/E
	05/2012	06/2013	14	-2,17	S/E
	03/2015	12/2015	10	-1,22	M/S
Castanhão	04/1983	03/1984	12	-1,51	M/S/E
	02/1993	01/1994	12	-1,89	S/E
	04/1998	02/1999	11	-1,45	M/S
	07/2012	06/2013	12	-1,68	M/S/E
	03/2015	12/2015	10	-1,28	M
	06/2016	07/2017	8	-1,19	M
Orós	04/1983	03/1984	12	-1,58	M/S
	01/1993	12/1993	12	-1,53	M/S
	04/1998	03/1999	12	-1,54	M/S
	12/2012	01/2014	16	-1,65	M/S/E
	04/2016	05/2017	14	-1,23	M
RHBM	02/1981	01/1982	12	-1,24	M
	04/1983	03/1984	12	-1,64	M/S
	02/1993	02/1994	13	-2,24	S/E
	04/1997	11/1997	8	-1,10	M
	05/1998	04/1999	12	-1,25	M/S
	05/2012	12/2013	20	-1,41	M/S/E

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 20 Informações de Início, Fim, Duração, SPI Médio e Categoria dos eventos de seca de maior duração, durante os anos de 1975 e 2020, na escala SPI-24 para as bacias Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM.

Bacia	Início (MM/ANO)	Fim (MM/ANO)	Duração (meses)	SPI Médio	Variação da classificação
Banabuiú	03/1983	03/1984	13	-1,16	M
	03/1993	05/1994	15	-1,41	M/S
	04/1998	02/2000	23	-1,58	M/S
	01/2013	04/2014	16	-1,67	M/S/E
	05/2015	04/2017	24	-1,36	M/S
Castanhão	01/1983	03/1984	15	-1,46	M/S
	03/1993	05/1995	15	-1,38	M/S
	11/1998	09/1999	11	-1,07	M
	02/2013	04/2014	15	-1,39	M/S
	11/2015	03/2018	29	-1,36	M/S
Orós	03/1983	03/1984	13	-1,30	M
	03/1993	04/1994	14	-1,27	M
	03/1999	11/1999	9	-1,10	M
	03/2013	01/2015	23	-1,38	M/S
	04/2016	10/2018	31	-1,30	M/S
RHBM	02/1982	04/1984	27	-1,23	M/S
	03/1993	04/1994	14	-1,90	M/S/E
	04/1998	05/1999	14	-1,41	M/S
	02/2013	02/2015	25	-1,53	M/S

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 21 - Informações de Início, Fim, Duração, SRI Médio e Categoria dos eventos de seca de maior duração na escala SRI-12 para as bacias Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM.

Bacia	Início (MM/ANO)	Fim (MM/ANO)	Duração (meses)	SRI Médio	Variação da classificação
Banabuiú	05/1982	03/1984	23	-0,16	L
	02/1994	04/1997	39	-0,16	L
	10/1999	01/2004	52	-0,04	L
	03/2005	03/2009	49	-0,08	L
	06/2010	12/2019	115	-0,57	L/M/S
Castanhão	04/1982	05/1984	26	-0,43	L
	02/1991	03/1995	50	-0,23	L
	05/1997	03/2000	35	-0,20	L
	05/2012	12/2019	92	-0,65	L/M
Orós	12/1978	02/1980	15	-0,39	L
	04/1982	03/1984	24	-1,00	L/M/S
	03/1991	02/1995	48	-0,44	L/M
	03/1998	03/2000	25	-0,46	L
	12/2000	05/2002	18	-2,38	L/M/S/E
	03/2005	04/2006	14	-0,89	L/M
	04/2007	02/2008	11	-0,20	L
	05/2010	02/2011	10	-0,37	L
02/2015	02/2020	61	-0,74	L/M	
RHBM	05/1992	05/1994	25	-0,63	L/M
	04/1997	11/1999	32	-0,70	L/M/S
	04/2006	02/2009	35	-0,49	L
	09/2010	02/2020	114	-0,85	L/M/S/E

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 22 - Informações de Início, Fim, Duração, SRI Médio e Categoria dos eventos de seca de maior duração na escala SRI-24 para as bacias Banabuiú, Castanhão, Orós e RHBM.

Bacia	Início (MM/ANO)	Fim (MM/ANO)	Duração (meses)	SRI Médio	Variação da classificação
Banabuiú	05/1983	03/1984	11	-0,28	L
	07/1991	05/1998	83	-0,16	L
	09/1999	01/2004	53	-0,49	L
	03/2006	03/2009	37	-0,20	L
	05/2011	12/2019	104	-0,74	L/M/S
Castanhão	04/1983	01/1985	22	-0,60	L
	05/1991	03/1996	59	-0,35	L
	04/1998	01/2004	70	-0,36	L
	03/2006	02/2008	24	-0,46	L
	02/2013	12/2019	83	-0,92	L/M/S
Orós	03/1979	02/1981	24	-0,38	L
	03/1983	01/1985	23	-0,66	L/M
	12/1991	01/1996	50	-0,54	L/M
	04/1998	12/2003	69	-0,42	L
	03/2006	02/2008	24	-0,31	L
RHBM	08/2015	12/2019	63	-0,91	L/M/S
	05/1992	03/1995	35	-0,34	L/M
	04/1998	04/2000	25	-0,82	L/M
	05/2006	03/2009	35	-0,53	L
	04/2011	11/2020	116	-0,97	L/M/S

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 23 - Parâmetros calibrados do modelo SMAP mensal.

	Tu_{in}	Eb_{in}	S_{tr}	P_{es}	C_{rec}	K_k
Banabuiú	30	0	908,93	3,063	0	4,5
Castanhão	30	0	495,46	9,261	1,30	6
Orós	30	0	2336,66	4,234	0,74	1
RHBM	30	0	5000	7,454	0	1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 24 - Valores do coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe e coeficiente de correlação de Pearson para as séries calibradas e validadas.

	NSE		R	
	Calibração	Validação	Calibração	Validação
Banabuiú	0,85	0,85	0,87	0,95
Castanhão	0,86	0,55	0,94	0,87
Orós	0,86	0,73	0,87	0,82
RHBM	0,45	0,41	0,68	0,76

Fonte: Elaborada pelo autor.