



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de
Recursos Hídricos

Lucas Pereira de Almeida

**Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu: uma avaliação do risco
futuro de seca sob mudanças climáticas**

Rio de Janeiro

2022

Lucas Pereira de Almeida

Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu: uma avaliação do risco futuro de seca sob mudanças climáticas

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROF-ÁGUA), na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Área de concentração: Regulação e Governança dos Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Rosa Maria Formiga-Johnsson

Coorientador: Pesquisador Me. Victor Costa Porto

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

A447 Almeida, Lucas Pereira de.
Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu: uma avaliação do risco futuro de seca sob mudanças climáticas. / Lucas Pereira de Almeida. – 2022.
195 f. : il.

Orientadora: Rosa Maria Formiga-Johnsson.

Coorientador: Victor Costa Porto.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia e Ciências.

1. Recursos hídricos – Escassez – Paraíba do Sul (RJ) – Teses. 2. Recursos hídricos – Desenvolvimento Sustentável – Teses. 3. Mudanças climáticas – Teses. 4. Bacias hidrográficas – Paraíba do Sul, Rio, Bacia. – Teses. I. Formiga-Johnsson, Rosa Maria. II. Porto, Victor Costa. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia e Ciências. IV. Título.

CDU 556.51(815.3)

Bibliotecária responsável: Fernanda Lobo / CRB-7:5265

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Lucas Pereira de Almeida

Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu: uma avaliação do risco futuro de seca sob mudanças climáticas

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROF-ÁGUA), na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Regulação e Governança dos Recursos Hídricos.

Aprovada em 01 de setembro de 2022.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Rosa Maria Formiga-Johnsson (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Pesquisador. Me. Victor Costa Porto (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Me. Décio Tubbs Filho
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.^a Dr.^a Alexandra Nauditt
Technical University of Applied Sciences Cologne

Rio de Janeiro

2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus amigos, familiares e a todos aqueles que lutam pelo desenvolvimento da pesquisa científica no Brasil.

AGRADECIMENTOS

À Prof.^a Rosa Maria Formiga-Johnsson, grande pesquisadora, amiga, fonte de inspiração, cuja confiança e visão favoreceram meu desenvolvimento e o alcance de resultados, para mim, até então improváveis.

Ao Prof. Francisco de Assis de Souza Filho por me abraçar em seu Grupo de Pesquisa em Gerenciamento do Risco Climático para a Sustentabilidade Hídrica, cuja experiência muito me ajudou com o desenvolvimento deste trabalho. Agradecimento especial aos colegas Victor Costa Porto, Ályson Brayner Sousa Estácio e Sullyandro Oliveira Guimarães, cuja paciência, boa vontade e experiência me ajudaram imensamente.

À minha família, especialmente à minha mãe e à minha irmã, cujo amor e carinho incondicionais me auxiliam no caminhar diário, independente da distância e do dia a dia atarefado. Vocês são essenciais na minha vida!

Ao Gabriel, meu melhor amigo e companheiro, presente em mais uma seção de agradecimentos, por todo apoio, carinho e paciência.

Às minhas amigas queridas, presentes do Prof^água, Ingrid Delgado e Andréia Schypula, pelo acolhimento, companheirismo, conhecimento, generosidade e pelas palavras incentivadoras nos momentos de maior desafio.

Aos amigos, os de longa data e os que esse percurso me deram, agradeço por toda a força.

Aos profissionais e professores que estiveram presentes durante esse processo, ministrando disciplinas, participando nas bancas de qualificação e defesa.

Ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Prof^água UERJ pelo apoio técnico e científico oferecido, à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – CAPES pelo apoio ao Prof^água uma vez que o presente trabalho foi realizado com apoio da CAPES – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da ANA através do Projeto CAPES/ANA AUXPE nº 2717/2015.

Sempre que a ciência for atacada, temos que nos levantar.

Ricardo Galvão

RESUMO

ALMEIDA, Lucas Pereira. *Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu: uma avaliação do risco futuro de seca sob mudanças climáticas*. 2022. 195 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROF-ÁGUA), Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

As mudanças climáticas representam ameaça ao desenvolvimento sustentável do planeta, levando a uma maior ocorrência de eventos climáticos severos. Estes eventos já vêm causando impactos significativos no desenvolvimento econômico social, especialmente em razão da escassez hídrica. No Brasil, eventos de seca impactam milhares de pessoas anualmente. No Sudeste, as secas relacionadas às crises hídricas ocorridas entre os anos de 2014 e 2016 envolveram uma das maiores aglomerações populacionais do país, além do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu. Tanto em sua área de abrangência, quanto na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, a Bacia do Paraíba do Sul é indispensável para o provimento de água aos usos múltiplos, dentre eles o abastecimento humano, a geração de energia, o uso industrial e a agricultura, que, por vezes, conflitam em situações de escassez. Dessa forma, torna-se indispensável a realização de estudos que subsidiem debates sobre a compatibilização dos interesses internos e externos à Bacia do rio Paraíba do Sul, principalmente aqueles que ocorrem em meio as situações de eventos climáticos extremos. A possibilidade de quantificação dos riscos climáticos permite que decisões adaptativas possam ser tomadas e que os impactos de tais eventos sejam minimizados, reduzindo o grau de vulnerabilidade de uma determinada região. Com isso, este trabalho visou a realização de uma avaliação das secas para o Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu considerando modelos e cenários de mudanças climáticas endossados pelo CMIP6. Os modelos globais apresentaram correlações suficientemente elevadas em relação à climatologia observada no período histórico, demonstrando que os modelos são capazes de captar as variações sazonais e interanuais da região apesar de incertezas intrínsecas à variabilidade do clima. A partir de resultados deste trabalho, foi possível observar que as projeções futuras tendem a identificar secas menos frequentes e menos intensas quando comparadas aos dados observados, apontando, de uma forma geral, para um futuro mais favorável em termos de escoamento superficial e disponibilidade hídrica; o que não descarta a ocorrência de eventos de seca excepcionais ou ainda de outros eventos extremos, como enchentes e inundações.

Palavras-chave: Bacia do rio Paraíba do Sul. Avaliação das Secas. CMIP6.

ABSTRACT

ALMEIDA, Lucas Pereira. *Paraíba do Sul-Guandu Hydraulic System: an assessment of future drought risk under climate change*. 2022. 195 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROF-ÁGUA), Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Climate change poses a threat to the sustainable development of the planet, leading to a greater occurrence of severe weather events. These events are already causing significant impacts on social and economic development, especially due to water scarcity. In Brazil, drought events impact thousands of people annually. In Southeast Brazil, the droughts related to the water crisis that occurred between 2014 and 2016 involved one of the largest population agglomerations in the country, in addition to the Paraíba do Sul-Guandu Hydraulic System. Both in its area of coverage and in the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, the Paraíba do Sul river basin is essential for the provision of water for multiple uses, including human supply, energy generation, industrial use and agriculture, which sometimes conflict in scenarios of scarcity. Thus, it is essential to carry out studies that support debates on the compatibility of internal and external interests in the Paraíba do Sul basin, especially those that occur in the midst of extreme weather events. The possibility of quantifying climate risks allows adaptive decisions to be taken and the impacts of such events to be minimized, reducing the degree of vulnerability of a given region. With that been said, this work aimed to carry out an assessment of the future risk of drought for the Paraíba do Sul-Guandu Hydraulic System considering models and climate change scenarios endorsed by the CMIP6. The global models presented sufficiently high correlations with the climatology observed in the historical period, demonstrating that they are capable of capturing seasonal and interannual variations in the region despite the uncertainties intrinsic to climate variability. According to the results of this research, it was possible to observe that future projections tend to identify less frequent and less intense droughts when compared to the observed data, generally pointing to a more favorable future in terms of surface runoff and water availability; which does not rule out the occurrence of exceptional drought events or even other extreme events, such as floods and inundations.

Keywords: Paraíba do Sul River Basin. Drought Risk. CMIP6.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1 – Etapas metodológicas adotadas e objetivos específicos | 25 |
| Figura 2 – Alterações climáticas projetadas para as Américas Central e do Sul..... | 34 |
| Figura 3 – Temperatura global avaliada conforme SSP (1980-2080)..... | 36 |
| Figura 4 – Ciclo “hidro-ilógico” ilustrado..... | 41 |
| Figura 5 – Racional adotado para aplicação do modelo..... | 44 |
| Figura 6 – Downscaling estatístico através do Método dos Polígonos de Thiessen | 47 |
| Figura 7 – Remoção de viés através da função de distribuição gama | 48 |
| Figura 8 – Diagrama conceitual do modelo chuva-vazão SMAP mensal | 50 |
| Figura 9 – Representação esquemática das características associadas as secas | 56 |
| Figura 10 – Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e municípios abrangidos | 57 |
| Figura 11 – Regiões hidrográficas abrangidas pela bacia do rio Paraíba do Sul..... | 58 |
| Figura 12 – Aproveitamentos hidrelétricos e reservatórios de regularização | 60 |
| Figura 13 – Diagrama unifilar do Sistema..... | 61 |
| Figura 14 – Esquema do aproveitamento hidrelétrico do Complexo de Lajes..... | 62 |
| Figura 15 – Volume acumulado pelos reservatórios do Sistema | 63 |
| Figura 16 – Definição da área de estudo e modelagem hidrológica..... | 65 |
| Figura 17 – Climatologia das regiões hidrográficas da bacia do Paraíba do Sul | 66 |
| Figura 18 – Vazões incrementais afluentes em Santa Cecília no cenário SSP2-4,5 | 81 |
| Figura 19 – Vazões incrementais afluentes em Santa Cecília no cenário SSP5-8,5 | 82 |
| Figura 20 – Anomalia percentual média das vazões anuais do CMIP6 no cenário SSP2-4,5 .. | 87 |
| Figura 21 – Anomalia percentual média das vazões anuais do CMIP6 no cenário SSP5-8,5 .. | 89 |
| Figura 22 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Santa Cecília | 89 |
| Figura 23 – Avaliação da seca com SPI3 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 | 93 |
| Figura 24 – Avaliação da seca com SPI6 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 | 95 |
| Figura 25 – Avaliação da seca com SPI12 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 | 97 |
| Figura 26 – Climatologia histórica em Paraibuna | 124 |
| Figura 27 – Climatologia histórica em Santa Branca | 124 |
| Figura 28 – Climatologia histórica em Jaguari..... | 125 |
| Figura 29 – Climatologia histórica em Funil..... | 126 |
| Figura 30 – Climatologia histórica em Santa Cecília | 126 |
| Figura 31 – Climatologia histórica em Santana..... | 127 |

| | |
|--|-----|
| Figura 32 – Climatologia histórica em Tocos | 128 |
| Figura 33 – Climatologia histórica em Sobragi | 128 |
| Figura 34 – Climatologia histórica em Anta | 129 |
| Figura 35 – Climatologia histórica em Ilha dos Pombos | 130 |
| Figura 36 – Precipitação projetada em Paraibuna no cenário SSP2-4,5 | 131 |
| Figura 37 – Precipitação projetada em Paraibuna no cenário SSP5-8,5 | 131 |
| Figura 38 – Precipitação projetada em Santa Branca no cenário SSP2-4,5 | 132 |
| Figura 39 – Precipitação projetada em Santa Branca no cenário SSP5-8,5 | 133 |
| Figura 40 – Precipitação projetada em Jaguari no cenário SSP5-4,5 | 133 |
| Figura 41 – Precipitação projetada em Jaguari no cenário SSP5-8,5..... | 134 |
| Figura 42 – Precipitação projetada em Funil no cenário SSP2-4,5..... | 135 |
| Figura 43 – Precipitação projetada em Funil no cenário SSP5-8,5 | 135 |
| Figura 44 – Precipitação projetada em Santana no cenário SSP2-4,5..... | 136 |
| Figura 45 – Precipitação projetada em Santana no cenário SSP5-8,5..... | 137 |
| Figura 46 – Precipitação projetada em Tócos no cenário SSP5-8,5 | 137 |
| Figura 47 – Precipitação projetada em Santa Cecília no cenário SSP2-4,5 | 138 |
| Figura 48 – Precipitação projetada em Santa Cecília no cenário SSP5-8,5 | 139 |
| Figura 49 – Precipitação projetada em Sobragi no cenário SSP2-4,5 | 139 |
| Figura 50 – Precipitação projetada em Sobragi no cenário SSP5-8,5..... | 140 |
| Figura 51 – Precipitação projetada em Anta no cenário SSP2-4,5..... | 141 |
| Figura 52 – Precipitação projetada em Anta no cenário SSP5-8,5..... | 141 |
| Figura 53 – Precipitação projetada em Ilha dos Pombos no cenário SSP2-4,5..... | 142 |
| Figura 54 – Precipitação projetada em Ilha dos Pombos no cenário SSP5-8,5..... | 143 |
| Figura 55 – Temperatura média projetada em Paraibuna no cenário SSP2-4,5 | 143 |
| Figura 56 – Temperatura média projetada em Paraibuna no cenário SSP5-8,5 | 144 |
| Figura 57 – Temperatura média projetada em Santa Branca no cenário SSP2-4,5..... | 145 |
| Figura 58 – Temperatura média projetada em Santa Branca no cenário SSP5-8,5..... | 145 |
| Figura 59 – Temperatura média projetada em Jaguari no cenário SSP2-4,5 | 146 |
| Figura 60 – Temperatura média projetada em Jaguari no cenário SSP5-8,5 | 147 |
| Figura 61 – Temperatura média projetada em Funil no cenário SSP2-4,5 | 147 |
| Figura 62 – Temperatura média projetada em Funil no cenário SSP5-8,5..... | 148 |
| Figura 63 – Temperatura média projetada em Santana no cenário SSP2-4,5 | 149 |
| Figura 64 – Temperatura média projetada em Santana no cenário SSP5-8,5 | 149 |
| Figura 65 – Temperatura média projetada em Tócos no cenário SSP2-4,5 | 150 |

| | |
|--|-----|
| Figura 66 – Temperatura média projetada em Tócos no cenário SSP5-8,5 | 151 |
| Figura 67 – Temperatura média projetada em Santa Cecília no cenário SSP2-4,5 | 151 |
| Figura 68 – Temperatura média projetada em Santa Cecília no cenário SSP5-8,5..... | 152 |
| Figura 69 – Temperatura média projetada em Sobragi no cenário SSP2-4,5 | 153 |
| Figura 70 – Temperatura média projetada em Sobragi no cenário SSP5-8,5 | 153 |
| Figura 71 – Temperatura média projetada em Anta no cenário SSP2-4,5 | 154 |
| Figura 72 – Temperatura média projetada em Anta no cenário SSP5-8,5 | 155 |
| Figura 73 – Temperatura média projetada em Ilha dos Pombos no cenário SSP2-4,5 | 155 |
| Figura 74 – Temperatura média projetada em Ilha dos Pombos no cenário SSP5-8,5 | 156 |
| Figura 75 – Vazão incremental afluyente em Paraibuna no cenário SSP2-4,5 | 157 |
| Figura 76 – Vazão incremental afluyente em Paraibuna no cenário SSP5-8,5 | 157 |
| Figura 77 – Vazão incremental afluyente em Santa Branca no cenário SSP2-4,5..... | 158 |
| Figura 78 – Vazão incremental afluyente em Santa Branca no cenário SSP5-8,5..... | 159 |
| Figura 79 – Vazão incremental afluyente em Jaguari no cenário SSP2-4,5 | 159 |
| Figura 80 – Vazão incremental afluyente em Jaguari no cenário SSP5-8,5..... | 160 |
| Figura 81 – Vazão incremental afluyente em Funil no cenário SSP2-4,5..... | 161 |
| Figura 82 – Vazão incremental afluyente em Funil no cenário SSP5-8,5..... | 161 |
| Figura 83 – Vazão incremental afluyente em Santana no cenário SSP2-4,5 | 162 |
| Figura 84 – Vazão incremental afluyente em Santana no cenário SSP5-8,5 | 163 |
| Figura 85 – Vazão incremental afluyente em Tócos no cenário SSP2-4,5 | 163 |
| Figura 86 – Vazão incremental afluyente em Tócos no cenário SSP5-8,5 | 164 |
| Figura 87 – Vazão incremental afluyente em Sobragi no cenário SSP2-4,5..... | 165 |
| Figura 88 – Vazão incremental afluyente em Sobragi no cenário SSP5-8,5..... | 165 |
| Figura 89 – Vazão incremental afluyente em Anta no cenário SSP2-4,5 | 166 |
| Figura 90 – Vazão incremental afluyente em Anta no cenário SSP5-8,5 | 167 |
| Figura 91 – Vazão incremental afluyente em Ilha dos Pombos no cenário SSP2-4,5 | 167 |
| Figura 92 – Vazão incremental afluyente em Ilha dos Pombos no cenário SSP5-8,5 | 168 |
| Figura 93 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Paraibuna | 169 |
| Figura 94 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Santa Branca | 169 |
| Figura 95 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Jaguari..... | 170 |
| Figura 96 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Funil..... | 171 |
| Figura 97 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Santana..... | 171 |
| Figura 98 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Tócos | 172 |
| Figura 99 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Sobragi..... | 173 |

| | |
|--|-----|
| Figura 100 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Anta | 173 |
| Figura 101 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Ilha dos Pombos..... | 174 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Caracterização dos cenários no ScenarioMIP | 37 |
| Tabela 2 – Classificação das secas | 38 |
| Tabela 3 – Modelos de circulação global do CMIP6 utilizados | 46 |
| Tabela 4 – Classificação do desempenho dos modelos | 53 |
| Tabela 5 – Valores SPI em relação à classificação de seca | 55 |
| Tabela 6 – Aproveitamentos hidrelétricos e reservatórios na bacia do rio Paraíba do Sul | 59 |
| Tabela 7 – Características dos reservatórios à montante de Santa Cecília | 62 |
| Tabela 8 – Comitês atuantes na Bacia do Paraíba do Sul | 70 |
| Tabela 9 – Contratos de gestão na bacia do rio Paraíba do Sul | 71 |
| Tabela 10 – Descargas mínimas das operações dos reservatórios do Sistema | 72 |
| Tabela 11 – Avaliação dos modelos para Paraibuna..... | 119 |
| Tabela 12 – Avaliação dos modelos para Santa Branca..... | 119 |
| Tabela 13 – Avaliação dos modelos para Jaguari | 120 |
| Tabela 14 – Avaliação dos modelos para Funil | 120 |
| Tabela 15 – Avaliação dos modelos para Santana | 121 |
| Tabela 16 – Avaliação dos modelos para Tócos | 121 |
| Tabela 17 – Avaliação dos modelos para Santa Cecília | 122 |
| Tabela 18 – Avaliação dos modelos para Sobragi | 122 |
| Tabela 19 – Avaliação dos modelos para Anta | 123 |
| Tabela 20 – Avaliação dos modelos para Ilha dos Pombos | 123 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACCESS-CM2 | <i>Australian Community Climate and Earth System Simulator – Climate Model Version 2</i> |
| ACCESS-ESM1-5 | <i>Australian Community Climate and Earth System Simulator Earth System Model Version 1.5</i> |
| ANA | Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| AR6-WGI | <i>Working Group I Sixth Assessment Report</i> |
| BCC-CSM2-MR | <i>Beijing Climate Center - Climate System Model Version 2 – Medium Resolution</i> |
| BPI | Sub-bacia do rio Pirai |
| CanESM5 | <i>Canadian Earth System Model Version 5</i> |
| CBH | Comitês de Bacia Hidrográficas |
| CEIVAP | Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica da Bacia do Rio Paraíba do Sul |
| CERH | Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos |
| CESP | Companhia Energética de São Paulo |
| CGEE | Centro de Gestão e Estudos Estratégicos |
| CMCC-ESM2 | <i>Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici</i> |
| CMIP | <i>Coupled Model Intercoparison Project</i> |
| CNRH | Conselho Nacional de Recursos Hídricos |
| CORREL | Correlação de Pearson |
| COVID-19 | <i>Coronavirus disease</i> |
| CRU TS | <i>Climate Research Unit Gridded Time Series</i> |
| DAEE | Departamento de Águas e Energia Elétrica |
| Eb | Fluxo de Base |
| Ebi | Fluxo de Base Inicial |
| ERROP | Erro Quadrático Médio |
| Es | Parâmetro escoamento superficial |
| ETA | Estação de Tratamento de Água |
| FGOALS-G3 | <i>Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model Grid-Point Version 3</i> |
| FIO-ESM | <i>The First Institute of Oceanography Earth System Model</i> |
| FIO-ESM-2-0 | <i>The First Institution of Oceanography Earth System Model Version 2</i> |

| | |
|-----------------|---|
| GAOPS | Grupo de Assessoramento à Operação do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul |
| GRC | Grupo de Riscos Climáticos |
| GTAOH | Grupo de Trabalho Permanente de Acompanhamento da Operação Hidráulica |
| GVCES | Centro De Estudos Em Sustentabilidade Da FVG |
| GWP | <i>Global Water Partnership</i> |
| HadGEM3 | <i>Hadley Centre Global Environment Model version 3</i> |
| HadGEM3-GC31-LL | <i>Hadley Centre Global Environment Model in the Global Coupled Configuration 3.1</i> |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IGAM | Instituto Mineiro de Gestão das Águas |
| INCT | Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas |
| INCT | Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas |
| INEA | Instituto Estadual do Ambiente |
| IPCC | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> |
| IPSL-CM6A-LR | <i>Institut Pierre-Simon Laplace Climate Model (CMIP6) Low Resolution</i> |
| ISSO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| JCS | Sub-bacias a jusante de Santa Cecília |
| K | Taxa de Rebaixamento |
| MCG | Modelos Climáticos Globais |
| MIP | <i>Model Intercomparison Projects</i> |
| MIROC6 | <i>Model for Interdisciplinary Research on Climate Version 6</i> |
| MSC | Sub-bacias a montante de Santa Cecília |
| MPF | Ministério Público Federal |
| MPI-ESM1-2-HR | <i>Max Planck Institute Earth System Model Version 1.2 for High Resolution</i> |
| MPI-ESM1-2-LR | <i>Max Planck Institute Earth System Model Version 1.2 for Low Resolution</i> |
| MRI-ESM2-0 | <i>Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0</i> |
| NESM3 | <i>NUIST Earth System Model Version 3</i> |
| OCDE | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico |
| ODS | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável |
| OGERH | Órgãos Gestores Estaduais de Recursos Hídricos |
| NOS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PBMC | Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas |

| | |
|-------------|--|
| PIRH OS | Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul |
| PNSH | Plano Nacional de Segurança Hídrica |
| RCP | <i>Representative Concentration Pathways</i> |
| Rec | Coeficiente de Recarga Subterrânea |
| RMRJ | Região Metropolitana do Rio de Janeiro |
| RMSP | Região Metropolitana de São Paulo |
| Rsub | Reservatório Subterrâneo |
| SABESP | Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo |
| Sat | Capacidade de Saturação do solo |
| ScenarioMIP | <i>Scenario Model Intercomparison Project</i> |
| SIGA | Sistema Integrado de Gestão das Águas |
| SINGREH | Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos |
| SMAP | <i>The Soil Moisture Accounting Procedure Model</i> |
| SPI | <i>Standardized Precipitation Index</i> |
| SSP | <i>Shared Socioeconomic Pathways</i> |
| SWP | <i>Sustainable Water Partnership</i> |
| Tui | Teor de Umidade do Solo Inicial |
| UEA | <i>University of East Anglia</i> |
| UFC | Universidade Federal do Ceará |
| UNDP | <i>United Nations Development Programme</i> |
| UP | Unidade de Planejamento |
| USAID | <i>U.S. Agency for International Development</i> |
| WCRP | <i>World Climate Research Programme</i> |
| WEF | <i>World Economic Forum</i> |
| WMO | <i>World Meteorological Organization</i> |
| WWC | <i>World Water Council</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|---------|---|----|
| | INTRODUÇÃO | 19 |
| 1 | OBJETIVOS | 22 |
| 1.1 | Objetivo geral | 22 |
| 1.2 | Objetivos específicos | 22 |
| 2 | MATERIAL E MÉTODOS | 23 |
| 2.1 | Justificativa da pesquisa | 23 |
| 2.2 | Organização do trabalho | 24 |
| 2.3 | Metodologia de pesquisa | 25 |
| 3 | REFERENCIAL TEÓRICO | 26 |
| 3.1 | Segurança hídrica | 26 |
| 3.2 | Mudanças climáticas | 30 |
| 3.2.1 | <u>Impactos das Estiagens</u> | 31 |
| 3.2.2 | <u>IPCC-AR6</u> | 32 |
| 3.2.2.1 | CMIP6 | 33 |
| 3.2.2.2 | ScenarioMIP | 35 |
| 3.3 | Conceitos de seca | 37 |
| 3.4 | Gestão do risco de seca | 40 |
| 4 | PROCEDIMENTO METODOLÓGICO | 44 |
| 4.1 | Definição dos cenários | 44 |
| 4.2 | Obtenção de dados | 45 |
| 4.3 | <i>Downscaling</i> estatístico e correção de viés | 47 |
| 4.4 | Cálculo da evapotranspiração | 49 |
| 4.5 | Modelagem hidrológica | 49 |
| 4.6 | Avaliação de desempenho dos MCGs | 51 |
| 4.7 | Avaliação das secas | 53 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5 | ÁREA DE ESTUDO | 57 |
| 5.1 | Área de abrangência | 57 |
| 5.2 | Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu | 59 |
| 5.3 | Características climáticas | 65 |
| 5.4 | Gestão e governança do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu | 69 |
| 6 | RESULTADOS | 74 |
| 6.1 | Desempenho dos MCGs | 74 |
| 6.2 | Projeções hidroclimatológicas | 77 |
| 6.2.1 | <u>Projeções de temperatura</u> | 78 |
| 6.2.2 | <u>Projeções de precipitação</u> | 79 |
| 6.2.3 | <u>Projeções das vazões afluentes</u> | 80 |
| 7 | ANOMALIAS, AVALIAÇÃO DA SECA E GESTÃO DE RISCO | 84 |
| 7.1 | Considerações sobre as incertezas dos modelos | 84 |
| 7.2 | Anomalia das vazões naturais | 86 |
| 7.3 | Avaliação das secas projetadas para a transposição | 91 |
| 7.4 | Considerações sobre gestão de riscos | 99 |
| | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 102 |
| | REFERÊNCIAS | 106 |
| | APÊNDICE A – Avaliação dos MCGs por área de interesse | 119 |
| | APÊNDICE B – Climatologia histórica das áreas de interesse | 124 |
| | APÊNDICE C – Climatologia e vazões projetadas das áreas de interesse | 131 |
| | APÊNDICE D – Anomalia percentual das vazões naturais afluentes | 169 |
| | APÊNDICE E – Avaliação das secas em Santa Cecília | 175 |

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas ameaçam o desenvolvimento sustentável do planeta, conforme reforçado em relatório recente do IPCC (2021; 2022) que indica que as emissões de gases do efeito estufa serão responsáveis por um aquecimento médio de 1,5°C em todas as regiões do globo ao longo dos próximos anos.

Como efeito, o aumento da temperatura vem sendo acompanhado pela intensificação de eventos extremos como secas e inundações; causando drásticas mudanças no ciclo hidrológico, alterando padrões de precipitação e evapotranspiração, alterando a vazão dos rios e, conseqüentemente, a vazão regularizada de reservatórios, tornando inválido o pressuposto da estacionariedade. Essas alterações exercem grande pressão sobre os sistemas hídricos, principalmente quando aliado ao aumento da população e da demanda pela água (Fernandes et al., 2017; Fernandes et al, 2019; Rolim, Souza-Filho & Rocha, 2019, UN WATER, 2020; IPCC, 2021).

Estes eventos já vêm causando impactos no desenvolvimento econômico e social, especialmente em razão da escassez hídrica, causada por secas prolongadas. Com isso, a água se torna o cerne para a superação dos principais desafios enfrentados pela sociedade, sendo eles: segurança alimentar, redução da pobreza, produção de energia, resiliência climática e saúde (Oliveira-Silva & Souza-Filho, 2019; OCDE, 2022; IPCC, 2021;2022).

Segundo a UN WATER (2020), a variabilidade climática e os eventos extremos já afetam severamente as Américas Central e do Sul e para diversos países nessa região, as mudanças climáticas ocorrem em um cenário de competição pela água entre os múltiplos usos, incluindo competição entre áreas urbanas, setores de energia, agricultura e necessidades do ecossistema.

No Brasil, as secas relacionadas às crises ocorridas entre 2014 e 2016 envolveram duas das maiores aglomerações populacionais do país: a Região Metropolitana de São Paulo - RMSP, que foi impactada pela crise no Sistema Cantareira, localizado na Bacia do rio Piracicaba (SP), e a Região Metropolitana do Rio de Janeiro - RMRJ, que depende em grande parte das águas transpostas do rio Paraíba do Sul para a Bacia do rio Guandu (RJ). Essa cadeia de eventos suscitou um conflito federativo sobre a alocação de água na Bacia do rio Paraíba do Sul e sobre a operação do Sistema Hidráulico da região, responsável pela regularização dos reservatórios e pelo abastecimento da população em sua área de abrangência e na RMRJ (ANA, 2019; SABESP, 2020; Vasconcelos, Formiga-Johnsson, Ribeiro, 2019).

A Bacia do rio Paraíba do Sul está localizada entre três dos Estados mais populosos do Brasil (Figura 10), abrangendo um total de 184 municípios, sendo 39 no Estado de São Paulo, 57 no Estado do Rio de Janeiro e 88 no Estado de Minas Gerais (CEIVAP, 2020; CEIVAP, 2021). Essa Bacia possui um conjunto de infraestruturas hidráulicas que tem como objetivo principal a geração de energia elétrica, mas que assumiram significativa importância para a manutenção do abastecimento de múltiplos usos. Esse conjunto é denominado de Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu, cuja operação em cascata é de responsabilidade do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (Silveira & Assis, 2019; Vasconcelos, Formiga-Johnsson, Ribeiro, 2019; CEIVAP, 2021).

Além da população em sua área de abrangência, a bacia é responsável por prover água para o abastecimento de aproximadamente 13 milhões de pessoas na RMRJ, através da transposição realizada na usina elevatória de Santa Cecília, localizada nas proximidades do município de Barra do Piraí/RJ (CEIVAP, 2018a; Comitê Guandu, 2018a; Comitê Guandu, 2015), que possui capacidade de transpor até 160 m³/s (atualmente em 119 m³/s, conforme Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1.382/15).

Diante deste complexo cenário, o Plano Integrado de Recursos Hídricos do Paraíba do Sul – PIRH-PS (CEIVAP, 2018) menciona o importante papel da gestão para a compatibilização dos mais variados interesses, principalmente aqueles referentes a bacia federal e seus afluentes estaduais, como a Bacia do rio Guandu (RJ) e a Bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (SP), ambas bacias receptoras de transposições de águas do rio Paraíba do Sul que, por sua vez, são mananciais de abastecimento de regiões metropolitanas.

Nesse contexto, é fundamental o desenvolvimento de estudos que subsidiem debates sobre a alocação de água e segurança hídrica na região, principalmente em ocasião de eventos climáticos extremos. Como exemplo, tem-se que a disponibilização de dados sobre o clima pode permitir que decisões adaptativas sejam tomadas e que, assim, minimizem o impacto deste sobre os sistemas hídricos, reduzindo o grau de vulnerabilidade das regiões dependentes. Dessa forma, uma gestão proativa e de alerta precoce exige análise e caracterização de eventos climáticos observados no passado, assim como da projeção de eventos futuros (Wilhite et al., 2000; González & Morcillo, 2007; Marcelino, 2008). Tratando-se de eventos de seca, a análise de sua duração e severidade se torna uma ferramenta indispensável para o planejamento adaptativo.

À frente na produção de informação sobre projeções climáticas, o *Coupled Model Intercomparison Project* – CMIP é um conjunto de modelos climáticos globais que realizam

experimentos a partir da representação de interações da atmosfera, dos oceanos e da superfície terrestre (Meehl et al., 1997). Ao longo de seis fases, o CMIP vem contribuindo com as mais importantes pesquisas das ciências climáticas (Eyring et al., 2016; IPCC, 2021; 2022).

Considerando os modelos e cenários endossados pela sexta fase do CMIP – sua fase mais recente, o CMIP6 –, este trabalho visa analisar as secas projetadas para o Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu e a variabilidade de suas vazões afluentes em cenários de mudanças do clima. Os dados e as informações geradas a partir da análise poderão dar subsídios para o aprimoramento de uma política de gestão adaptativa na região, bem como poderá apontar cenários possivelmente críticos.

Vale ressaltar que os planos de recursos hídricos da área de abrangência da Bacia do rio Paraíba do Sul ainda não contam com detalhamento sobre os impactos das mudanças do clima na disponibilidade de água, nem mesmo contam com ações suficientes para fomento à gestão adaptativa. Dessa forma, espera-se colocar luz sobre o tema e apontar possíveis cenários e lacunas que devem ser observados de modo a colaborar com o aumento da segurança hídrica e com a redução da vulnerabilidade climática desse Sistema.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo principal identificar tendências de variação da vazão natural afluyente do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu em face às mudanças climáticas globais e, em especial, das vazões ofertadas para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro - RMRJ e demais usuários do rio Guandu, através da transposição do rio Paraíba do Sul em Santa Cecília.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) avaliar o desempenho dos modelos climáticos na representação das séries históricas através de índices estatísticos;
- b) apresentar a projeção hidroclimatológica da região para o século XXI de acordo com os cenários de forçantes definidos pelo IPCC;
- c) analisar as anomalias futuras das vazões naturais afluentes aos reservatórios do Sistema Hidráulico de acordo com os modelos climáticos do CMIP6 e cenários acima mencionados;
- d) desenvolver análise das secas futuras, considerando as bacias a jusante da usina elevatória de Santa Cecília, quanto à frequência e intensidade dos eventos em relação ao período histórico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Justificativa da pesquisa

A Bacia do rio Paraíba do Sul possui importância estratégica para o abastecimento de sua própria área de abrangência e de bacias vizinhas, como a Bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (SP) e, principalmente, para a Bacia do rio Guandu (RJ), que depende fortemente da transposição de Santa Cecília para os múltiplos usos; dentre eles a geração de energia e o abastecimento de cerca de 83% da população da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

A ocorrência de eventos extremos de seca na Região Sudeste brasileira, como a que atingiu o Sistema Cantareira e a Bacia do rio Paraíba do Sul entre os anos de 2014 e 2016, evidencia a necessidade de aprimoramento da gestão adaptativa da região.

Este aprimoramento depende da ampliação do conhecimento sobre o tema e da geração de dados que considerem aspectos relacionados às mudanças do clima e seus impactos sobre a disponibilidade hídrica, além da apropriação deste conhecimento pelos instrumentos de gestão¹ como, por exemplo, os Planos de Recursos Hídricos - PRH, que atualmente apresentam lacuna a ser preenchida sobre a temática.

Uma das iniciativas previstas no Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima é a elaboração de projeções climáticas para o presente e futuro a partir da integração dos Modelos Climáticos Globais - MCGs e de sua regionalização, além de aumentar o conhecimento científico sobre projeções climáticas em escala regional (BRASIL, 2016).

Dessa forma, este trabalho está alinhado com as metas do Plano de Adaptação e com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, no que concerne ao ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima, ao gerar dados e informações relevantes para o aprimoramento da gestão adaptativa do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu.

A partir da regionalização dos MCGs do CMIP6 e da análise das secas, serão geradas informações de temperatura, precipitação, evapotranspiração e vazão para a Bacia do rio Paraíba do Sul, considerando diversos modelos e cenários, até o ano de 2100, que poderão ser incorporados no Plano de Recursos Hídricos da região, aprimorando as cenarizações de disponibilidade hídrica até então realizadas.

¹ Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997)

2.2 Organização do trabalho

Este trabalho se encontra dividido em nove partes, sendo: introdução, objetivos, materiais e métodos, referencial teórico, procedimento metodológico, área de estudo, resultados, discussões e considerações finais.

O referencial teórico (Capítulo 3) busca fundamentar o trabalho através da apresentação de conceitos já difundidos em estudos de relevância nacional e internacional que tratam sobre segurança hídrica, mudanças climáticas, conceitos de seca e gestão do risco de seca.

Em seguida, o procedimento metodológico (Capítulo 4) é apresentado trazendo em detalhes as etapas do projeto, demonstrando ainda como foram definidos os cenários e as fontes de dados.

A metodologia foi subdividida da seguinte forma: (a) definição de cenários; (b) coleta de dados e correção de viés; (c) cálculo da evapotranspiração e modelagem hidrológica; (f) avaliação de desempenho dos MCGs - Modelos Climáticos Globais; (g) avaliação das secas; e (f) panorama da gestão adaptativa na região.

Por sua vez, o capítulo da área de estudo (Capítulo 5) visa apresentar a unidade geográfica em que o trabalho manteve seu foco, a Bacia do rio Paraíba do Sul, localizada no Sudeste brasileiro. Neste tópico será apresentada a estrutura de governança de recursos hídricos da região, bem como o regime de operação dos reservatórios, sua oferta hídrica atual e características climáticas.

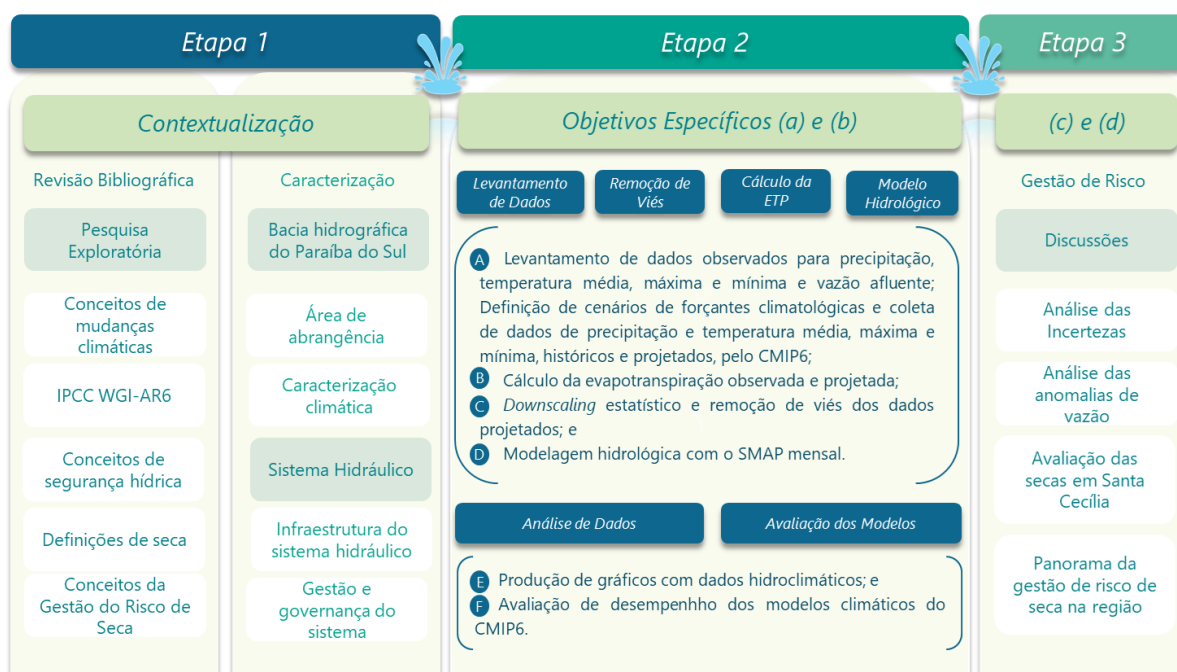
Em seguida, serão apresentados os principais resultados da aplicação da metodologia na área de interesse (Capítulo 6), subsidiando discussões sobre as condições do clima projetado para a região (Capítulo 7).

Por fim, as considerações finais trarão a importância do estudo apresentado, bem como sua contribuição para a gestão de recursos hídricos da região e para trabalhos futuros.

2.3 Metodologia de pesquisa

A Figura 1 apresenta o esquema metodológico adotado, tendo como base o referencial teórico estudado, sugestões de especialistas e a disponibilidade dos dados de entrada do modelo hidrológico.

Figura 1 – Etapas metodológicas adotadas e objetivos específicos



Fonte: O autor, 2022.

Inicialmente foi realizada pesquisa exploratória composta pelo levantamento bibliográfico e alinhamento com pesquisadores do Grupo de Riscos Climáticos (GRC) da Universidade Federal do Ceará (UFC), especialistas no tema. Em seguida, foi realizada a definição dos cenários de forçantes climatológicas a serem utilizados, bem como a coleta e organização dos dados necessários.

Por fim foi adotado racional para aplicação da metodologia, tendo este sido dividido nas seguintes etapas: (a) *downscaling* estatístico; (b) correção de viés; (c) cálculo da evapotranspiração; (d) calibração do modelo hidrológico; (e) simulação hidrológica; (f) avaliação dos modelos climáticos; e (g) análise das secas projetadas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este trabalho utiliza como referencial teórico trabalhos em português ou em inglês (livros, teses, dissertações e artigos acadêmicos), identificados através de pesquisa exploratória, referentes as áreas de modelagem hidrológica e climática e que abordem questões relacionadas com a oferta hídrica de mananciais de abastecimento, variabilidade do clima, risco de seca e gestão de risco. Além disso, serão utilizadas publicações de reconhecida notoriedade, como os livros publicados por Tucci (1993) e Tucci et al. (1998). Também serão utilizados os relatórios publicados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*, pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), publicações endossadas pela *World Meteorological Organization – WMO* e literaturas, avaliadas por pares ou cinzentas, que tratem das áreas de interesse, sobretudo o Plano de Recursos Hídricos do Paraíba do Sul e relatórios publicados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA.

O desenvolvimento da metodologia científica baseou-se nas contribuições de Lopes et al. (1982), Tucci et al. (1993), Tucci (1998), Lopes (1999), Marengo & Valverde (2007), Block et al. (2009), Kwon et al. (2011), O’Neill et al. (2013), Eyring et al. (2016), O’Neill et al. (2016), Silveira, Souza-Filho & Vasconcelos (2017), Silveira & Assis (2019), Benevides (2020), entre outros; tendo como alicerce central a metodologia apresentada na publicação de Silveira, Souza-Filho & Vasconcelos (2017) no que diz respeito às etapas de modelagem hidrológica e climática, que colaboram para a construção das etapas metodológicas deste trabalho de dissertação.

3.1 Segurança hídrica

Eventos climatológicos severos vêm causando impactos no desenvolvimento econômico social em diversas regiões do mundo e a água é o *nexus* para superação desses desafios: segurança alimentar, redução da pobreza, crescimento econômico, produção de energia e saúde (Oliveira-Silva & Souza-Filho, 2019). A visão da água como tema central tem produzido intensa discussão acerca da segurança hídrica e sobre como desenvolver respostas urgentes para o aumento da resiliência de sistemas hídricos em cenários de incertezas climáticas (Melo & Formiga-Johnsson, 2017; Oliveira-Silva & Souza-Filho, 2019; OCDE, 2022).

A seguir serão apresentadas definições centrais sobre segurança hídrica que vêm sendo aprimoradas ao longo dos últimos anos.

A *Global Water Partnership – GWP* (2000) considera que o termo “segurança hídrica” busca capturar o conceito complexo da gestão holística da água e o balanço entre proteção e uso deste recurso. Este conceito precisa ser considerado em diversos níveis, como o local, o regional e o nacional, buscando fomentar melhorias na saúde, educação, energia e segurança alimentar. Ainda neste contexto, o aumento da segurança hídrica é capaz de evitar ameaças relacionadas à poluição e colaborar com a redução da pobreza, aumento do bem-estar, da produtividade e do desenvolvimento sustentável. Dessa forma, a segurança hídrica pode ser vista como um objetivo global no qual será garantido o acesso universal à água potável, suficiente para uma vida sustentável, produtiva e saudável.

Swaminathan (2001); Grey & Sadoff (2007); Mason & Calow (2012) entendem que a segurança hídrica é ter água em quantidade e qualidade suficientes para as necessidades humanas e ecossistemas, garantidas as dimensões de gestão de riscos e de atendimento as demandas dos mais diversos setores usuários.

Já para a OCDE (2013), o termo “segurança hídrica” se refere à gestão de riscos associados a água. Dessa forma, faz-se necessário o controle das seguintes ameaças: (i) riscos de disponibilidade e armazenamento (e.g. secas); (ii) risco relacionado aos excessos (e.g. enchentes); (iii) riscos de qualidade inadequada para determinados tipos de uso (e.g. poluições hídricas); e (iv) riscos de enfraquecimento da resiliência de sistemas de água doce.

Não menos importante, a Organização das Nações Unidas – ONU definiu segurança hídrica como (ONU, 2013): “A capacidade de uma população se salvar de acesso sustentável a água, em quantidade e qualidade adequadas, para garantir meios de sobrevivência, o bem-estar humano e o desenvolvimento socioeconômico; para assegurar proteção contra a poluição e contra os desastres relacionados à água; e para a preservação de ecossistemas em um clima de paz e estabilidade política”.

Sayers et al. (2016) ao adaptar conceitos de Grey & Sadoff (2007) e UN WATER (2013) definiu que a segurança hídrica busca gerenciar adequadamente os riscos relacionados à água para as pessoas, economias e ecossistemas; de forma que mantenha a paz e a estabilidade política, o que inclui considerações acerca das questões ligadas a seca e escassez hídrica.

A *Sustainable Water Partnership – SWP* da *U.S. Agency for International Development – USAID* define segurança hídrica como a “capacidade adaptativa para salvar de acesso a disponibilidade sustentável, acesso e uso seguro da água em quantidade e qualidade adequa-

das, confiáveis e resilientes para a saúde, meios de subsistência, ecossistemas e economias produtivas (SWP, 2017).

A segurança hídrica também pode ser reconhecida como um dos principais desafios para o desenvolvimento humano, especialmente em face aos perigos impostos pelas mudanças no clima ou por falhas institucionais que podem desencadear conflitos (Lall et al., 2017).

Por essa razão, o *World Water Council* – WWC (2018), organização internacional multipartes interessada com a mobilização de ações críticas sobre a água, estabeleceu a segurança hídrica como sua principal prioridade estratégica para os anos de 2019 a 2021. Neste contexto, a organização entende que a “segurança hídrica” se refere a disponibilidade adequada de água para a sustentação do desenvolvimento e dos meios de subsistência, além da saúde e dos ecossistemas; seu aumento depende fortemente da implementação de infraestruturas adaptativas e sustentáveis.

Por fim, diante da convergência entre as definições expostas, entende-se que a segurança hídrica envolve o desenvolvimento e o uso sustentável dos recursos hídricos, a proteção dos sistemas hidráulicos contra os perigos relacionados à água (e.g. cheias e secas) e a salvaguarda do acesso às funções e serviços da água para a sociedade, meio ambiente e economias. Segundo Melo & Formiga-Johnsson (2017) qualquer solução propostas para atingir a segurança hídrica não deve perder de vista a busca pelo bem-estar humano, buscando os mesmos benefícios para a população mais vulnerável.

Com isso, tem-se que a segurança hídrica é indispensável para qualquer estratégia de redução da pobreza, desenvolvimento socioeconômico e saneamento ambiental. Esta condição de segurança só existe quando há disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficientes para o atendimento das necessidades humanas, das atividades econômicas e da conservação dos ecossistemas aquáticos, acompanhada de um nível aceitável de risco relacionado as secas e cheias, especialmente quando relacionados a alteração da variabilidade climática que vem sendo observada ao longo dos últimos anos (ANA, 2019; ANA, 2021)

De acordo com Benevides (2020) diversos fatores podem ameaçar a segurança hídrica, sendo eles: a migração urbano/rural, o aumento populacional, o crescimento econômico, que gera um aumento na demanda de água, as mudanças climáticas e os seus possíveis efeitos (e.g. secas, inundações). Estes fatores associados à ausência de planejamento, de investimentos e de ações institucionais podem desencadear graves cenários de insegurança hídrica.

Políticas públicas e investimentos adequados nesta área podem trazer diversos benefícios para a sociedade. A OCDE (2016) descreve que os investimentos em segurança hídrica devem combinar um conjunto de quatro ações, sendo elas:

- a) maximização do valor da água através da otimização de infraestruturas já existentes - otimização da operação, manutenção das infraestruturas, gestão da demanda e engajamento com *stakeholders*;
- b) seleção de investimentos que reduzam riscos relacionados à água pelo menor custo ao longo do tempo - relação custo-benefício;
- c) assegurar sinergias e complementaridades com investimentos de outros setores, como o setor alimentício, de saneamento e hidroenergia;
- d) promoção de maiores investimentos através da alocação de riscos.

O conceito de segurança hídrica da ONU (2013) considera 4 dimensões, sendo elas as dimensões econômica, humana, ecossistêmica e de resiliência. Este foi o conceito utilizado no Brasil para o desenvolvimento do Plano Nacional de Segurança Hídrica – PNSH (ANA, 2019) que trouxe um plano de investimentos baseado em 114 ações a serem desenvolvidas até o ano de 2035, que devem beneficiar pelo menos um terço da população que vive em áreas com risco eminente para o abastecimento humano (OCDE, 2021).

O programa de segurança hídrica brasileiro prevê um investimento de 27,6 bilhões de reais ao longo de seu período de implementação (cerca de 1,2 bilhões ao ano), contando com ações que visam a implementação de infraestruturas hídricas, medidas para gestão de riscos e o aperfeiçoamento da gestão de recursos hídricos, como o planejamento, o controle do uso da água, o monitoramento, a operação e manutenção de sistemas existentes, entre outras (ANA, 2019; OCDE, 2022).

De acordo com OCDE (2022) o aumento da resiliência hídrica no Brasil é uma necessidade urgente, dado que quase 100 milhões de pessoas não possuem acesso a condições seguras de saneamento e quase 200 milhões dependem fortemente da hidroenergia como fonte de eletricidade. Soma-se a isso o aumento na frequência e intensidade de eventos relacionados às mudanças climáticas no Brasil. Além disso, a crise econômica trazida pela pandemia de COVID-19 colocou pressão adicional sobre a capacidade do Brasil de implementar políticas para a redução de lacunas de infraestrutura nos setores de recursos hídricos e saneamento.

A segurança hídrica do Estado do Rio de Janeiro e, principalmente, de sua região metropolitana, está condicionada a oferta hídrica do rio Paraíba do Sul; em períodos de estiagem

há elevado risco no que se refere a garantia de abastecimento da população e de desenvolvimento das atividades econômicas. Formiga-Johnsson & Britto (2020) destacam que para que a metrópole do Rio de Janeiro esteja menos vulnerável a extremos climáticos é necessário maior eficiência na gestão da água captada e produzida para consumo humano.

Conforme o 2º Boletim de Monitoramento do PNSH, publicado em 20/07/2021, houve pouco avanço no Estado em relação as medidas que vêm sendo desenvolvidas para o aprimoramento do planejamento e da gestão das infraestruturas hídricas (ANA, 2021). Dentre as ações propostas estão a ampliação dos Sistemas Adutores Imunana-Laranjal e Prolagos, o desvio dos rios Poços, Queimados e Ipiranga (visando melhoria da qualidade da água na captação do Sistema Guandu), a elaboração dos projetos da Barragem do Guapiaçu e da nova ETA do Sistema Produtor Guandu.

3.2 Mudanças climáticas

O IPCC (2014; 2021) define que as mudanças climáticas são alterações de longo prazo no padrão do clima que podem ser identificadas através de mudanças na média ou na variabilidade de suas propriedades. Estas mudanças podem decorrer de forma natural, de ação antropogênica ou da combinação de ambos os fatores (Rolim & Souza-Filho, 2019; Benevides, 2020).

O clima global sofre alterações ao longo das eras; no entanto, este caminho natural vem sendo intensificado com o aumento de atividades humanas que emitem altas concentrações de gases do efeito estufa (Marengo, 2006; IPCC; 2021). Por essa razão, um aquecimento maior do que a média global vem sendo experimentado em diversas regiões do planeta (IPCC, 2021).

A *World Meteorological Organization* - WMO vem observando que devido ao aumento na emissão de gases do efeito estufa, desde o ano de 1980, cada década que passou foi sucessivamente mais quente que as anteriores, atribuindo à última década (2010-2019) o título de “a década mais quente já registrada”. Na mesma linha, WRI BRASIL (2019) e WMO (2020) afirmam que os últimos cinco anos foram os mais quentes já registrados, sendo que a temperatura média global no ano de 2019 foi de $1,1 \pm 0,1^\circ\text{C}$ acima do registrado no período pré-industrial, o que fez desse ano o segundo mais quente já registrado na história (WMO, 2020).

Como efeito, o aumento da temperatura vem sendo acompanhado pela intensificação de eventos extremos como secas e inundações; causando drásticas mudanças no ciclo hidrológico, alterando padrões de precipitação e evapotranspiração, alterando a vazão dos rios e, conseqüentemente, a vazão regularizada de reservatórios, tornando inválido o pressuposto da estacionariedade². Essas alterações exercem grande pressão sobre os sistemas hídricos, principalmente quando aliado ao aumento da população e da demanda pela água (Fernandes et al., 2017; Fernandes et al, 2019; Rolim, Souza-Filho & Rocha, 2019, IPCC, 2021).

Nota-se que as mudanças climáticas impõem grande ameaça ao desenvolvimento sustentável, afetando direta e indiretamente diversos setores da sociedade como saúde, econômicas, alimentação, geração de energia, recursos hídricos, infraestrutura, biodiversidade etc. IPCC (2014; 2021). Por essa razão, as preocupações ambientais foram, pela primeira vez na história, as que ocuparam maior espaço entre os principais riscos de longo prazo na Pesquisa de Percepção de Riscos Globais, realizada pelo *World Economic Forum* – WEF no ano de 2020. Segundo a pesquisa, o risco de “falha na mitigação e adaptação às mudanças climáticas” é o primeiro da lista na dimensão impacto e o segundo na dimensão probabilidade nos próximos 10 anos (WEF, 2020). São também citados, como riscos globais, o clima extremo – ranqueado como o risco número um na dimensão de probabilidade –, os desastres naturais e as crises hídricas, sendo que esta última ocupa o quinto lugar entre os maiores riscos em termos de impacto potencial.

3.2.1 Impactos das Estiagens

Segundo a UN WATER (2020), a variabilidade climática e os eventos extremos já afetam severamente as Américas Central e do Sul, notadamente no que concerne às variações da disponibilidade hídrica superficial. Para diversos países nessa região, as mudanças climáticas ocorrem em um cenário de competição pela água entre os múltiplos usos, incluindo competição entre áreas urbanas, setores de energia, agricultura e necessidades do ecossistema.

A rápida urbanização, o desenvolvimento econômico e a desigualdade estão entre os principais fatores socioeconômicos de pressão sobre os sistemas hídricos com os quais os im-

² Uma série temporal estacionária é aquela cujas propriedades estatísticas, como média, variância, autocorrelação etc. são constantes ao longo do tempo (UN WATER, 2020).

pactos climáticos se sobrepõem, visto que as mudanças no regime de precipitação e na temperatura afetam diretamente o balanço hídrico terrestre (ANA, 2019; UN WATER, 2020).

Segundo o IPCC (2014a), a hidroenergia, principal fonte renovável de energia disponível nas Américas Central e do Sul, está sujeita aos graves efeitos das mudanças climáticas e da consequente alteração nos regimes de vazões.

No Brasil, cerca de 43 milhões de pessoas (90% na Região Nordeste) foram afetadas por secas e estiagens no ano de 2018, cerca de 5 milhões de pessoas a mais que o registrado para o mesmo período no ano de 2017 (ANA, 2019).

No Sudeste, a seca relacionada à crise entre 2014 e 2016 impactou toda a região, notadamente o Sistema Cantareira, responsável pelo abastecimento de quase metade da Região Metropolitana de São Paulo - RMSP, a maior aglomeração populacional do Brasil; foi também bastante afetada a Bacia do rio Paraíba do Sul, que abastece a Metrôpole do Rio de Janeiro e, a partir de 2018, passou a reforçar o abastecimento de São Paulo por meio do Sistema Cantareira, ambas metrópoles situadas fora dos seus limites territoriais (ANA, 2019; SABESP, 2020; Vasconcelos, Formiga-Johnsson, Ribeiro, 2019).

3.2.2 IPCC-AR6

Recente relatório publicado pelo IPCC *Working Group I Sixth Assessment Report – AR6-WGI* (IPCC, 2021), chamado pela copresidente do grupo Valérie Masson-Delmotte como uma “constatação da realidade”³, demonstra que as emissões de gases do efeito estufa pelas atividades humanas foram responsáveis pelo aquecimento de 1,1°C na temperatura média global desde 1850-1990 e que se espera um aquecimento médio de mais 1,5°C em todas as regiões do planeta ao longo dos próximos anos.

Além do aumento na temperatura, as mudanças climáticas globais podem intensificar o ciclo da água (intensas secas e enchentes), provocar alterações no padrão das chuvas (aumento em altas latitudes e redução em grande parte das regiões subtropicais), aumento no nível do mar e aquecimento, acidificação e redução dos níveis de oxigênio nos oceanos (IPCC, 2021).

³ Do inglês: “This report is a reality check,”, IPCC Working Group I CoChair Valérie Masson-Delmotte.

Pela primeira vez o relatório trouxe maior detalhamento regional sobre as mudanças do clima; com maior foco em informações úteis para avaliação de risco e adaptação. De acordo com o AR6-WGI (IPCC, 2021) as temperaturas médias provavelmente aumentarão ao longo do século XXI (com alto nível de confiança) em todas as sub-regiões⁴ definidas para as Américas Central e do Sul e continuarão subindo em taxas maiores que a média mundial. Prevê-se que a precipitação média passe por alterações, com aumento no Noroeste e no Sudeste da América do Sul (com alto nível de confiança) e diminuição no Nordeste e Sudoeste (com médio nível de confiança).

A Figura 2 demonstra as mudanças projetadas para a temperatura média anual, precipitação total anual, precipitação máxima em 5 dias consecutivos e dias secos consecutivos considerando um aumento na temperatura média global em 1,5°C, 2°C e 4°C em relação ao período histórico de 1850-1900 (período pré-industrial). Os resultados apresentados na figura pelo IPCC (2021) são baseados no conjunto multi-modelo do CMIP6 (32 modelos climáticos globais) usando o cenário SSP5-8,5, que considera cenário com mais alta emissão de gases do efeito estufa.

Ainda de acordo com o AR6-WGI (IPCC, 2021) a urbanização de grandes centros urbanos exacerbará os efeitos do aquecimento global nas cidades, dado que este tipo de uso do solo altera o ciclo hidrológico, aumenta os índices de escoamento, induz os fenômenos das ilhas de calor e de seca e reduz a velocidade dos ventos.

3.2.2.1 CMIP6

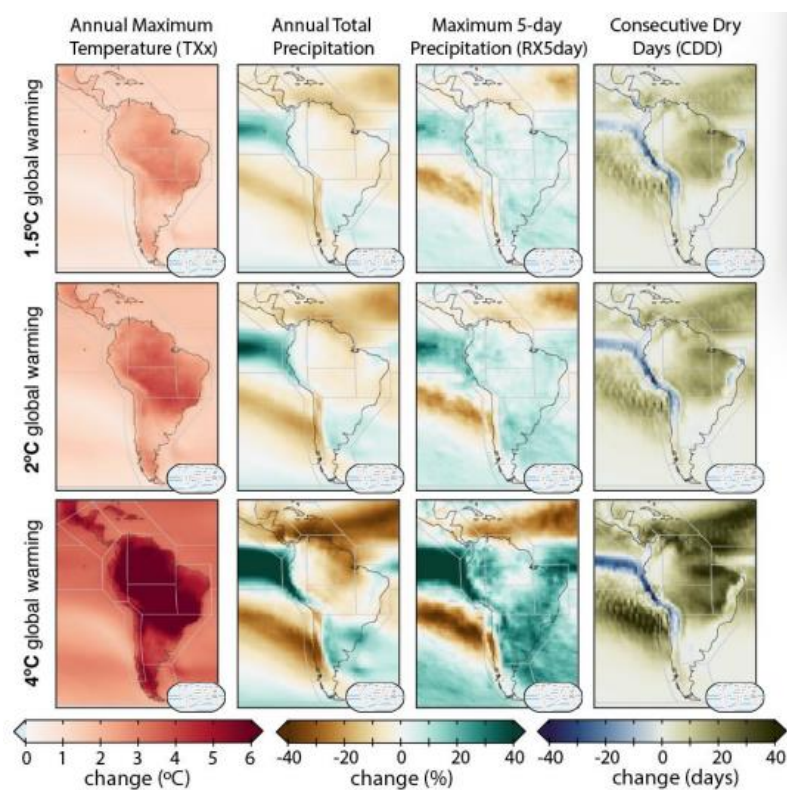
O *Coupled Model Intercomparison Project* – CMIP, organizado sob a supervisão do *World Climate Research Programme* – WCRP, teve início há mais de 20 anos como uma ferramenta comparativa entre modelos climáticos globais realizando experimentos com modelos atmosféricos acoplados a um oceano dinâmico, uma superfície terrestre simples e gelo marinho termodinâmico (Meehl et al., 1997).

⁴ América Central do Sul, Norte da América do Sul, Noroeste da América do Sul, Nordeste da América do Sul, Sudoeste da América do Sul, Sudeste da América do Sul, Sul da América do Sul e Monções da América do Sul. Do inglês: *Southern Central America (SCA)*, *Northern South America (NSA)*, *Northwestern South America (NWS)*, *Northeastern South America (NES)*, *Southwestern South America (SWS)*, *Southeastern South America (SES)*, *Southern South America (SSA)* e *South American Monsoon (SAM)*.

Desde sua criação, o CMIP vem evoluindo ao longo de cinco fases, contribuindo com as mais importantes pesquisas de ciências climáticas como elemento central de avaliações nacionais e internacionais, como os relatórios do IPCC, por exemplo (Eyring et al., 2016). A ferramenta é capaz de disponibilizar publicamente, através da *Earth System Grid Federation - ESGF*, uma saída padronizada multi-modelo, possibilitando ampla análise da comunidade científica e dos demais usuários.

O objetivo principal do CMIP é melhor entender o passado para compreender as mudanças climáticas presentes e futuras decorrentes da variabilidade natural ou em resposta as mudanças nas forçantes radiativas⁵ (Eyring et al., 2016).

Figura 2 – Alterações climáticas projetadas para as Américas Central e do Sul



Fonte: IPCC, 2021.

Fases passadas do CMIP haviam adotado plataformas mais centralizadas e compactas e que já não mais correspondiam ao nível de complexidade requerida pela comunidade científica, que passava a demandar um grande volume e diversidade de saídas através dos mais di-

⁵ A forçante radiativa é uma variável medida em W/m^2 que quantifica as mudanças no fluxo de energia terrestre causadas pelos agentes promotores da mudança climática, como ocupação do solo, emissão de gases do efeito estufa e alterações na radiação solar (IPCC, 2021).

versos modelos climáticos. Na sexta fase do projeto (CMIP6) e para fases subsequentes, adotou-se uma estrutura mais integrada, capaz de gerar continuidade e de responder a um conjunto de perguntas científicas levantadas junto à comunidade e aos centros de modelagem que fazem uso da plataforma (Eyring et al., 2016).

O CMIP6 traz em sua infraestrutura um total de 21 MIPs ou *Model Intercomparison Projects*⁶ sugeridos pela comunidade científica. Destes, 4 são de natureza diagnóstica e 17 de natureza prognóstica, o que permitiu a geração de mais de 40.000 mil anos de dados simulados em cerca de 190 tipos de experimentos (Eyring et al., 2016). Além destes, o CMIP6 também traz em si um conjunto de simulações de dados históricos (1850-2014) que servem como uma importante referência para avaliação do desempenho dos demais modelos.

3.2.2.2 ScenarioMIP

O *Scenario Model Intercomparison Project* - ScenarioMIP é uma das principais atividades do CMIP6, sendo um dos 21 MIPs sugeridos pela comunidade científica. De acordo com Eyring et al. (2016), o ScenarioMIP visa:

- a) facilitar a pesquisa integrada sobre o impacto de cenários futuros plausíveis sobre os sistemas físicos e humanos e sobre as opções de mitigação e adaptação;
- b) abordar estudos direcionados sobre os efeitos de determinadas forçantes climatológicas em colaboração com outros MIPs;
- c) colaborar na quantificação de incertezas baseadas em conjuntos multi-modelo.

O'Neill et al. (2016) descreve que o ScenarioMIP é capaz de fornecer projeções climáticas baseadas em cenários que refletem diretamente as preocupações da sociedade em relação à mitigação, adaptação e aos impactos das mudanças climáticas. Dessa forma, a nova versão do CMIP traz como diferencial a orientação dos modelos através dos cenários baseados em *Shared Socioeconomic Pathways* - SSP (Eyring et al., 2016).

⁶ Tradução livre: projeto de comparação de modelos.

De forma resumida, O'Neill et al. (2016) diz que os SSP são cenários que descrevem evoluções alternativas para o futuro da sociedade na ausência ou presença de mudança no clima ou na ausência ou presença de política climática bem definida.

Os SSP 1 e 5 possuem uma visão relativamente otimista para a tendência do desenvolvimento humano, com investimento substancial em educação e saúde, rápido crescimento econômico e instituições bem estruturadas. Entretanto, o SSP 5 assume uma economia baseada no uso de combustíveis fósseis, enquanto o SSP 1 assume que haverá uma tendência para o uso de práticas renováveis.

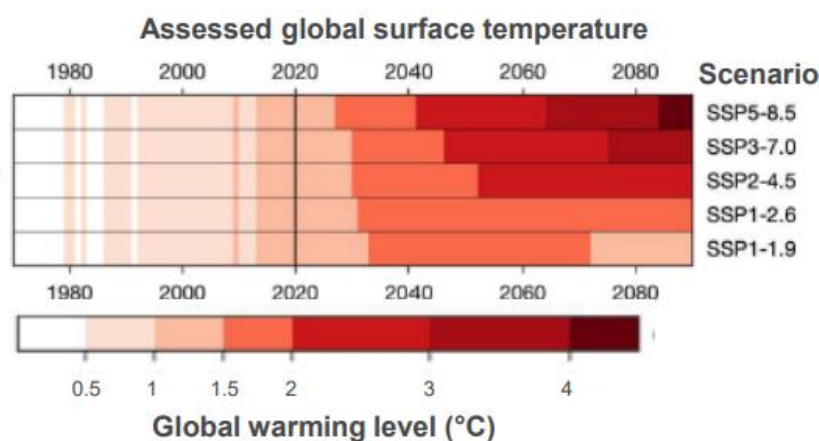
Já os SSP 3 e 4 possuem uma visão mais pessimista para o desenvolvimento da sociedade, com baixos investimentos em educação e saúde, rápido crescimento populacional e aumento das desigualdades, sendo que no SSP 3 os países priorizam a segurança regional, enquanto no SSP 4 há grande desigualdade interna e entre países.

Por fim, o SSP 2 possui uma visão central, onde as tendências atuais são perpetuadas sem uma variação considerável (tradução livre de O'Neill et al., 2016).

A Figura 3 apresenta a temperatura da superfície global avaliada considerando cada um dos SSP descritos acima.

Os SSP são utilizados em conjunto com uma forçante radiativa característica (O'Neill et al., 2016). A Tabela 1 abaixo demonstra em maiores detalhes as características dos cenários utilizados no ScenárioMIP.

Figura 3 – Temperatura global avaliada conforme SSP (1980-2080)



Fonte: IPCC, 2021.

Tabela 1 – Caracterização dos cenários no ScenarioMIP

| NOME | CATEGORIA DA FORÇANTE | FORÇANTE (W/M ²) | SSP | TAMBÉM USADO PELOS MIP |
|---|-----------------------|------------------------------|----------|--|
| CAMADA 1 | | | | |
| SSP5-8,5 | Alta | 8,5 | 5 | C4MIP, GeoMIP, ISMIP6, RFMIP |
| SSP3-7,0 | Alta | 7,0 | 3 | AerChemMIP, LUMIP |
| SSP2-4,5 | Média | 4,5 | 2 | VIACS AB, CORDEX, GeoMIP, DAMIP, DCPD |
| SSP1-2,6 | Baixa | 2,6 | 1 | LUMIP |
| CAMADA 2 – CENÁRIOS ADICIONAIS DO SÉCULO XXI | | | | |
| SSP4-6,0 | Média | 6,0 | 4 | GeoMIP |
| SSP4-3,4 | Baixa | 3,4 | 4 | - |
| SSP5-3,4-OS | Superação | 3,4 | 5 | - |
| SSPa-b | Baixa | 2,0 | 1 | - |

Fonte: adaptado de O'Neill et al., 2016.

3.3 Conceitos de seca

De forma geral, a seca é uma condição de insuficiência da umidade causada por um déficit de precipitação que perdura algum período de tempo em determinada área (Beran & Rodier, 1985). É um evento gradual que ocorre em locais com altas ou baixas taxas de precipitação e está relacionada às condições naturais, porém temporárias, de equilíbrio entre chuva e evapotranspiração (McMahon & Diaz, 1982; Wilhite & Glantz, 1985; McKee et al., 1993; Tsakiris et al., 2013).

A seca pode decorrer de variações ou alterações no clima de ordem regional ou mesmo global, sendo difícil identificar seu início, fim e abrangência (Wilhite & Glantz, 1985; Tsakiris, 2017). Sua severidade também é de difícil determinação, pois essa característica não só depende da duração, intensidade e extensão geográfica, como também das exigências da natureza e das necessidades humanas (Wilhite & Glantz, 1985). Ou seja, as características da seca em conjunto com aspectos socioeconômicos e ambientais, além de aspectos relacionados a vulnerabilidade às secas, dificultam a identificação de seus impactos sobre os recursos hídricos e, conseqüentemente, sobre seus diversos setores usuários (McKee et al., 1993; Souza Filho et al., 2014).

Secas subsequentes na mesma região provavelmente não terão os mesmos efeitos, mesmo que idênticas em intensidade, duração e características espaciais. No entanto, comum a todos os tipos de seca, é o fato de que elas se originam de uma deficiência de precipitação que resulta em escassez de água para alguma atividade, como o abastecimento público, a agri-

cultura, o setor industrial, o setor energético e até mesmo a saúde da população (Wilhite & Glantz, 1985; Freire-González et al., 2017).

Estudos mostram que os eventos hidrológicos críticos como a seca poderão se tornar cada vez mais intensos e frequentes em diversas partes do mundo em decorrência de mudanças no clima (Padrón et al., 2020; Takeshima et al., 2020; ANA, 2021; IPCC, 2021). Apesar disso, o risco de seca ainda não recebe a devida atenção e geralmente não é tratado adequadamente nas estratégias de gestão da água (UNDP, 2011; Sayers et al., 2016).

Dadas as particularidades mencionadas, torna-se um desafio estabelecer uma definição universal de seca. De acordo com Wilhite & Glantz (1985) as definições de seca podem ser categorizadas como conceituais ou operacionais. As definições conceituais fornecem pouca orientação para avaliação física das secas, já as definições operacionais buscam a identificação do início, gravidade e término de cada evento. Esta última também pode ser usada para analisar a frequência, gravidade e duração da seca para um determinado período histórico, exigindo a realização de monitoramento das variáveis associadas para posterior cálculo da probabilidade de ocorrência de secas características.

As secas devem ser definidas ainda de acordo com as características de cada regime climático e com os impactos específicos que causam em cada setor no qual a definição está sendo utilizada (Wilhite & Glantz, 1985; Tate & Gustard, 2000; Wilhite et al., 2007). Com isso, as secas podem ser classificadas em quatro categorias, conforme descrito no Tabela 2, abaixo.

Tabela 2 – Classificação das secas

| CLASSIFICAÇÃO DE SECA | PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS |
|---------------------------|--|
| Seca meteorológica | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Define seca tendo como base apenas o grau de secura e duração do período seco – período de tempo contínuo sem chuva; ▪ Déficit de água abaixo de um determinado valor de referência, levando em consideração duração e magnitude do déficit; ▪ Definições numéricas construídas a partir dessa classificação de seca geralmente causam problemas quando aplicadas em outras regiões, pois as condições meteorológicas que resultam em seca são altamente variáveis em todo o mundo; ▪ Para superar essa limitação, passa-se a comparar o grau de secura a alguma média de longo prazo, muitas vezes referida como “normal”; ▪ Dessa forma, literaturas se referiram à seca como um “período de precipitação mensal ou anual inferior a alguns determinada porcentagem do normal; ▪ Esta definição leva a criação de índices que buscam explicar a duração e a intensidade dos eventos de seca; e ▪ As secas meteorológicas não necessariamente coincidem com períodos de seca agrícola, hidrológica ou socioeconômica. |
| Seca agrícola | <ul style="list-style-type: none"> ▪ As definições de seca agrícola ligam várias características da seca meteorológica aos impactos agrícolas, com foco, por exemplo, na escassez de precipitação em relação às normais; ou numerosos fatores meteoro- |

| CLASSIFICAÇÃO DE SECA | PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS |
|----------------------------|--|
| Seca hidrológica | <ul style="list-style-type: none"> lógicos como a evapotranspiração; ▪ Uma definição operacional de seca agrícola deve levar em conta a suscetibilidade características de cada cultura em diferentes estágios de cultivo e desenvolvimento; e ▪ Algumas literaturas representam a intensidade da seca como a diferença entre a demanda de água da planta e a água disponível no solo. ▪ As definições de seca hidrológica estão correlacionadas aos efeitos de períodos de estiagem e calor intenso na hidrologia de superfície ou subsuperfície e não necessariamente com a explicação meteorológica do evento; ▪ Pode ser classificada como o período durante o qual as vazões são inadequadas para suprir os usos estabelecidos sob um determinado sistema de gestão da água; ▪ A frequência e gravidade da seca hidrológica é muitas vezes definida tendo como base a sua influência sobre bacias hidrográficas; e ▪ As secas hidrológicas são muitas vezes dessincronizadas das secas meteorológicas e agrícolas. |
| Seca Socioeconômica | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Busca expressar efeitos socioeconômicos da seca em conjunto com características da seca meteorológica, agrícola e hidrológica; ▪ Geralmente as secas socioeconômicas estão associadas com a oferta e a demanda de água para determinada economia; ▪ Algumas literaturas descrevem que os processos espaciais de oferta e demanda por água são os dois processos básicos para a compreensão objetiva deste tipo de seca; ▪ Em alguns casos, as práticas de uso da terra também podem ser incorporadas na análise deste evento; ▪ Podemos nos referir a seca socioeconômica como “[...] quando a precipitação não é suficiente para atender às necessidades das atividades humanas estabelecidas, [...] podendo ser ocasionada pelo desenvolvimento econômico de uma região e pelo aumento na demanda por água”. |

Fonte: Wilhite & Glantz, 1985.

A pluralidade de definições de seca é um dos principais obstáculos para a investigação destes eventos, dada a dificuldade em compreender quantitativamente o impacto que podem trazer dependendo de sua definição (Sayers et al., 2017; Satoh et al., 2021). Essa dificuldade pode levar muitas vezes à falta de compreensão das implicações sociais e ambientais da seca ou até mesmo à inação (Wilhite & Glantz, 1985; Wilhite et al., 2007).

De acordo com Lloyd-Hughes (2013) uma descrição universal de seca é quase impraticável, dado que requer referências ao balanço hídrico local, através de análises da disponibilidade hídrica, da demanda e, principalmente, da influência de intervenções humanas através de ações de gerenciamento dos recursos hídricos.

A influência da intervenção humana através da gestão da água mostra-se intrínseca à definição de seca no sentido universal, já que essa só pode ser eliminada no caso de secas puramente meteorológicas. O estado de seca se baseia na existência de normais climatológicas que, em geral, são difíceis de obter ou até mesmo são inexistentes no contexto não-estacionário das mudanças climáticas. Tais considerações climatológicas, em conjunto com a dificuldade de quantificar a influência humana, levam à conclusão de que não podemos razoavelmente esperar a existência de

qualquer definição objetiva generalizada funcional de seca (tradução livre de Lloyd-Hughes, 2013, p. 1).

Em contraponto as usuais definições de seca, mais próximo das definições de seca socioeconômicas, AghaKouchak et al. (2021) propõe que em sistemas acoplados homem-água, a seca deve ser compreendida com um processo dinâmico e complexo que envolve a inter-relação das mudanças naturais e das induzidas pelo homem; devendo ser chamada, portanto, de seca antropogênica.

A seca antropogênica deve ser tratada como um fenômeno multidimensional e multi-escala, governado pela combinação de variabilidade natural da água, mudanças climáticas, decisões e atividades humanas e condições microclimáticas alteradas devido as mudanças na gestão da terra e da água (AghaKouchak et al., 2021).

Dada a discussão sobre a diversidade de definições adotadas para a seca, neste trabalho serão adotadas as definições propostas por Fernandes et al. (2009), sendo:

- a) seca meteorológica: expressa o grau de secura e de duração do período seco a serem comparados a algum estado “normal”. É caracterizada pelo déficit de precipitação em relação ao valor normal;
- b) seca hidrológica: relacionada com a redução dos níveis médios de água em reservatórios superficiais e subterrâneos por um determinado período de tempo, afetando o abastecimento de água.

3.4 Gestão do risco de seca

De forma geral, eventos de seca são tratados como processos episódicos, que provocam respostas reativas dos tomadores de decisão e da sociedade apenas após constatados os seus impactos (Sayers et al., 2016; Araújo et al., 2019).

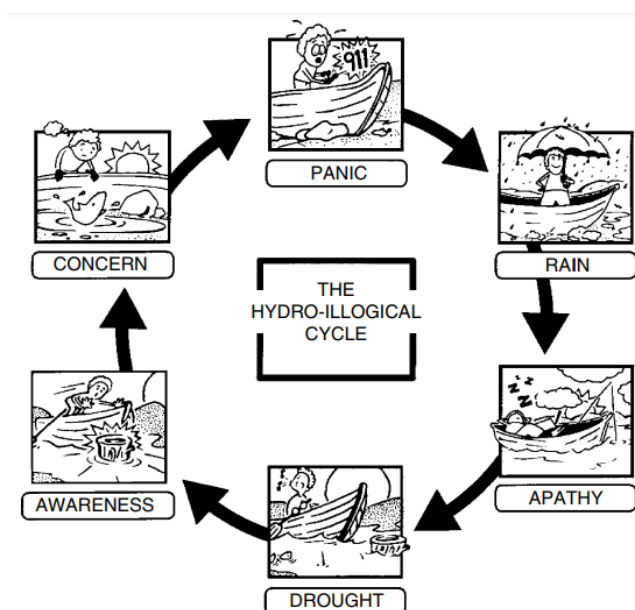
Dada a histórica ineficácia da abordagem reativa de gestão das secas, Wilhite et al. (2005) ilustrou o ciclo “hidro-ilógico” que pode ser observado na Figura 4.

Segundo Wilhite et al. (2005) a apatia, ou indiferença, é o primeiro comportamento observado neste ciclo, onde há água suficiente para atendimento das necessidades humanas; com a ocorrência de um evento de seca – que por vezes pode passar despercebida – e seu ocasional prolongamento, vem o comportamento de preocupação, ou ansiedade, onde são iniciadas ações relativas à restrição de uso da água; por fim, com o agravamento da seca vem o pâ-

nico. No entanto, com o fim do período seco, nem a população nem os tomadores de decisão veem a necessidade de se preparar para eventos futuros, o que leva ao início de outro ciclo.

Para evitar este ciclo e tensões relativas à água, faz-se necessária a aplicação de ferramentas de planejamento e gestão de risco que possam contribuir com a antecipação de soluções a serem empregadas na ocasião destes eventos ou para até mesmo evitá-los.

Figura 4 – Ciclo “hidro-ilógico” ilustrado



Fonte: Wilhite *et al.*, 2005.

Na hidrologia, o risco corresponde à probabilidade ou possibilidade de ocorrência de determinados eventos, fatos ou resultados indesejáveis (Vieira, 2005). Já o risco relacionado a seca incorpora noções de probabilidade e incerteza, que resulta principalmente da exposição de determinada localidade; ou seja, da probabilidade de ocorrência do evento, de sua severidade e da vulnerabilidade local (Giddens, 2000; Wilhite & Buchanan, 2005). Dadas estas características fica claro que o planejamento e a gestão do risco de seca são fundamentais para a adequada promoção da segurança hídrica, principalmente em sistemas localizados em bacias tropicais, onde o risco de seca ainda não é completamente compreendido e incorporado nas estratégias de gestão de recursos hídricos (Wilhite *et al.*, 2000; Nauditt *et al.*, 2017; Souza-Filho *et al.*, 2019).

Além disso, a ausência de uma estratégia de gestão de risco robusta, quando associada a alguma externalidade climática, pode reduzir a resiliência de um sistema, aumentar sua vul-

nerabilidade às mudanças do clima e fragilizar o desenvolvimento econômico e social ao longo de todo um período (IPCC, 2014; Araújo et al., 2019; Marcos-Júnior & Silveira, 2019).

A resiliência é a capacidade de manutenção intrínseca de um sistema, principalmente em situações de pressão externa. As principais características de um sistema resiliente podem ser enumeradas da seguinte forma: (i) persistência: capacidade de manter sua integridade e persistir a perturbações sem alterar suas funções ou estrutura; (ii) adaptabilidade: processo de mudança estrutural em um sistema, buscando se adaptar aos estresses ou perturbações; e (iii) transformabilidade: capacidade de se remodelar após crises (Holling, 1996; Walker et al., 2004; Rockström et al., 2014).

Buscando uma maior resiliência dos sistemas hídricos, a gestão de risco de seca deve possuir a abordagem proativa como principal característica, de modo que seja possível o planejamento de ações de curto, médio e longo prazo para garantia do equilíbrio futuro entre disponibilidade e demanda sobre os recursos hídricos (Wilhite et al., 2000; González & Morcillo, 2007; Marcelino, 2008).

As ações planejadas devem contar com alternativas para garantia de acesso a água, incluindo regras para operação do sistema, mecanismos de alocação de uso inter e intrasetores usuários, redundâncias, esforços para melhoria da comunicação e do tempo de resposta, melhoria no processo de monitoramento e aperfeiçoamento da legislação vigente, contemplando ainda a prospecção de cenários futuros que possibilitem a preparação aos riscos (Wilhite et al., 2000; González & Morcillo, 2007; Marcelino, 2008; Sayers et al., 2016; Silva & Souza-Filho, 2019).

De acordo com a ISO 31.000:2018 (ABNT, 2018), são cinco os componentes do processo iterativo de gestão de risco, sendo:

- a) comunicação e consulta: busca promover a conscientização sobre o risco e sobre as medidas requeridas para mitigação, ao mesmo tempo que busca informações suficientes para a tomada de decisão e supervisão dos riscos;
- b) avaliação de risco: busca identificar, analisar e avaliar riscos, considerando ainda suas possíveis causas e consequências. Nesta etapa é definida a magnitude do risco, tendo como base sua probabilidade de ocorrência e sua severidade, o que leva a identificação de ações prioritárias;
- c) tratamento de riscos: busca formular, selecionar, planejar e implementar ações alternativas para a mitigação dos riscos, além de avaliar a eficácia das

ações tomadas no passado; caso o risco remanescente não seja aceitável deve ser retomado o processo de tratamento;

- d) monitoramento e análise crítica: visa assegurar a qualidade da concepção, implementação e dos resultados de todo o processo de gestão de risco; e
- e) registro e relato: visa comunicar os resultados da gestão de risco, fornecer experiências e promover a melhoria contínua.

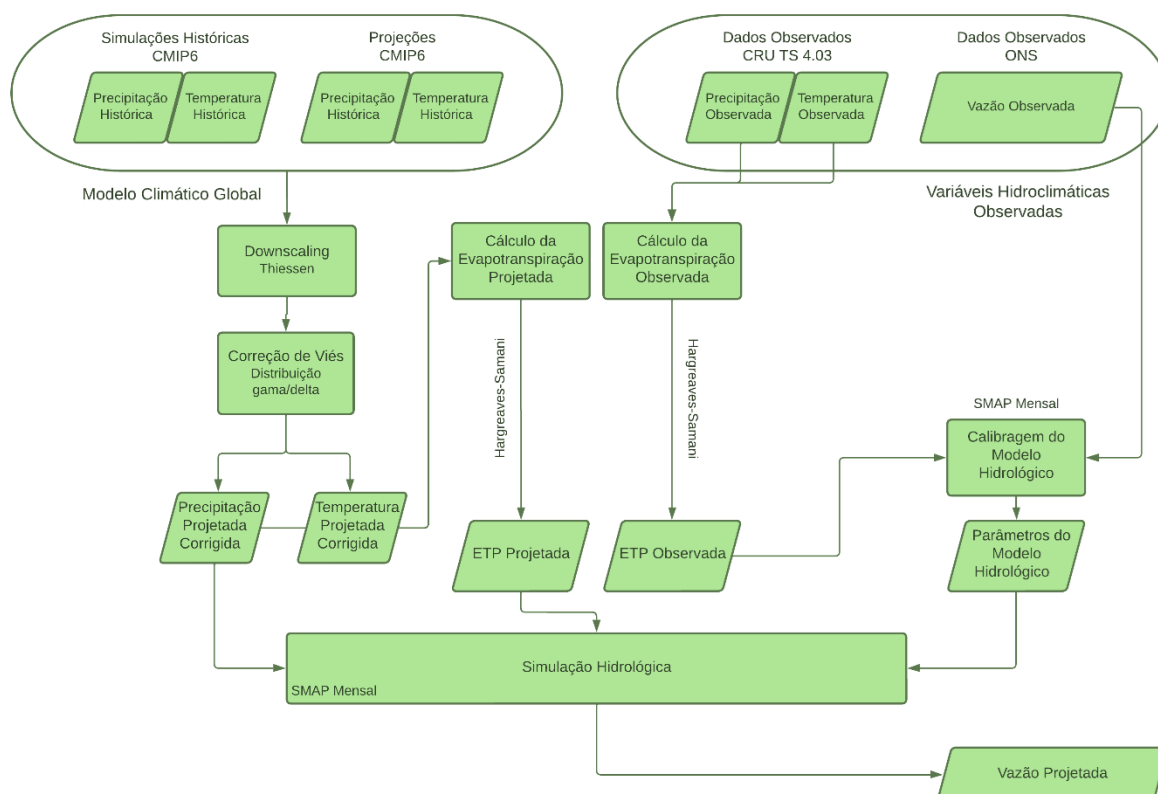
De forma complementar, Araújo et al. (2019) define diretrizes para o aprimoramento da gestão do risco de seca, indicando que a construção de um plano de contingência deve abordar a caracterização das particularidades do sistema hídrico e proposições de enfrentamento às pressões causadas por eventos climáticos de seca. Ainda em linha com o processo definido pela ISO 31.000/2018, Sayers et al., (2016) defende que o planejamento da gestão do risco de seca deve contar com etapas de preparação, resposta, recuperação e transformação:

- a) preparar: implementação de ações estratégicas de longo prazo para mitigação de secas futuras;
- b) responder e recuperar: revisão das medidas táticas implementadas, desde ações de alerta até o pós-evento;
- c) transformar: aprimorar a capacidade adaptativa e incorporar o risco de seca em todas as políticas e ações relacionadas à água.

4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O racional adotado para os procedimentos metodológicos bem como suas etapas estão representados na Figura 5 e serão devidamente detalhados ao longo deste capítulo.

Figura 5 – Racional adotado para aplicação do modelo



Fonte: O autor, 2022.

4.1 Definição dos cenários

Conforme anteriormente mencionado, o ScenarioMIP visa o fornecimento de projeções climáticas multi-modelo baseadas em cenários que levam em consideração os avanços da sociedade e das preocupações relacionadas à adaptação climática.

Dentre os cenários existentes, este trabalho considera as projeções realizadas para os cenários de forçantes radiativas SSP2-4,5 e SSP5-8,5. Estas projeções assumem um aumento na forçante radiativa relativa ao período pré-industrial de, respectivamente, 4,5 e 8,5 W/m² até o fim do século.

A escolha destes cenários baseou-se na intenção de representar caminhos intermediários, com forçantes radiativas de média categoria, e de caminhos menos sustentáveis, com forçantes de alta categoria. O SSP2-4,5 associa uma sociedade submetida à uma vulnerabilidade intermediária com um nível médio de forçante radiativa, representando ainda condições não extremas de uso da terra e de aerossóis quando comparado aos demais SSP's. Já o SSP5-8,5 representa o cenário com mais alta emissão de gases do efeito estufa dentre a gama de cenários, produzindo uma forçante radiativa de 8,5 W/m² até o fim do século XXI (tradução livre de O'Neill et al., 2016).

Além disso, o CMIP também conta com a simulação de dados históricos que abrangem o período de 1850 a 2015 – *CMIP6 historical* –, o que permite realizar análises de correlação entre as simulações e os dados observados, levando à quantificação e ao entendimento de importantes características das mudanças no clima (tradução livre de Eyring et al., 2016).

4.2 Obtenção de dados

A aplicação do racional proposto requer a obtenção dos seguintes dados:

- a) séries históricas de dados pluviométricos observados;
- b) séries históricas de temperatura (média, máxima e mínima) observadas;
- c) dados pluviométricos das simulações históricas e projetadas dos MCGs;
- d) dados de temperatura (média, máxima e mínimas) das simulações históricas e projetadas dos MCGs;
- e) séries históricas de dados fluviométricos observados.

Em relação às bases das séries históricas pluviométricas e de temperatura observadas serão utilizados os dados provenientes da *University of East Anglia* (UEA), cujo projeto é chamado de *Climate Research Unit gridded Time Series* (CRU TS). Essa base é composta por dados mensais de temperatura média (tas), temperatura máxima (tasmáx), temperatura mínima (tasmín), precipitação (pr), entre outras, em uma grade com alta resolução espacial, de 0,5° de latitude por 0,5° de longitude, que cobre todos os domínios terrestres do planeta, com exceção da Antártica (Harris et al., 2020).

A versão utilizada neste trabalho será a CRU TS 4.03, que apresenta dados para o período histórico de 1901 a 2018 (Harris et al., 2020). Os dados são obtidos através de observa-

ções realizadas em estações terrestres de monitoramento provenientes de diversas fontes, conforme citado por Harris et al. (2020, p. 2), e interpolados após rigorosos procedimentos de controle de qualidade.

Os dados mensais de precipitação e temperaturas média, máxima e mínima das projeções climáticas serão obtidas através das simulações realizadas no âmbito do CMIP6 para o período de 2015 a 2100. Estas simulações são realizadas por centros de pesquisa em todo o globo a partir de diversos modelos climáticos, cuja saída de dados acontece de forma padronizada, objetivando a disponibilização de informações para análise da comunidade científica e dos demais usuários (Silveira, Souza-Filho & Vasconcelos, 2017; Benevides, 2020).

Os modelos climáticos foram selecionados tendo como base os cenários de forçantes radiativas SSP2-4,5 e SSP5-8,5 definidos. Com isso, no total, foram identificados 36 modelos que possuem dados climáticos simulados para os cenários requeridos. No entanto apenas 14 estavam completos, ou seja, possuíam as variáveis necessárias para a aplicação da metodologia.

Os MCGs utilizados neste trabalho, bem como as respectivas variáveis disponíveis, são apresentados na Tabela 3, abaixo.

Por fim, os dados das séries históricas fluviométricas foram obtidos junto ao Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS para o período de 1930 a 2021. Os dados utilizados são referentes às vazões naturais afluentes para cada uma das bacias de interesse.

Tabela 3 – Modelos de circulação global do CMIP6 utilizados

| MODELO | INSTITUIÇÃO OU AGÊNCIA | PAÍS | CENÁRIOS | PERÍODO |
|-----------------|---|-------------|----------------------|-----------|
| ACCESS-CM2 | Climate Science Centre, Australian Reaserach Council Centre of Excellence for Climate System Science, Bureau of Meteorology | Austrália | | |
| ACCESS-ESM1-5 | Climate Science Centre, Australian Reaserach Council Centre of Excellence for Climate System Science, Bureau of Meteorology | Austrália | | |
| BCC-CSM2-MR | Beijing Climate Center, China Meteorological Administration | China | | |
| CanESM5 | Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis | Canadá | SSP2-4,5 SSP5-8,5 | 2015-2100 |
| CMCC-ESM2 | Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici | Itália | | |
| FGOALS-g3 | Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences | China | | |
| FIO-ESM-2-0 | The First Institution of Oceanography | China | | |
| HadGEM3-GC31-LL | Met Office (HC), Weather and Climate Change | Reino Unido | | |
| IPSL-CM6A-LR | Institut Pierre-Simon Laplace | França | | |

| MODELO | INSTITUIÇÃO OU AGÊNCIA | PAÍS | CENÁRIOS | PERÍODO |
|---------------|---|----------|----------|---------|
| MIROC6 | Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology | Japão | | |
| MPI-ESM1-2-HR | Max-Planck-Institut fuer Meteorologie | Alemanha | | |
| MPI-ESM1-2-LR | Max-Planck-Institut fuer Meteorologie | Alemanha | | |
| MRI-ESM2-0 | Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency | Japão | | |
| NESM3 | Nanjing University of Information Science and Technology | China | | |

Fonte: O autor, 2022.

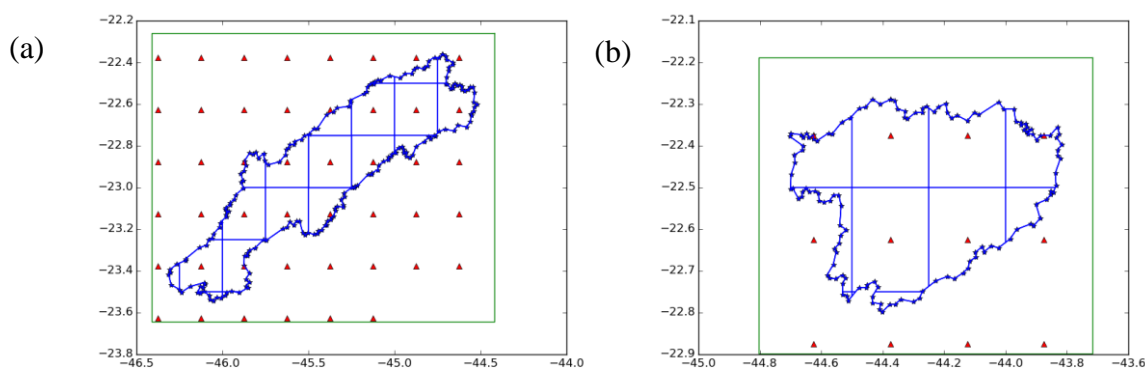
4.3 *Downscaling* estatístico e correção de viés

Obtidos os dados provenientes dos modelos do CMIP6, faz-se necessário implementar os procedimentos de *downscaling* estatístico e de correção de viés.

O *downscaling*, ou redução de escala, nada mais é do que a interpolação dos dados dos MCGs em uma grade de pontos que se adequa às escalas da área de interesse, calculando assim índices médios para cada região (Silveira, Souza-Filho & Vasconcelos, 2017; Tucci et al., 1993).

Neste trabalho, será utilizado o Método dos Polígonos de Thiessen para realização da interpolação dos dados, conforme exemplo apresentado na Figura 6, dado que este considera a não-uniformidade da distribuição espacial das medições (Tucci et al., 1993).

Figura 6 – *Downscaling* estatístico através do Método dos Polígonos de Thiessen

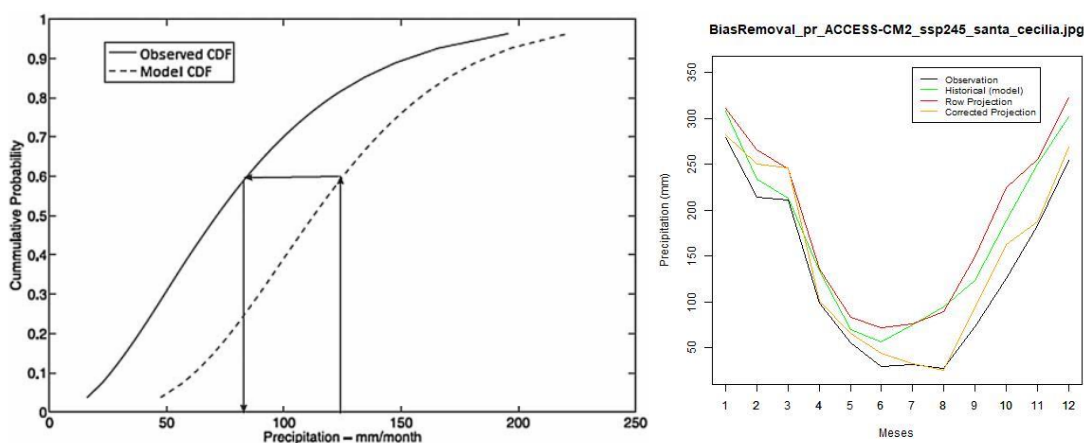


Legenda: (a) bacia contribuinte ao reservatório de Funil e (b) bacia contribuinte à Santa Cecília.

Fonte: O autor, 2022.

Para remoção do viés (*bias removal*) da precipitação obtida através das projeções dos MCGs e garantia de maior aderência ao comportamento dos dados observados será utilizada a função de distribuição gama, conforme exemplos apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Remoção de viés através da função de distribuição gama



Legenda: (a) remoção de viés utilizando distribuição gama; precipitação observada no século XX e simulada para o século XX por modelo climático e (b) aplicação da metodologia para precipitação.
 Fonte: (a) Silveira, Souza-Filho & Vasconcelos, 2017; e (b) O autor, 2022.

De acordo com Silveira, Souza-Filho & Vasconcelos (2017) a correção estatística via função de distribuição gama deve ser realizada sobre as médias mensais de precipitação das séries históricas estimadas pelos MCGs de acordo com os passos apresentados a seguir:

- a) uma distribuição gama será ajustada aos dados observados (CRU TS) para cada bacia, visando a identificação de parâmetros que representam a distribuição da frequência mensal das variáveis, conservando a forma e escala dos parâmetros;
- b) uma distribuição gama será ajustada à série histórica de precipitação do século XX simulada pelos MCGs para cada bacia, conservando também forma e escala dos parâmetros;
- c) remoção de viés para o século XX: dada a precipitação histórica simulada, sua probabilidade de ocorrência será obtida através da frequência de distribuição do modelo estimado no passo (b). A frequência da precipitação observada (CRU TS) será considerada para identificação dos quantis com probabilidade similar, sendo que esta última representará a variável com o viés removido;
- d) remoção do viés para o século XXI: o processo de remoção do viés é o mesmo descrito no passo (c), com exceção do processo de mapeamento das

distribuições que será realizada de acordo com as frequências de distribuição simuladas para o século XX.

Em suma, para realizar a remoção de viés duas funções de distribuição cumulativa serão utilizadas: (1) as precipitações observadas históricas (CRU TS) e (2) as precipitações históricas simuladas pelos MCGs.

Essa abordagem é utilizada para calcular a precipitação mensal corrigida tanto para o século XX quanto para o século XXI. Já para a temperatura, seguindo procedimentos similares, será utilizada a função de distribuição delta para remoção do viés.

4.4 Cálculo da evapotranspiração

A evapotranspiração média mensal (presente e futura) de cada bacia será calculada a partir dos dados observados e dos dados projetados já corrigidos utilizando o método de estimação da evapotranspiração potencial detalhado em Hargreaves & Samani (1982).

O método de Hargreaves-Samani necessita apenas das temperaturas média, máxima e mínima, onde é recomendada uma equação simples para estimação da radiação solar através das diferenças entre as temperaturas (Hargreaves & Samani, 1982).

Após a estimação, a evapotranspiração observada (etp presente), em conjunto com os dados de precipitação e vazão observada, será utilizada para calibração do modelo hidrológico da área de interesse.

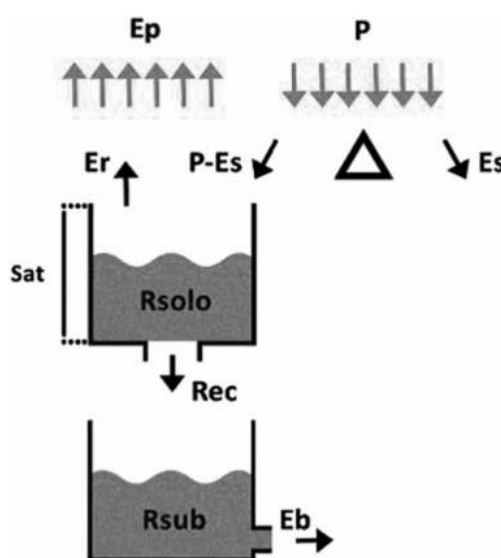
Já a evapotranspiração projetada (etp futura), em conjunto com os dados de precipitação projetados e corrigidos, figurará como insumo para a simulação hidrológica da área de interesse, obtendo, por fim, as vazões afluentes projetadas para o período de 2015 a 2100.

4.5 Modelagem hidrológica

O *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) é um modelo conceitual e determinístico de estrutura relativamente simples que utiliza parâmetros físicos médios das bacias de interesse baseados nos parâmetros do *US Soil Conservation* (Lopes et al., 1982; Tucci et al., 1998; Silveira, Souza-Filho & Vasconcelos, 2017).

A versão mensal do SMAP contém quatro parâmetros de calibração, a saber: capacidade de saturação do solo (Sat), parâmetro de escoamento superficial (Es), coeficiente de recarga subterrânea (Rec), relacionado a permeabilidade da zona não saturada do solo, e taxa de rebaixamento (K) do reservatório subterrâneo ($Rsub$) que gera um fluxo de base (Eb) – Figura 8. Duas outras variáveis são definidas na inicialização do modelo: o teor de umidade do solo inicial (TUi), que determina o nível inicial dos reservatórios no solo, e o fluxo de base inicial (Ebi) que define o valor inicial do reservatório subterrâneo.

Figura 8 – Diagrama conceitual do modelo chuva-vazão SMAP mensal



Fonte: Silveira, Souza-Filho & Vasconcelos, 2017.

Em escala mensal, o modelo recebe dados acumulados de chuva, sendo o quantitativo médio da precipitação recebida sobre a bacia o fator mais importante. Por essa razão, o uso deste modelo em grandes bacias é apropriado, obtendo resultados que correspondem bem às características físicas da bacia de interesse (Silveira, Souza-Filho & Vasconcelos, 2017).

O modelo chuva-vazão requer a inserção das taxas de precipitação e evapotranspiração para as bacias de interesse, além de vazões observadas para ajuste dos parâmetros do modelo (Tucci et al., 1998), sendo que nesta etapa serão utilizados os dados observados (série histórica) e as simulações dos modelos do CMIP6, que já deverão estar corrigidas estatisticamente.

Os parâmetros necessários para o modelo serão calibrados e validados através de períodos determinados de observação, sendo definidos manualmente de acordo com a equivalência entre a vazão modelada e a vazão observada.

4.6 Avaliação de desempenho dos MCGs

Em geral, os MCGs publicados pelo IPCC-AR6 demonstram concordância para a tendência de aumento global das temperaturas para o decorrer do século XXI (IPCC, 2021). No entanto, os modelos mostraram cenários divergentes para o campo da precipitação a depender da região do planeta, onde alguns projetaram aumento de precipitação e outros, diminuição nas taxas pluviométricas.

É provável que essas tendências sejam causadas pelo aumento da temperatura planetária decorrente da elevação de concentração dos gases de efeito estufa (IPCC, 2021), no entanto, não é possível descartar que estas variações também podem estar associadas a flutuações naturais ligadas a padrões de variabilidade nos oceanos, por exemplo, como o fenômeno El Niño ou à variabilidade decadal do pacífico (Grimm et al., 2000). Além disso, cabe ressaltar que os MCGs do CMIP6 possuem baixa resolução espacial, o que não permite a reprodução de alguns processos físicos em menores escalas de análise.

Embora tenha havido grandes avanços nos modelos, ANA (2021) ressalta que, por se tratar de simplificação de processos naturais, estes não simulam adequadamente todos os processos climáticos nas mais diferentes escalas, capturando macrotendências do que pode ocorrer com as variáveis hidrometeorológicas de uma determinada região no futuro. Essa incapacidade implica num aumento considerável da incerteza e, por consequência, faz com que os modelos apresentem divergências entre si.

Dadas as incertezas associadas aos modelos de projeções climáticas, faz-se necessário que estes tipos de estudos façam uso de metodologias que avaliam o desempenho dos modelos para a região de interesse.

Para identificar o grau de acurácia dos modelos utilizados neste trabalho em relação aos padrões históricos de variação da região de interesse, será adotada a metodologia proposta por Silveira et al. (2012) e utilizada por Silveira et al. (2013) para avaliação sazonal da precipitação de três regiões brasileiras, a região Nordeste, a região Amazônica e a Bacia do rio da Prata.

De acordo com Silveira et al. (2013) a avaliação da sazonalidade das precipitações é de grande relevância para estudos de impactos do clima sobre os recursos hídricos, uma vez que o regime fluvial é condicionado pela distribuição temporal das chuvas. Dessa forma, é

possível considerar que uma avaliação positiva da sazonalidade das precipitações projetadas pode servir como indicativo da qualidade do modelo em representar determinado sistema.

Dessa forma, neste trabalho o critério de avaliação dos modelos será determinado através da correlação da sazonalidade da precipitação projetada em relação aos dados históricos utilizando os passos descritos por Silveira et al (2013):

- a) calcula-se a precipitação média mensal sobre a região de estudo para cada um dos modelos selecionados do CMIP6 enumerados na Tabela 3 – Modelos de circulação global do CMIP6 utilizados
- b) em seguida realiza-se a comparação tendo como base índices estatísticos, sendo estes a raiz do erro quadrático médio da contribuição percentual mensal em relação às chuvas anuais ($ERRO_P$) e a Correlação de Pearson ($CORREL$);

- o $ERRO_P$ é a raiz quadrada da média das diferenças individuais quadráticas, entre a contribuição percentual mensal das chuvas modeladas, para os totais anuais e o valor correspondente nas observações, de acordo com o demonstrado na Equação (1), onde n são os meses, P é a previsão para cada mês e A , o correspondente para os dados observados:

$$ERRO_P = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{100 \times P_j}{\sum_{j=1}^n P_j} - \frac{100 \times A_j}{\sum_{j=1}^n A_j} \right)^2} \quad (1)$$

- a Correlação de Pearson pode assumir valores entre -1 e 1 indicando, respectivamente, uma correlação inversa perfeita ou uma correlação perfeita, podendo ser calculada pela Equação (2):

$$CORREL = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}} \quad (2)$$

- após o cálculo destes dois índices, calcula-se o índice de avaliação ponderada que será utilizado para classificação dos modelos, conforme Equações (3) e (4):

$$AVAL = \alpha_c \left(\frac{CORREL - CORREL_{MIN}}{CORREL_{MAX} - CORREL_{MIN}} \right) + \alpha_r \left(\frac{ERRO_{P_{MAX}} - ERRO_P}{ERRO_{P_{MAX}} - ERRO_{P_{MIN}}} \right) \quad (3)$$

$$\alpha_c + \alpha_r = 1 \quad (4)$$

- as variáveis α_c e α_r assumem valores entre 0 e 1, assim para $\alpha_c > \alpha_r$ temos que a correlação exerce maior influência na avaliação do modelo e vice-versa.

Neste trabalho a metodologia de avaliação dos modelos será realizada de forma sazonal e interanual, bacia a bacia da área de interesse, visando identificar a aderência dos modelos climáticos às características físicas que variam de acordo com a bacia.

A avaliação final dos modelos, composta pela média entre a avaliação sazonal e interanual, dará origem a uma classificação que será utilizada para identificação do nível de desempenho do respectivo modelo quando mencionado ao longo da sessão de resultados. Dessa forma, a classificação se dará da seguinte forma:

Tabela 4 – Classificação do desempenho dos modelos

| AVAL _F | CONDIÇÕES DE SECA |
|-------------------|--------------------|
| 0,80 a 1,00 | Ótimo desempenho |
| 0,60 a 0,79 | Bom desempenho |
| 0,40 a 0,59 | Desempenho mediano |
| 0,20 a 0,39 | Baixo desempenho |
| 0,00 a 0,19 | Péssimo desempenho |

Fonte: O autor, 2022.

4.7 Avaliação das secas

Com o objetivo de investigar a evolução dos eventos de seca para a área de interesse de acordo com os MCGs propostos pelo CMIP6 em relação à série histórica serão utilizados indicadores que permitam a quantificação deste tipo de evento.

Neste trabalho a avaliação das secas será realizada conforme proposto por McKee et al. (1993), através do Índice de Precipitação Padronizada – SPI⁷.

O SPI é um índice meteorológico amplamente utilizado pela comunidade científica que permite o cálculo dos valores de probabilidade de não excedência do evento de chuva e o cálculo de variável adimensional que representa tais valores (McKee et al., 1993; Reis et al., 2019). O indicador se baseia na distribuição de probabilidade da precipitação e pode ser calculado em diferentes escalas de tempo, sendo adequado para avaliação da seca em regiões tropicais (Nauditt et al., 2019).

De acordo com Portela et al. (2012) as vantagens na utilização deste indicador, incluem: (i) grande flexibilidade, podendo ser aplicado a diferentes escalas temporais; (ii) simplicidade e baixa complexidade de cálculo em relação aos outros índices; (iii) possibilidade de generalização para outras variáveis hidro-climáticas (McKee et al., 1993; Shucla & Wood, 2008); e (iv) possibilidade na comparação de secas, dado que, por ser um índice normalizado, permite adequada comparação entre diferentes localidades e climas (McKee et al., 1993; Araújo, Souza-Filho e Vasconcelos, 2019).

As escalas de tempo mais frequentes para o cálculo do SPI são as de 1, 3, 6, 12, 24 ou 48 meses (McKee et al., 1993). Escalas de tempo mais curtas, de até 3 meses (SPI 1-3), podem estar relacionadas a precipitação e a umidade do solo, referindo-se às secas meteorológica e agrícola, respectivamente. Já escalas de tempo intermediárias, de até 12 meses (SPI 6-12), se remetem à seca hidrológica, com escassez de água refletida nas vazões superficiais, águas subterrâneas e no armazenamento dos reservatórios (Hayes et al., 1999; Nauditt et al., 2019).

O SPI em escalas superiores a 12 meses (SPI 24-48) é capaz de identificar impactos da escassez hídrica em aquíferos, já que estes possuem tempo de resposta mais lento devido a sua maior resiliência (Hayes et al., 1999; Nauditt et al., 2019).

De acordo com McKee et al. (1993) o SPI pode ser calculado conforme segue:

- a) define-se uma base de dados com precipitações mensais para uma série histórica de pelo menos 30 anos. Os dados devem estar ajustados com a distribuição gama de modo a estabelecer uma relação sobre a probabilidade de precipitação;
- b) seleciona-se as escalas de tempo desejadas (em meses);

⁷ Do inglês *Standardized Precipitation Index* – SPI.

c) calcula-se a diferença entre a precipitação observada e a precipitação média para a escala de tempo definida e, em seguida, divide-se pelo desvio padrão Equação (5). A média e o desvio padrão devem ser obtidos a partir da série histórica;

$$SPI = (P - \bar{P})/\delta \quad (5)$$

d) uma vez estabelecida a probabilidade de precipitação a partir da série histórica, é possível calcular a probabilidade de precipitação para qualquer dado observado.

O SPI será obtido para as escalas de 3, 6 e 12 meses a partir dos dados das séries históricas de precipitação e da precipitação projetada pelos MCGs do CMIP6, ajustadas a distribuição gama. Índices com valores negativos representam eventos de seca e valores positivos períodos úmidos, conforme apresentado no Tabela 5.

Com esses índices, a intensidade da seca, a magnitude e a duração podem ser determinadas, bem como a probabilidade de surgir uma seca específica (Araújo, Souza-Filho e Vasconcelos, 2019). Tem-se, portanto, que um evento de seca está compreendido no período em que o valor do SPI está continuamente negativo, sendo que a seca tem início quando o índice cai abaixo de zero e termina quando atinge valores positivos (McKee et al., 1993).

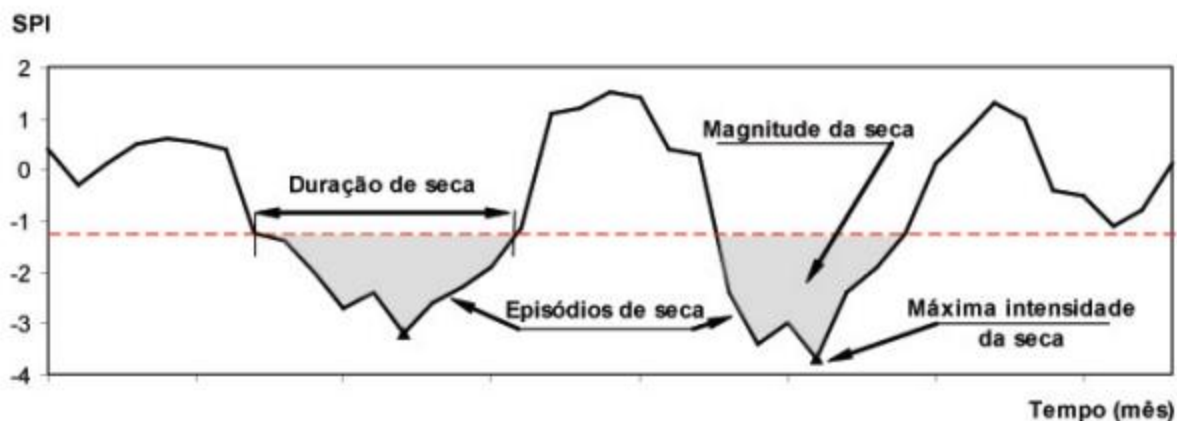
Tabela 5 – Valores SPI em relação à classificação de seca

| VALORES DE SPI | CONDIÇÕES DE SECA |
|----------------|-------------------|
| -0,25 a -0,49 | Seca fraca |
| -0,50 a -0,99 | Seca moderada |
| -1,00 a -1,44 | Seca severa |
| -1,45 a -1,99 | Seca muito severa |
| -2,00 ou menos | Seca extrema |

Fonte: adaptado de Nauditt *et al.*, 2019.

A representação esquemática de algumas das principais características associadas as secas pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 – Representação esquemática das características associadas as secas



Fonte: Portela *et al.*, 2012.

A duração é quantificada através do número máximo de anos seguidos classificados como secos, independentemente da severidade. A frequência é a razão entre anos com ocorrência de seca e todos os anos da série histórica, já a severidade é dada pela soma dos valores SPI durante um evento de seca.

Por fim, a severidade será classificada de acordo com a Tabela 5 e calculada conforme Equação (6), onde S representa a severidade; D é a duração; e SPI o valor considerando o período agregado.

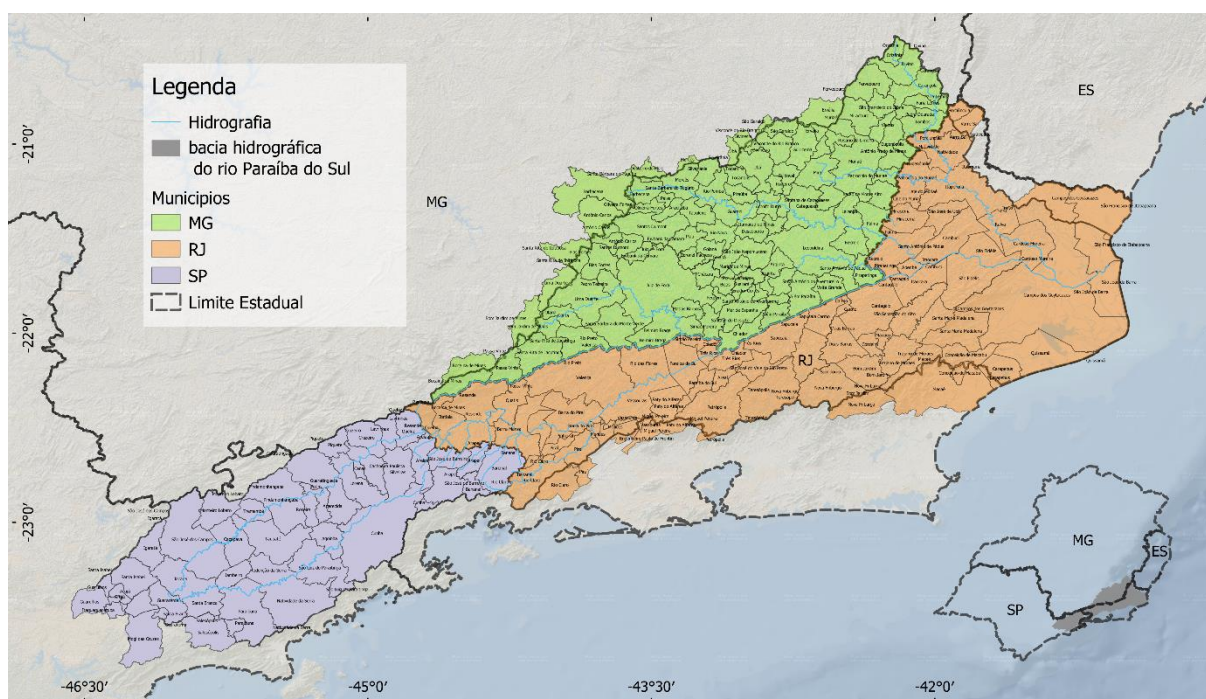
$$S = - \sum_{i=1}^D SPI \quad (6)$$

O SPI calculado neste trabalho apresentará o comportamento individual de cada um dos modelos adotados do CMIP6, no entanto, considerando uma abordagem multi-modelo, levará também, para fins de análise, o cálculo do SPI baseado na ponderação do desempenho de cada um dos modelos obtido no procedimento realizado no item 6.1.

5 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho compreende toda a região abrangida pela bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, conforme demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e municípios abrangidos



Fonte: O autor a partir de SIGA CEIVAP, 2022.

5.1 Área de abrangência

O rio Paraíba do Sul é formado pela confluência dos rios Paraibuna e Paraitinga, cujas nascentes estão localizadas nos municípios de Cunha e Areias, ambos no Estado de São Paulo, percorre cerca de 1,1 mil km até sua foz, localizada na praia de Atafona, no município fluminense de São João da Barra/RJ.

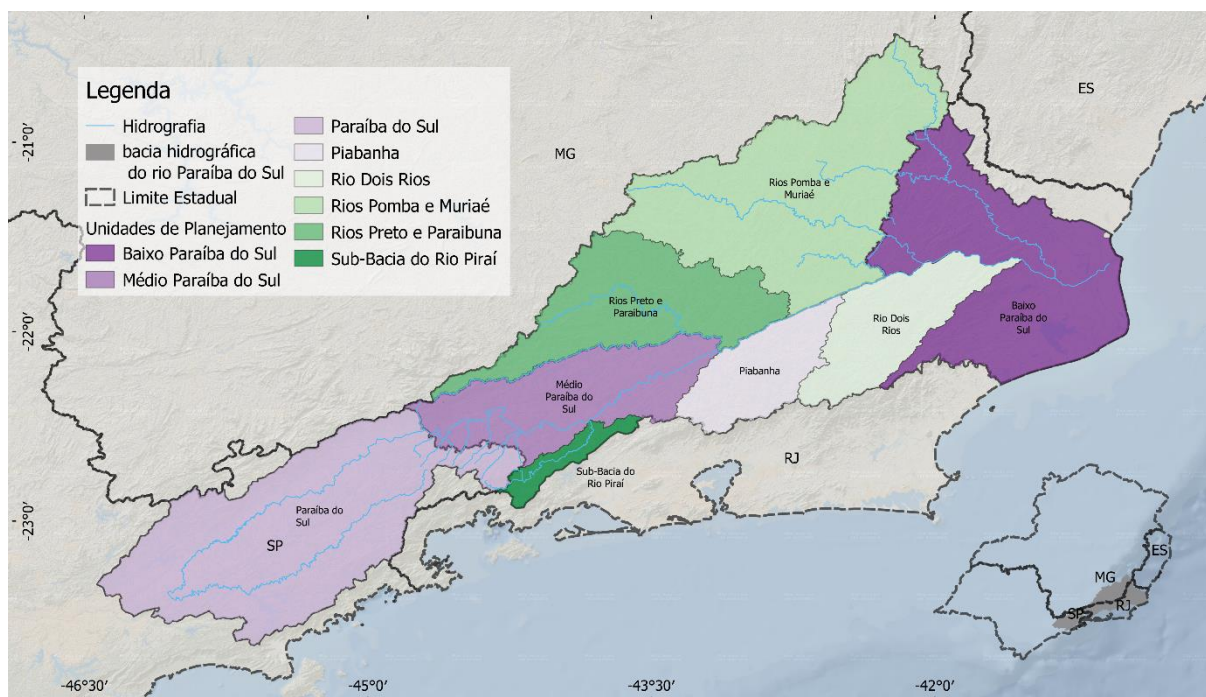
Por percorrer mais de um Estado da federação, o rio Paraíba do Sul é considerado um rio de domínio da União, tendo como principais afluentes os rios Jaguari, Paraibuna mineiro, Pomba e Muriaé, na margem esquerda, e os rios Piraí, Piabanha e Dois Rios, na margem direita.

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul faz parte da Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste (Resolução CNRH nº 23/2003), possui uma área de drenagem de aproximadamente 61,5 mil km² e está localizada entre três dos estados mais populosos do Brasil (Figura 10), abrangendo um total de 184 municípios, sendo 39 no Estado de São Paulo, 57 no Estado do Rio de Janeiro e 88 no Estado de Minas Gerais (CEIVAP, 2020; CEIVAP, 2021).

Estima-se que em sua área de abrangência resida uma população de cerca de 6,7 milhões de habitantes, sendo cerca de 47,4% na porção paulista, 34,5% na fluminense e 18,2% na mineira (CEIVAP, 2021). Além disso, a bacia é responsável por prover água para o abastecimento de aproximadamente 13 milhões de pessoas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), através da transposição realizada na usina elevatória de Santa Cecília, localizada nas proximidades do município de Barra do Piraí/RJ (CEIVAP, 2018a; Comitê Guandu, 2018a; Comitê Guandu, 2015), que possui capacidade de transpor até 160 m³/s (atualmente em 119 m³/s, conforme Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1.382/15).

A área da Bacia do rio Paraíba do Sul coincide com a área de outras 7 regiões hidrográficas de domínio dos Estados, também chamadas de Unidades de Planejamento (UPs) conforme pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Regiões hidrográficas abrangidas pela bacia do rio Paraíba do Sul



Fonte: O autor a partir de SIGA CEIVAP, 2022.

5.2 Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul possui um conjunto de infraestruturas hidráulicas construídas com o objetivo inicial de servir a geração de energia elétrica, tendo se tornado estratégica para a realização de diversas atividades econômicas e para o abastecimento urbano e industrial. Este conjunto é denominado Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu, cuja operação em cascata é de responsabilidade do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (Silveira & Assis, 2019; Vasconcelos, Formiga-Johnsson, Ribeiro, 2019; CEIVAP, 2021).

Segundo o CEIVAP (2021), a bacia conta com quinze aproveitamentos hidrelétricos (acima de 30 MW) em operação, de montante para jusante: Paraibuna, Santa Branca, Lavrinhas, Queluz, Funil, Vigário, Nilo Peçanha, Santa Cecília, Picada, Sobragi, Santa Fé I, Simplício, Ilha dos Pombos, Barra do Braúna e Santa Rosa II (Tabela 6). Além destes, possui os seguintes aproveitamentos hidrelétricos com potencial instalado inferior a 30MW ou reservatórios de regularização de nível d'água ou vazão: Jaguari, Tócos, Lajes, Santana e Nova Maurício.

Tabela 6 – Aproveitamentos hidrelétricos e reservatórios na bacia do rio Paraíba do Sul

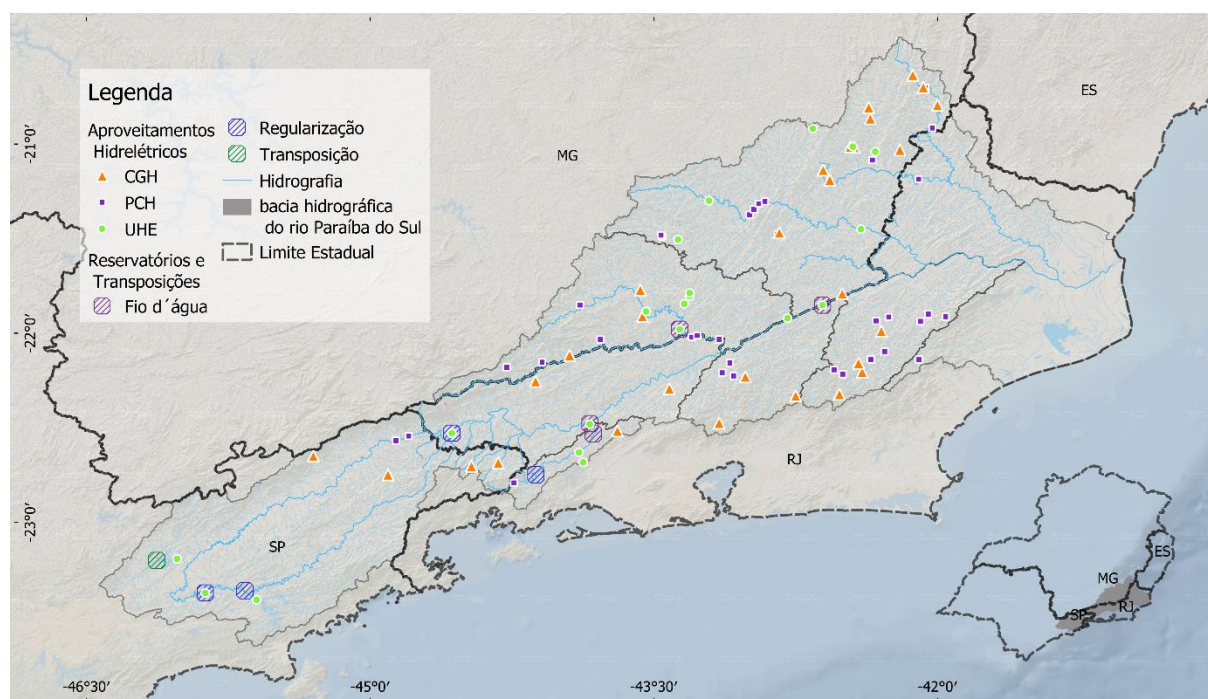
| UP | NOME | TIPO | POTÊNCIA (KW) | NOME DO RIO |
|-------------------------|-----------------|------|---------------|--------------------|
| Paraíba do Sul Paulista | Paraibuna | UHE | 87.020 | rio Paraibuna |
| Paraíba do Sul Paulista | Santa Branca | UHE | 56.050 | rio Paraíba do Sul |
| Paraíba do Sul Paulista | Lavrinhas | PCH | 30.000 | rio Paraíba do Sul |
| Paraíba do Sul Paulista | Queluz | PCH | 30.000 | rio Paraíba do Sul |
| Médio Paraíba do Sul | Funil | UHE | 216.000 | rio Paraíba do Sul |
| Sub-bacia do rio Piraí | Vigário | UHE | 90.820 | rio Piraí |
| Sub-bacia do rio Piraí | Nilo Peçanha | UHE | 380.030 | rio Piraí |
| Sub-bacia do rio Piraí | Santa Cecília | UHE | 34.960 | rio Paraíba do Sul |
| Preto e Paraibuna | Picada | UHE | 50.000 | rio do Peixe |
| Preto e Paraibuna | Sobragi | UHE | 60.000 | rio Paraibuna |
| Médio Paraíba do Sul | Santa Fé I | PCH | 30.000 | rio Paraibuna |
| Preto e Paraibuna | Simplício | UHE | 333.700 | rio Paraíba do Sul |
| Pomba e Muriaé | Ilha dos Pombos | UHE | 187.169 | rio Paraíba do Sul |
| Pomba e Muriaé | Barra do Braúna | UHE | 39.000 | rio Pomba |
| Rio Dois Rios | Santa Rosa II | PCH | 30.000 | rio Grande |

Fonte: adaptado de CEIVAP, 2021.

De acordo com o Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul - PIRH PS (MPF, 2016 apud CEIVAP, 2020, p. 66) em 1907 o Governo do Estado do Rio de Janeiro autorizou o aumento da disponibilidade hídrica do Reservatório de Lajes, administrado pela Concessionária Light S.A., mediante o desvio parcial das águas do rio Pirai, na altura do município de Rio Claro, e iniciando sua operação após o término da construção da barragem de Tócos.

As águas do rio Pirai, sob efeito da gravidade, passaram a ser encaminhadas ao Reservatório de Lajes por um túnel hidráulico com 8,4 km de extensão, à vazão de 12 m³/s, aumentando a capacidade de geração da Usina Hidrelétrica de Fontes. Posteriormente a produção de energia foi novamente aumentada, em razão da construção de um complexo conjunto de usinas, que viria a ser chamado de Complexo Hidrelétrico de Lajes, e a formação de uma nova represa baseada na transposição das águas do rio Paraíba do Sul através da barragem de Santa Cecília (CEIVAP, 2018a; Comitê Guandu, 2018a; CEIVAP, 2021).

Figura 12 – Aproveitamentos hidrelétricos e reservatórios de regularização



Fonte: O autor a partir de SIGA CEIVAP, 2022.

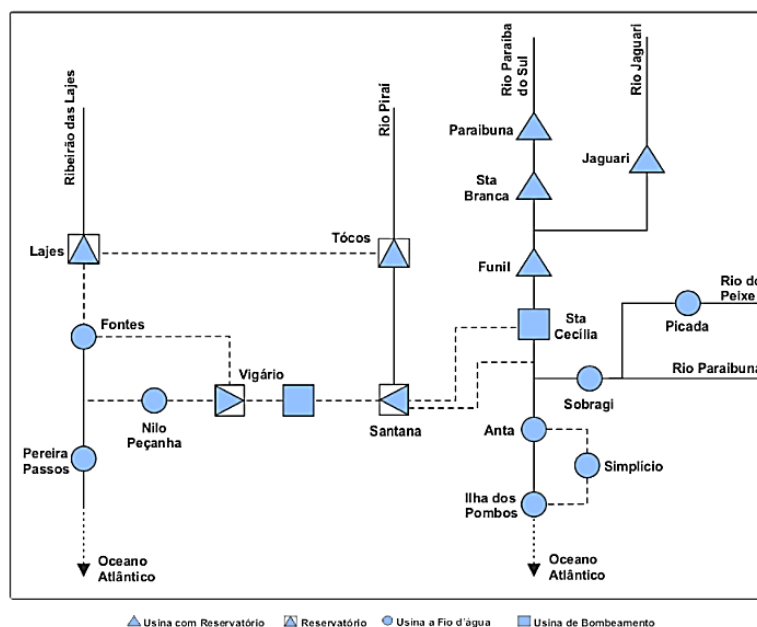
Segundo o Plano Estratégico de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográficas dos rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim (Comitê Guandu, 2018a), o Complexo de Lajes é o maior conjunto de estruturas hidráulicas do Estado do Rio de Janeiro e está localizado em uma das regiões mais industrializadas do país.

A transposição de Santa Cecília foi originalmente projetada para fins de geração de energia elétrica pela Light S.A., possibilitando a inversão do curso do rio Pirai e a transferência de até 160 m³/s das águas do Paraíba do Sul, o que equivale a mais de 50% da vazão média do rio no local (Silveira & Souza-Filho, 2019). No entanto as suas águas acabaram sendo utilizadas para o aproveitamento de usos múltiplos na Bacia do rio Guandu, como a geração de energia elétrica em usinas de grande e médio porte, turismo e lazer, uso industrial, agropecuário e, especialmente, para o abastecimento público (CEIVAP, 2018a; Comitê Guandu, 2018a).

Sua implantação permitiu que em 1955 fosse instalada uma das maiores estações de tratamento de água do mundo, responsável pelo abastecimento de cerca de 83% da região metropolitana do Rio de Janeiro, a ETA Guandu (Comitê Guandu, 2018a; Comitê Guandu, 2015; Vasconcelos, Formiga-Johnsson, Ribeiro, 2019; CEIVAP, 2020).

A Figura 13 apresenta o esquema do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul e sua interligação com o Complexo Hidrelétrico de Lajes, localizado na Bacia do rio Guandu/RJ, através da transposição em Santa Cecília. Já a Figura 14 demonstra o esquema conceitual do aproveitamento hidrelétrico dos rios Paraíba do Sul, Pirai e Ribeirão das Lajes.

Figura 13 – Diagrama unifilar do Sistema



Legenda: Diagrama do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul e sua integração com o Complexo Hidrelétrico de Lajes

Fonte: ANA, 2021.

Os reservatórios de regularização da parte alta do Sistema (Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil) procuram garantir a afluência adequada para a operação de Santa Cecília conforme a vazão mínima afluente definida pela Resolução Conjunta ANA/DAAE/IGAM/INEA nº 1.382, de 7 de dezembro de 2015, que entrou em vigor no dia 30 de novembro de 2016.

Para atender a vazão mínima afluente em Santa Cecília, faz-se o balanço hídrico da vazão defluente de Funil, determinada pelo escoamento na própria bacia e pelas vazões dos reservatórios de montante, Paraibuna, Santa Branca e Jaguari (Silveira & Assis, 2019; CEI-VAP, 2018; 2021).

Figura 14 – Esquema do aproveitamento hidrelétrico do Complexo de Lajes



Fonte: Light, 2016.

As principais características dos reservatórios que garantem a afluência mínima para a operação da elevatória de Santa Cecília podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características dos reservatórios à montante de Santa Cecília

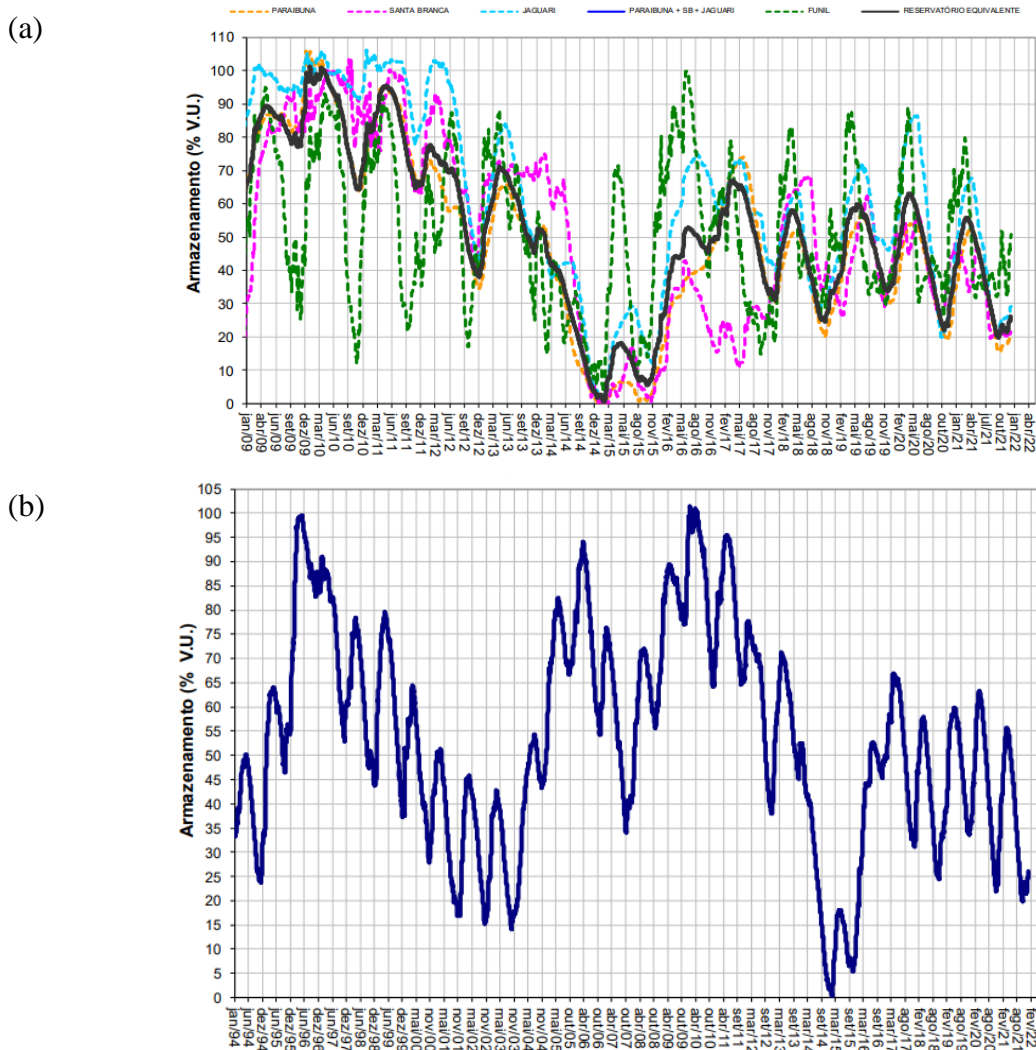
| RESERVATÓRIOS | VOLUME MÁXIMO | VOLUME MÍNIMO | VOLUME ÚTIL | MÍNIMO / MÁXIMO | % DO VOLUME ÚTIL | ÁREA INCREMENTAL |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|------------------|--------------------|
| | (hm ³) | (hm ³) | (hm ³) | (%) | (%) | (km ²) |
| Paraibuna | 4.731,70 | 2.095,60 | 2.636,10 | 44,29 | 61,00 | 4.150,00 |
| Santa Branca | 439,00 | 131,00 | 308,00 | 29,84 | 7,00 | 768,00 |
| Jaguari | 1.235,60 | 443,10 | 792,50 | 35,86 | 18,00 | 1.300,00 |

| RESERVATÓRIOS | VOLUME MÁXIMO | VOLUME MÍNIMO | VOLUME ÚTIL | MÍNIMO / MÁXIMO | % DO VOLUME ÚTIL | ÁREA INCREMENTAL |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| Funil | 888,30 | 283,00 | 605,30 | 31,86 | 14,00 | 7.192,00 |
| Reservatório Equiv. | 7.294,70 | 2.952,80 | 4.341,90 | 40,48 | 100,00 | 13.410,00 |
| Santa Cecília | 5,60 | 3,40 | 2,20 | 60,97 | -- | 3.283,00 |

Fonte: adaptado de Silveira & Assis, 2019.

A Figura 15 demonstra a evolução do volume acumulado pelos reservatórios do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu desde o ano de 2009, além do volume acumulado do reservatório equivalente desde 1993.

Figura 15 – Volume acumulado pelos reservatórios do Sistema



Legenda: (a) desde 2009 e (b) reservatório equivalente desde 1993.

Fonte: ANA, 2022; ONS, 2022

Observa-se com clareza os níveis críticos dos reservatórios e do reservatório equivalente no período de 2014 a 2016 como resultado do período mais seco já registrado para a região desde 1931, sendo que a magnitude da seca deste período apenas se aproximou da experimentada pela bacia entre os anos de 1953 e 1954 (Costa et al., 2015; SABESP, 2020).

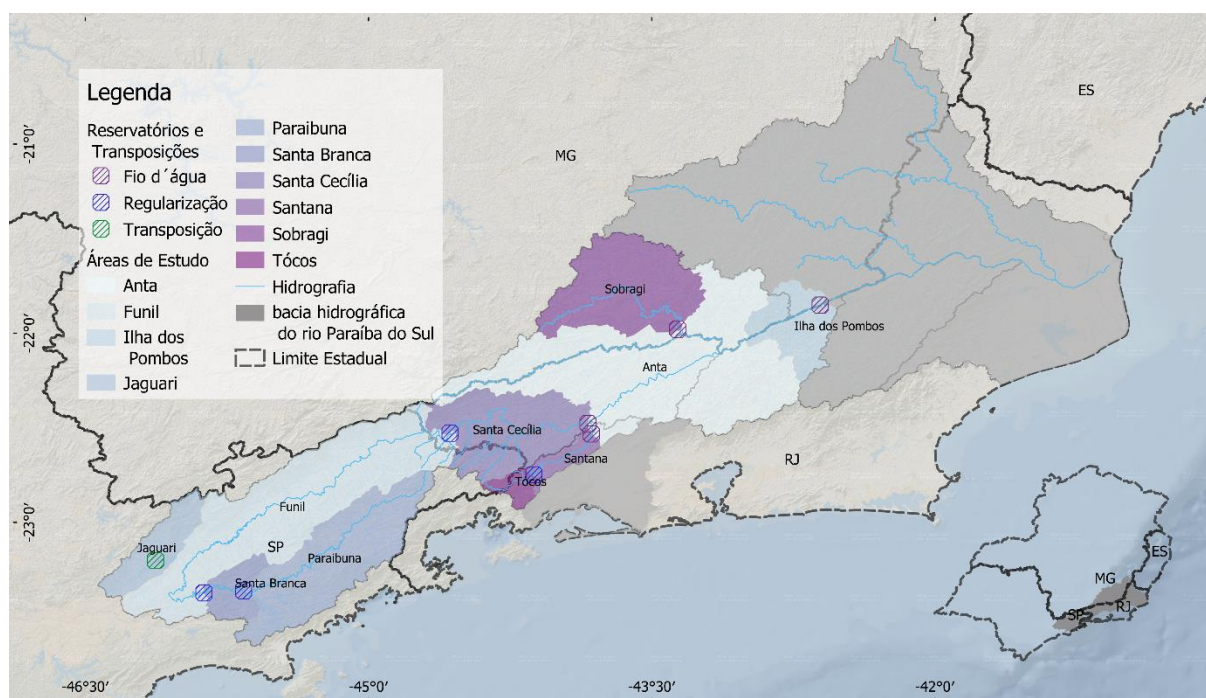
Durante o período de estiagem prolongada, com início em meados de 2013, o nível dos reservatórios do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu chegou a níveis alarmantes, atingindo um volume útil médio de apenas 11,6% no ano de 2015, o menor valor desde o ano de 2003, que registrou um volume útil de 24,4%. (CEIVAP, 2018).

Mais recentemente, com início da operação experimental em março de 2018, a Bacia do Paraíba do Sul passou a transferir vazões para o reservatório de Atibainha, pertencente ao Sistema Cantareira e localizado na bacia hidrográfica dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá - PCJ/SP (CEIVAP, 2018^a; CEIVAP, 2020). De acordo com a Resolução ANA nº 1.931/2017, as instalações desta transposição permitem uma vazão média anual de 5,13 m³/s e uma vazão máxima de 8,5 m³/s (Formiga-Johnsson et al., 2015; ANA, 2017; CEIVAP, 2018a). A infraestrutura permite ainda a inversão de fluxo, captando no reservatório de Atibainha para o reservatório de Jaguari, podendo operar a uma vazão de até 12,2 m³/s em situações específicas de cheia (CEIVAP, 2018a).

Esta última transposição, realizada para reforço do abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) foi decidida e realizada em caráter de urgência, dado o agravamento da estiagem que afetou o Sistema Cantareira e os sistemas de abastecimento da metrópole paulista entre os anos de 2014 e 2016 (Formiga-Johnsson et al., 2015; SABESP, 2020).

Neste trabalho serão adotadas como áreas de estudo as sub-bacias contribuintes aos seguintes aproveitamentos hidrelétricos e reservatórios operados pelo ONS: Paraibuna, Santa Branca, Jaguari, Funil, Santana, Tócos, Santa Cecília, Sobragi, Anta e Ilha dos Pombos, conforme áreas delimitadas na Figura 16.

Figura 16 – Definição da área de estudo e modelagem hidrológica



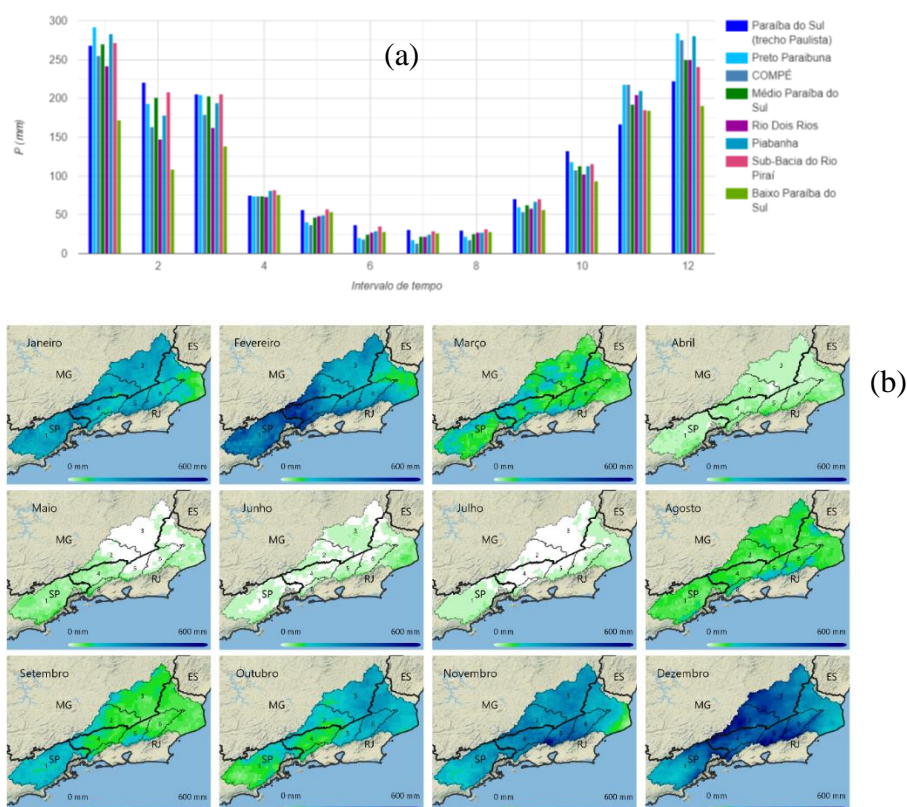
Fonte: O autor a partir de ONS, 2020.

5.3 Características climáticas

O Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu está inserido na configuração geomorfológica do Vale do Paraíba, entre a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira (CEIVAP, 2021). Além disso, sua proximidade com o litoral garante a esta região a predominância de um clima tropical quente, variando espacialmente entre úmido e seco de acordo com as diferenças de altitude e entradas de ventos marinhos (Peel et al, 2007; CEIVAP, 2021).

A região apresenta temperatura média anual que varia entre 18°C e 24°C e uma precipitação média anual de aproximadamente 1.200 mm (Nauditt et al., 2018; CEIVAP, 2021). As precipitações máximas ocorrem nas cabeceiras mineiras, no trecho paulista da Serra do Mar e na Região Serrana do Rio de Janeiro (CEIVAP, 2021). A normal climatológica e a distribuição espacial das chuvas da região podem ser observadas na Figura 17 de acordo com as Unidades de Planejamento – UPs destacadas na Figura 11.

Figura 17 – Climatologia das regiões hidrográficas da bacia do Paraíba do Sul



Legenda: (a) Normal climatológica 1991-2020 e (b) distribuição espacial das chuvas.

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados de Funk et al., 2015.

Nota-se a predominância de uma estação seca no inverno, com duração que pode variar de 3 a 5 meses, e um verão chuvoso. Os maiores índices pluviométricos podem ser observados para a UP Preto e Paraibuna, localizada na região Sudeste do Estado de Minas Gerais, seguida pela UP Piabanha, localizada na região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, ambas com média pluviométrica mensal de 130 mm. Já a unidade com menor índice pluviométrico é a UP Baixo Paraíba do Sul e Itabapoana, localizada na região Norte Fluminense, com média pluviométrica mensal de aproximadamente 90 mm por mês (o autor; CEIVAP, 2021).

Apesar de contar com altos índices pluviométricos, a urbanização da região e a grande quantidade de carga orgânica lançada aos corpos hídricos eleva a demanda para atendimento dos mais diversos setores usuários, o que tem gerado conflitos crescentes em torno da alocação de água em anos de baixa pluviosidade (ANA, 2014; Nauditt et al., 2019).

Estudos apontam que os eventos hidrológicos críticos como as secas poderão tornar-se cada mais frequentes e intensos em decorrência das mudanças no clima (ANA, 2021; IPCC, 2014, 2021), o que acarretaria redução na disponibilidade hídrica e consequente piora na qualidade da água presente nos mananciais. Soma-se ainda às possíveis alterações na disponibili-

dade hídrica, as prováveis mudanças na demanda dos setores usuários da água (Souza-Filho et al., 2014; Nauditt et al., 2019), que podem vir a agravar a situação.

Eventos recentes revelaram a vulnerabilidade do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu frente a longos períodos de estiagem, como a observada entre os anos de 2014 e 2016. Durante essa crise hídrica, tanto a Bacia do rio Paraíba do Sul quanto a Bacia do rio Guandu, no Estado do Rio de Janeiro, tiveram implicações severas para o abastecimento urbano de água, domiciliar e industrial, além de impactos na geração de hidroenergia e na produção agrícola (Nauditt et al., 2016, 2019; Vasconcelos, Formiga-Johnsson, Ribeiro, 2019).

Em amplo relato realizado sobre os impactos da crise hídrica na Bacia do Paraíba do Sul, Vasconcelos, Formiga-Johnsson & Ribeiro (2019) descreveram que os municípios que fazem captação direta na calha do rio Paraíba do Sul tiveram problemas em seus sistemas de abastecimento causados pela diminuição do nível d'água e pela piora em sua qualidade. No entanto, foi a foz do rio Paraíba do Sul a região mais afetada em termos de abastecimento público, dada a intensificação da intrusão salina devido ao controle de vazões realizados no Sistema Hidráulico.

As autoras citam ainda que nesta época a ETA Guandu precisou adotar sucessivas medidas de adaptação por meio do alteamento do nível da barragem onde realiza a captação, à medida que o nível do rio Guandu era rebaixado. Nesta ocasião, a ETA Guandu aumentou de forma expressiva o uso de produtos químicos para o tratamento da água captada, em função do agravamento de sua qualidade (Vasconcelos, Formiga-Johnsson, Ribeiro, 2019).

Em estudo realizado para caracterização do evento ocorrido entre os anos de 2014 e 2016, Nauditt et al., (2019) demonstrou o déficit permanente ($SPI < 0$) ao longo destes dois anos em comparação com o período histórico de referência 1935-2016. Demonstrou ainda que a severidade da seca foi maior no trecho montante da bacia no início do ano de 2014 e nas regiões a jusante a partir do ano de 2015, em razão deste trecho ser regularizado para produção de energia elétrica.

Já Silveira & Souza-Filho (2019), em estudo realizado para simulação dos impactos das mudanças climáticas sobre a Bacia do Paraíba do Sul, utilizando dados provenientes dos modelos do CMIP5 para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, evidenciou que os modelos concordam sobre o aumento da temperatura futura da região, onde as anomalias podem ser superiores em até 1,5°C para a maioria dos modelos. Já em relação ao futuro da precipitação, os autores apresentaram que os modelos divergiam sobre a tendência e magnitude dos impactos.

Contudo a mediana das anomalias de precipitação apresentaram tendência positiva na maioria dos períodos e bacias estudadas, permitindo inferir aumento futuro nas taxas de precipitação.

Para as vazões, os modelos do CMIP5 também demonstraram divergência, com amplitude de variação de -30% a 20% para o período de 2040 a 2069 (Silveira & Souza-Filho, 2019).

A Bacia do rio Paraíba do Sul está localizada na sub-região Sudeste da América do Sul, definida no *Regional Fact Sheet – Central and South America* produzidos pelo AR6-WGI do IPCC (2021). De acordo com o relatório, nesta região é esperado um aumento na intensidade e na frequência de precipitações extremas e de enchentes (resultados com médio nível de confiança); além disso, prevê-se que a região tenha um aumento das secas agrícola e ecológica para meados do século XXI ao considerar um aumento de 2°C na temperatura média global (resultado com alto nível de confiança).

O Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil (ANA, 2021) também realizou estudo sobre o impacto das mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica e demanda no Brasil, onde, de modo geral, os modelos utilizados apresentaram divergência para o Sudeste brasileiro. O estudo demonstrou que os modelos se dividem entre redução e aumento de até 5% na disponibilidade hídrica na Bacia do rio Paraíba do Sul.

Para demonstração de um cenário potencialmente crítico, com aumento na demanda de irrigação e redução na disponibilidade hídrica em parte do País, ANA (2021) apresentou balanço hídrico que aponta o aumento de oferta de água de 5% a 25% a jusante de Santa Cecília e de 0% a 5% a montante. Por outro lado, estimou que a demanda pode aumentar em até 50% em alguns trechos da Bacia do Paraíba do Sul, agravando possíveis conflitos.

É importante ressaltar que a região Sudeste do país é uma região de transição, cujo regime de chuva depende de fenômenos de mesoescala como a Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS, principalmente durante o verão. Por essa razão, as incertezas das projeções climáticas para essa região podem ser consideradas grandes e de baixa previsibilidade climática (BRASIL, 2016).

Considerando o aumento da demanda de água no Brasil e a adaptação insuficiente dos grandes centros urbanos face às incertezas climáticas, Silveira & Souza-Filho (2019, p. 261-270; ANA, 2021) consideram que a avaliação da vulnerabilidade e da variação das disponibilidades hídricas superficiais são de grande importância, sendo necessária a definição de estratégias de adaptação que mitiguem os potenciais impactos das mudanças no clima sobre a sociedade e sobre o ecossistema.

5.4 Gestão e governança do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu

A Política Nacional de Recursos Hídricos, ou Lei das Águas, instituída pela Lei nº 9.433/97, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SINGREH que possui como integrantes os Conselhos Nacional - CNRH e Estaduais de Recursos Hídricos - CERH, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, os Comitês de Bacia Hidrográfica - CBH, os Órgãos Gestores Estaduais de Recursos Hídricos - OGERH e as Agências de Água, ou Agências de Bacia (Brasil, 1997, art. 33). Juntos, estes entes são responsáveis pela implementação da Política de Recursos Hídricos em suas respectivas áreas de atuação, conforme suas competências.

A Bacia do rio Paraíba do Sul é de domínio interestadual, ou seja, abrange a área de mais de um Estado da federação, o que confere a região grande complexidade física, política e institucional (CEIVAP, 2020; Silveira & Assis, 2019).

Criado a partir do Decreto Federal nº 1.842/1996, alterado pelo Decreto Federal nº 6.591/2008, o Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul - CEIVAP possui a competência de viabilizar programas que visam o desenvolvimento sustentável da bacia, além de promover a articulação interestadual de modo a garantir iniciativas regionais integradas de acordo com as prioridades estabelecidas no plano de bacia (CEIVAP, 2020). A área de atuação do CEIVAP pode ser conferida na Figura 11.

Além do CEIVAP, a região conta com mais 7 comitês atuantes. Estes são chamados de comitês afluentes e estão sob domínio dos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro (CEIVAP, 2021). A Tabela 8 apresenta os comitês atuantes na Bacia do Paraíba do Sul, bem como seus respectivos decretos de criação.

Tabela 8 – Comitês atuantes na Bacia do Paraíba do Sul

| BACIA | UF | CBH | DECRETO DE CRIAÇÃO |
|---|----|--------------|--|
| Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul | - | CEIVAP | Decreto Federal nº 1.842/1996 |
| UGHRI-02 – Bacia do rio Paraíba do Sul | SP | CBH-OS | Lei Estadual nº 9.034/1994 |
| UPGRH-PS1 – Bacia dos Afluentes Mineiros dos rios Preto e Paraibuna | MG | CBH-PP | Decreto Estadual nº 44.199/2005 |
| UPGRH-PS2 – Bacia dos Afluentes Mineiros dos rios Pomba e Muriaé | MG | CBH-COMPÉ | Decreto Estadual nº 44.290/2006 |
| RH-III – Médio Paraíba do Sul | RJ | CBH-MPS | Decreto Estadual nº 41.475/2008 Alterado pelo Decreto Estadual nº 45.466/2015 |
| RH-IV – rio Piabanha e sub-bacia dos rios Paquequer e Preto | RJ | CBH-Piabanha | Decreto Estadual nº 38.235/2005 Alterado pelo Decreto Estadual nº 45.461/2015 |
| RH-VII – rio Dois Rios | RJ | CBH-R2R | Decreto Estadual nº 41.472/2008 Alterado pelo Decreto Estadual nº 45.460/2015 |
| RH-IX – Baixo Paraíba do Sul e Itabapoana | RJ | CBH-BPSI | Decreto Estadual nº 41.720/2009 Alterado pelo Decreto Estadual nº 45.584/2016 |

Fonte: adaptado de CEIVAP, 2021.

Com funções consultivas e deliberativas, os CBH são responsáveis por promover o debate sobre as questões relacionadas aos recursos hídricos, além de arbitrar em primeira instância sobre conflitos, aprovar e acompanhar a execução dos planos de bacia, entre outras (Brasil, 1997, art. 38). Os comitês serão secretariados por uma Agência de Bacia, ou por entidade com delegação ou equiparação destas funções, conforme legislação pertinente (Brasil, 2004; Rio de Janeiro, 2010; Minas Gerais, 2019).

Diversas são as atribuições de uma Agência de Bacia, dentre elas está o acompanhamento da administração financeira dos recursos arrecadados com a cobrança pelo uso de recursos hídricos em sua área de atuação, a elaboração dos planos de bacia e a promoção de estudos necessários para a gestão dos recursos hídricos (Brasil, 1997, art. 44).

A Agência de Bacia do CEIVAP e de seus comitês afluentes, com exceção do CBH-PS, é a Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul - AGEVAP, através de delegação mediante contrato de gestão assinado com os órgãos gestores de recursos hídricos da União e dos Estados. A relação dos contratos de gestão firmados, órgão gestor relacionado e seus respectivos comitês intervenientes são listados na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9 – Contratos de gestão na bacia do rio Paraíba do Sul

| CONTRATO DE GESTÃO | UF | CBH |
|---------------------------|-----------|-------------------------------------|
| ANA nº 027/2020 | - | CEIVAP, Bacia do rio Paraíba do Sul |
| INEA nº 01/2010 | RJ | RH-III, RH-IV, RH-VII e RH-IX |
| IGAM nº 01/2019 | MG | CBH-PP |
| IGAM nº 02/2019 | MG | CBH-COMPÉ |

Fonte: adaptado de AGEVAP, 2022.

Também atuante na bacia, o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS é o responsável pela operação centralizada do Sistema Interligado Nacional, do qual o Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu faz parte, atuando em conformidade com as regras operativas estabelecidas pela ANA em conjunto com os demais órgãos gestores de recursos hídricos estaduais (ANA, 2015).

Enfim, dado o grande número de atores envolvidos, além de interesses e usos diversos da água na bacia (abastecimento humano, industrial, geração de energia, entre outros) faz-se necessária uma adequada governança para garantia da disponibilidade hídrica, principalmente em situações que demandam respostas emergenciais.

Para Ribeiro (2016; 2019) a governança da água é totalmente dependente de determinado contexto social, cultural, ambiental, econômico, político e institucional. Dessa forma, os modelos de governança da água deverão ser desenhados de acordo com seus respectivos desafios de gestão. Na ocasião da seca severa evidenciada no início do ano de 2014, o CEIVAP reativou o Grupo de Trabalho Permanente de Acompanhamento da Operação Hidráulica na Bacia do rio Paraíba do Sul - GTAOH, que havia sido criado durante a estiagem de 2003 (CEIVAP, 2014). O grupo possuía como principal objetivo a antecipação e análise de possíveis conflitos e a proposição de alternativas para os critérios de operação dos reservatórios e da transposição para a Bacia do rio Guandu, no Estado do Rio de Janeiro.

O grupo, ainda atuante em 2022, é composto por representantes dos operadores dos reservatórios de regularização (Furnas Centrais Elétricas S/A, Light Serviços de Eletricidade S/A e Companhia Energética de São Paulo - CESP), dos órgãos gestores estaduais, dos usuários de água do CEIVAP, dos usuários de água do Comitê Guandu-RJ, dos municípios e dos comitês afluentes, além de contar com convidados permanentes da ANA, da ANEEL e do ONS.

Segundo Vasconcelos, Formiga-Johnsson & Ribeiro (2019) o grupo foi criado para definir e pactuar soluções técnicas e ações de gestão para minimização dos impactos da seca.

Para isso, a partir de intensas discussões, foram definidas 19 resoluções temporárias que conciliassem a economia do estoque de água nos reservatórios e o atendimento dos múltiplos usos.

Durante o período de crise, a ANA, com apoio dos órgãos gestores estaduais, elaborou o Plano de Ações Complementares para Gestão da Crise Hídrica na Bacia do rio Paraíba do Sul. Com este plano, foram investidos cerca de R\$ 18 milhões em ações emergenciais em 16 municípios diretamente atingidos; algumas das ações foram construção de poços artesianos, desassoreamento de rios, instalação de bombas autoescorvantes, instalação de conjuntos motobomba flutuante, entre outras (Vasconcelos, Formiga-Johnsson & Ribeiro, 2019).

Por fim, diante da conclusão de que as regras operativas em vigor até o ano de 2014 não eram mais adequadas (Costa et al., 2015; Formiga-Johnsson et al., 2015; Vasconcelos, Formiga-Johnsson, Ribeiro, 2019), foi pactuado por um novo marco regulatório das regras operativas do Sistema que passou a vigorar após a crise hídrica, em dezembro de 2016, ação que melhor representa iniciativa de gestão adaptativa fomentada pelo grupo.

A Tabela 10 apresenta as condições atuais de operação dos reservatórios do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu, de acordo com a Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/ INEA n° 1.382/2015, além da Resolução n° 1.188/2016 que tratou de uma das reduções temporárias dos limites mínimos do período da crise hídrica.

Tabela 10 – Descargas mínimas das operações dos reservatórios do Sistema

| RESERVATÓRIOS | DESCARGAS MÍNIMAS (M³/S) | |
|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | RESOLUÇÃO N° 1.382/2015 | RESOLUÇÃO N° 1.188/2016 |
| Paraibuna | 10 | 7 |
| Santa Branca | 30 | 10 |
| Jaguari | 4 | 4 |
| Funil | 70 | 60 |
| Santa Cecília (bombeamento) | 119 | 110 |
| Santa Cecília (jusante) | 71 | 110 |
| Pereira Passos | 120 | - |

Legenda: Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA n° 1.382/2015 e Resolução ANA n° 1.188/2016.

Fonte: adaptado de CEIVAP, 2021.

A Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA n° 1.382/2015 também instituiu o Grupo de Assessoramento à Operação do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - GAOPS, composto por representantes da ANA, DAEE, IGAM, INEA, ONS e CEIVAP, tendo como obje-

tivo o acompanhamento permanente da operação do Sistema a fim de garantir o cumprimento das condições de operação estabelecidas. De acordo com ANA (2022), o GAOPS realiza reuniões mensais, publicando boletins de acompanhamento da operação do Sistema.

6 RESULTADOS

Conforme conceituado nos itens 4, 4.2 e 4.3 deste documento, bem como na Figura 5, que apresenta o racional adotado para aplicação do modelo, os procedimentos para obtenção dos dados climatológicos corrigidos seguiu os seguintes passos:

- a) seleção dos cenários de mudanças climáticas SSP2-4,5 e SSP5-8,5 definidos por O'Neill et al. (2016) e coleta de dados brutos;
- b) *downscaling* estatístico pelo método dos Polígonos de Thiessen, conforme definido por Tucci et al. (1993);
- c) remoção de viés dos dados brutos e escalados, conforme conceituado por Silveira, Souza-Filho & Vasconcelos (2017);
- d) cálculo da evapotranspiração – passada e futura – pelo método de estimação da evapotranspiração potencial (Hargreaves & Samani, 1982).

Em seguida, foram realizados os procedimentos de avaliação de desempenho dos modelos, interpretação de dados climatológicos e de modelagem hidrológica – essa última visando a obtenção das vazões afluentes futuras, assim como descrito nos próximos tópicos.

6.1 Desempenho dos MCGs

Dadas as incertezas associadas aos modelos de projeções climáticas, faz-se necessária a avaliação de seu desempenho na representação da região de interesse. O critério de avaliação adotado foi a correlação e o erro quadrático médio (ERRO_P) da precipitação projetada em relação aos dados históricos, conforme descrito no item 4.6 deste documento e detalhado por Silveira et al. (2012; 2013).

No Apêndice A, da Tabela 11 a Tabela 20, podem ser consultadas as avaliações de cada um dos MCGs do CMIP6 e suas respectivas comparações. Nelas são demonstrados os índices estatísticos para as áreas de interesse em ordem crescente de classificação.

De modo geral, em termos de avaliação dos modelos do CMIP6, o Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu pode ser dividido em três regiões: sub-bacias a montante de Santa

Cecília⁸ – MSC, sub-bacias a jusante de Santa Cecília⁹ – JCS e a sub-bacia do rio Pirai¹⁰ – BPI, afluente ao rio Paraíba do Sul.

Sub-bacias a montante de Santa Cecília – MSC

Na avaliação geral das bacias MSC, tem-se que o modelo FIO-ESM-2-0 apresenta a melhor posição, seguido pelos modelos MPI-ESM1-2-HR e NESM3, que também apresentam avaliações superiores a 95%. Por outro lado, os modelos ACCESS-ESM1-5 e MIROC6 apresentam menor avaliação, mostrando-se inferiores aos demais na representação da sazonalidade das bacias nessa região.

Pode-se dizer que todos os modelos apresentaram alta correlação com os dados observados na avaliação sazonal (cerca de 99%) e média correlação na avaliação interanual, variando de 60 a 75%; com isso, a maior diferença entre os modelos pôde ser atribuída ao ERRO_P. Nessa linha, podemos notar que os modelos ACCESS-ESM1-5 e MIROC6 apresentaram ERRO_P ligeiramente superior aos demais, sendo este o fator que levou estes modelos a serem classificados por último quando se trata da representação das características climatológicas da região.

Apesar do modelo FIO-ESM-2-0 ser o que possui melhor desempenho geral na região MSC, cabe ressaltar que existe divergência entre a avaliação sazonal e a avaliação interanual. Na avaliação sazonal, o modelo mais bem avaliado foi o MPI-ESM1-2-HR, enquanto o FIO-ESM-2-0 foi o melhor na avaliação interanual.

Sub-bacia do rio Pirai – BPI

Por sua vez, na avaliação geral da BPI, representada pela divisão das bacias contribuintes aos reservatórios de Tócos e Santana, tem-se que os modelos MPI-ESM1-2-LR, MPI-ESM1-2-HR e NESM3 apresentaram as maiores avaliações. Já os modelos ACCESS-ESM1-5 e MIROC6 persistiram na posição de menor avaliação. Além disso, da mesma forma que nas bacias MSC, é possível dizer que todos os modelos apresentaram alta correlação com os dados observados na avaliação sazonal (cerca de 99%) e média correlação na avaliação intera-

⁸ Regiões afluentes a Paraibuna, Santa Branca, Jaguari, Funil e Santa Cecília.

⁹ Regiões afluentes a Sobragi, Anta e Ilha dos Pombos.

¹⁰ Regiões afluentes a Tócos e Santana.

nual, variando de 65 a 70%. Neste caso também houve divergência entre a avaliação sazonal e a avaliação interanual, onde o modelo mais bem avaliado na avaliação sazonal foi o MPI-ESM1-2-HR, enquanto na avaliação interanual foi o NESM3.

Cabe destacar que para esta região cerca de 85% dos modelos tiveram avaliações sazonais e interanuais inferiores a 90%, o que implica que os modelos do CMIP6 são menos apropriados para representar as regiões de Tócos e Santana; sendo que este fato pode ser devido a menor dimensão das bacias, que necessitam de uma grade de dados com maior resolução espacial para garantia de melhor representação dos fenômenos climatológicos.

Sub-bacias a jusante de Santa Cecília – JSC

Por fim, as bacias JSC tiveram o modelo BCC-CM2-MR como aquele que melhor representa as características climatológicas da região. Os modelos ACCESS-ESM1-5 e MIROC6 permaneceram como os modelos com menor avaliação, o que leva a conclusão de que estes modelos possuem dificuldade em representar a região do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu.

Na avaliação sazonal, o modelo mais bem avaliado foi o CMCC-ESM2 enquanto na avaliação interanual foi o BCC-CSM2-MR; cabe destacar que o modelo CMCC-ESM2, apesar de ter se destacado na avaliação sazonal, apresentou baixa avaliação interanual, variando de 34 a 47%, ocupando a 9ª posição da avaliação geral para esta região.

Ainda em relação as avaliações sazonal e interanual dos modelos, individualmente, cabe ressaltar os seguintes pontos:

- a) os modelos ACCESS-ESM1-5 e MIROC6 apresentaram baixo desempenho tanto nas avaliações sazonais quanto nas interanuais, apesar de demonstrarem correlações ligeiramente inferiores aos demais em cada uma das regiões. Dessa forma, estes modelos mostram-se inferiores aos demais na representação do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul – Guandu;
- b) em alguns casos, os modelos ACCESS-ESM1-5 e MIROC6 apresentaram avaliação sazonal ou interanual iguais ou muito próximas de zero quando comparado aos demais modelos, confirmando que estes possuem dificuldade em representar a sazonalidade nesta região;

c) a maioria dos modelos analisados capta padrões de variação sazonal, apresentando valores bastante elevados de correlação em relação à precipitação observada durante o século XX. Porém, o mesmo não acontece com a avaliação interanual, na qual a maioria dos modelos demonstra correlação mediana.

Já a avaliação geral, que considera os achados da avaliação sazonal e interanual em conjunto, apontou que as melhores simulações do clima para a região de Santa Cecília e montante se referem ao modelo FIO-ESM-2-0, enquanto as piores simulações se referem ao modelo MIROC6. Destaca-se ainda que a correlação interanual na bacia de Santa Cecília foi a que apresentou maior margem de representatividade, variando de 70 a 74%.

Dessa forma, têm-se que os modelos globais do CMIP6 apresentam correlações suficientemente elevadas em relação à climatologia observada no período de 1901-2018 para as regiões estudadas, mostrando que os modelos são capazes de capturar padrões de variações sazonais e interanuais, e que podem ser considerados como uma boa opção para avançar na investigação dos efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos na região.

As divergências identificadas quanto às avaliações sazonal e interanual demonstram a incerteza existente nas projeções. Entretanto fica estabelecida uma margem de possíveis cenários de variabilidade climática para a região do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu que devem ser consideradas para adoção de políticas públicas e gestão adaptativa.

Cabe destacar ainda que a confiabilidade dos dados apresentados nas próximas seções possuem maior ligação com a convergência entre os resultados de cada modelo (anomalias percentuais) do que suas correlações individuais com os dados históricos (avaliação), isso porque cada modelo busca a representação de processos físicos através dos mais diferentes métodos empíricos, contando ainda com condições iniciais diferentes entre si.

Diante disso e conforme apresentado no item 7.2, um conjunto de modelos diversos que apresentam resultados convergentes, podem ser considerados como capazes de representar as tendências futuras de determinada região.

6.2 Projeções hidroclimatológicas

O reconhecimento e a interpretação das projeções climáticas ao longo deste século são de grande importância para o fomento de políticas públicas de gestão adaptativa e de prepara-

ção e mitigação de riscos (Wilhite et al., 2000; González & Morcillo, 2007; Marcelino, 2008; Sayers et al., 2016). Dessa forma, como resultado dos procedimentos anteriores, neste capítulo serão apresentados os dados climáticos simulados pelos modelos do CMIP6 regionalizados e corrigidos para o Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu. Em seguida, são apresentadas as vazões afluentes futuras resultantes do modelo hidrológico SMAP mensal.

No Apêndice C, da

Figura 36 até a Figura 74, são apresentadas as projeções de precipitação e temperatura (1915-2100) para cada uma das bacias de interesse em comparação a média histórica (1911-2018) destas mesmas variáveis, apresentadas da Figura 26 até a Figura 35 do Apêndice B.

6.2.1 Projeções de temperatura

Quanto as projeções de temperatura, observa-se que os modelos do CMIP6 concordam quanto a tendência de aumento para a região, variando apenas em magnitude, seguindo o padrão identificado em estudos anteriores (Marengo, 2006; Nobre et al, 2017; Silveira & Souza-Filho, 2019) e as tendências globais e regionais endossadas por instituições renomadas (IPCC, 2014; 2021; ANA, 2016; 2021; BRASIL (PNA), 2016; WRI BRASIL, 2019; WMO, 2020; OdC, 2021). Em média a temperatura poderá aumentar em $1,5^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,25$), ao considerar o cenário SSP2-4,5, e em até $3,2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,5$) no cenário mais crítico, SSP5-8,5. As maiores variações de temperatura foram identificadas nas sub-bacias a montante de Santa Cecília, onde o aumento de temperatura pode chegar em até $3,4^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,5$) até o final do século.

Importante observar que a tendência de aumento já estava presente sobre os dados observados, conforme também destacado no Plano Nacional de Adaptação à Mudança Climática - PNA (BRASIL, 2016). Os dados históricos apontam que houve um aumento médio de cerca de $2,0^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,5$) em todo o Sistema Hidráulico durante o período de 1901-2018.

Os modelos que apresentaram maior incremento nas temperaturas para as projeções futuras foram o HadGEM3-GC31-LL e o CanESM5, o primeiro foi mais relevante para as bacias de montante de Santa Cecília e o segundo para a Sub-bacia do rio Piraí e para as sub-bacias a jusante de Santa Cecília. Por outro lado, em todas as bacias o modelo MIROC6 foi o que apresentou as projeções mais conservadoras de aumento da temperatura.

6.2.2 Projeções de precipitação

Em relação a precipitação, é possível observar que os modelos do CMIP6 divergem em relação a tendência futura e a magnitude das alterações em todas as bacias, mantendo o padrão identificado em outros estudos (Silveira et al., 2013; ANA, 2016; Silveira & Souza-Filho, 2019; Fernandes et al., 2019; CMIP, 2014; 2021; Almazroui et al., 2021; Kim et al., 2021). Essa divergência pode estar associada à própria incerteza dos fenômenos meteorológicos ou ainda a má representação dos fenômenos de microescala ou mesoescala que dependem de uma grade de melhor resolução para que sejam incorporados (ANA, 2016; BRASIL, 2016).

Cabe lembrar que a região Sudeste é reconhecida como uma região de transição, cujo regime de chuvas depende fortemente de fenômenos de mesoescala como a Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS (BRASIL, 2016).

De modo geral, nota-se que o modelo ACCESS-CM2 (bom desempenho) superestima a precipitação em quase todo o período, resultando em um total anual de, em média, 10% acima do observado para o cenário SSP2-4,5 e de 25% para o cenário SSP5-8,5, implicando aumento na magnitude dos eventos de precipitação neste segundo cenário. Por sua vez, o modelo CanESM5 (baixo desempenho) subestima a precipitação em todas as bacias, resultando em uma redução anual média das precipitações em torno de 15% abaixo do observado para o cenário SSP2-4,5 e de 25% para o cenário SSP5-8,5.

A precipitação sazonal possui forte aderência com os dados históricos, apresentando baixa variação entre os modelos. As variações podem ser de 5% para o cenário SSP2-4,5 e de 15% para o cenário SSP5-8,5. Maiores variações na precipitação sazonal (chegando a quase 25%) ocorrem nos meses com maiores taxas de precipitação, ou seja, no verão, do mês de dezembro até março, o que pode ser devido à influência de eventos de mesoescala.

Na região das sub-bacias a jusante de Santa Cecília, os modelos analisados sugerem maior possibilidade de redução nas precipitações. Os modelos CanESM5 (baixo desempenho) e FGOALS-g3 (desempenho mediano) subestimam a precipitação histórica em todo o período do século XXI em cerca de, respectivamente, 20%, e 15% para o cenário SSP2-4,5, enquanto para o cenário SSP5-8,5 as reduções projetadas pelo CanESM5 podem chegar a até 30% em relação ao período histórico (1901-2018). Cabe destacar que Sobragi foi a região que apresen-

tou maior variabilidade da precipitação entre os modelos, aumentando o nível de incerteza sobre o clima futuro para a bacia mineira.

6.2.3 Projeções das vazões afluentes

A partir dos dados de precipitação e temperatura projetados e evapotranspiração calculada foi possível modelar as vazões afluentes projetadas conforme cenários de forçantes climatológicas selecionados.

No Apêndice C, da Figura 75 até a Figura 92, são apresentadas as projeções de vazão incremental para cada uma das bacias de interesse em comparação a média histórica.

Os modelos apontam para um aumento na vazão incremental para as bacias localizadas a montante de Santa Cecília ao longo do século XXI em comparação à média histórica. Esta tendência pode se dar devido ao significativo aumento projetado para as taxas de precipitação da região, colocando o balanço hídrico em condição mais favorável. Para esta região, os modelos que apontaram maior incremento e maior decréscimo de vazão foram, respectivamente o ACCESS-CM2 (ótimo desempenho) e o CanESM5 (baixo desempenho), seguindo a tendência de comportamento observada na análise das precipitações projetadas. Em média, o modelo ACCESS-CM2 aponta por um aumento nas vazões em cerca de 45% para o cenário SSP2-4,5 e de quase 60% para o cenário SSP5-8,5, demonstrando que dada uma condição crítica para as mudanças no clima, a região tende ao aumento nas taxas de precipitação e, consequentemente, nas vazões afluentes aos reservatórios a montante de Santa Cecília. O modelo CanESM5, por sua vez, apontou decréscimo das vazões em cerca de 20% no cenário tendencioso e de 35% no cenário mais crítico.

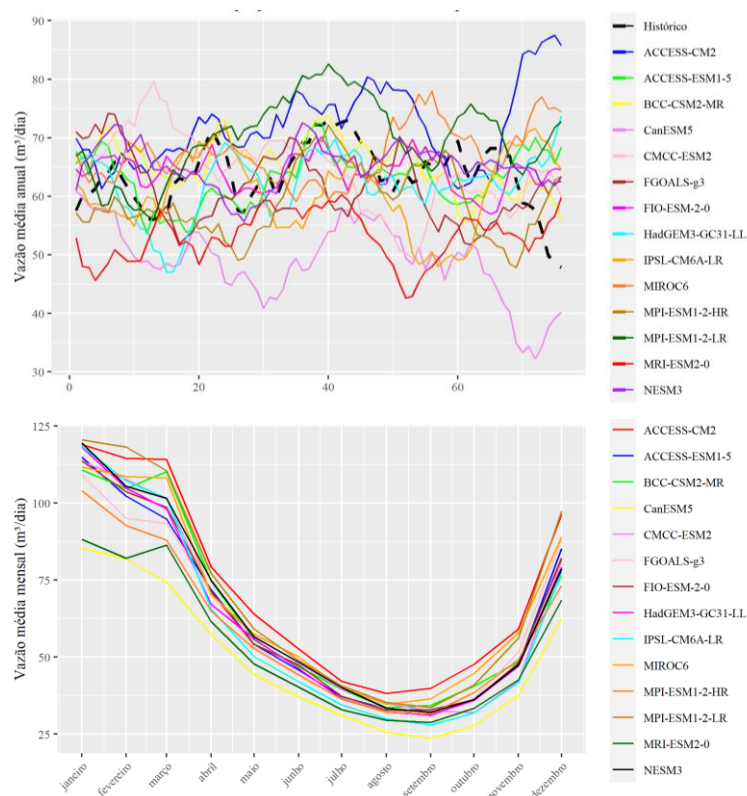
Especificamente em Santa Cecília, pode-se dizer que não houve unanimidade entre os modelos na indicação de aumento ou redução nas vazões incrementais para o século XXI em relação à média histórica (1935-2015), em conformidade com os achados de Silveira & Souza-Filho (2019) ao realizar a mesma análise a partir dos modelos do CMIP5.

Como pode ser observado na Figura 18, no cenário SSP2-4,5 o modelo que apresentou maior incremento de vazão foi o ACCESS-CM2 (bom desempenho), em cerca de 15%, enquanto o modelo que apresentou maior redução foi o CanESM5 (baixo desempenho), em cerca de 25%; seguido pelo modelo MRI-ESM2-0 (desempenho mediano), que aponta redução

de cerca de 15%. Assim como apresentado na avaliação dos modelos, fica evidente a aderência do modelo FIO-ESM2-0 (ótimo desempenho) às vazões históricas.

A variabilidade sazonal da bacia se mantém estável ao longo dos meses, variando em torno de 6,25% em torno da média histórica. A exceção está para o primeiro trimestre do ano, no período do verão, onde a variabilidade é de cerca de 17% em torno da média histórica, mantendo o padrão para os modelos ACCESS-CM2 e CanESM5 como a maior tendência positiva e maior tendência negativa de vazão, respectivamente.

Figura 18 – Vazões incrementais afluentes em Santa Cecília no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

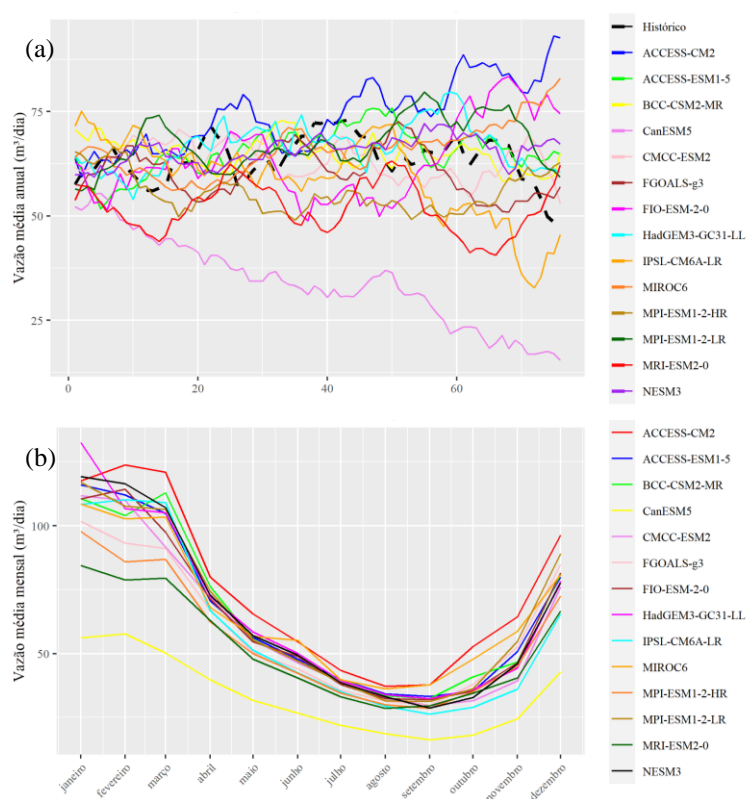
Fonte: O autor, 2022.

Da mesma forma que no cenário tendencioso, no cenário SSP5-8,5 a grande maioria dos modelos apontam tendência central nas vazões incrementais. Os modelos ACCESS-CM2 e CanESM3 apresentam acentuação dos extremos, enquanto os demais modelos se aproximam da média histórica de Santa Cecília, apresentando vazão incremental média de cerca de 67 m³/dia. O modelo ACCESS-CM2 (bom desempenho) aponta aumento de cerca de 15% na

vazão, principalmente a partir da segunda metade do século XXI, enquanto o CanESM3 (baixo desempenho) apresenta redução acentuada de cerca de 50% ao longo do período.

Neste cenário o modelo FIO-ESM2-0 apresenta maior distanciamento da média histórica, apontando redução de vazão para a primeira metade do século XXI e aumento para a segunda metade. Quanto a sazonalidade, o modelo CanESM5 apresenta grande distanciamento dos demais, apresentando uma redução de vazão para todos os meses do ano.

Figura 19 – Vazões incrementais afluentes em Santa Cecília no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2020 e (b) sazonalidade.

Fonte: O autor, 2022.

Nas sub-bacias a jusante de Santa Cecília não houve unanimidade entre os modelos na indicação de aumento ou redução nas vazões incrementais para o cenário SSP2-4,5.

O modelo que apresentou maior incremento de vazão foi o NESM3 (ótimo desempenho) em cerca de 15%, enquanto o modelo que apresentou maior redução foi o CanESM5 (bom desempenho), em quase 50%; seguido pelo modelo MRI-ESM2-0 (bom desempenho) que apontou redução de cerca de 35%. Já para o cenário SSP5-8,5, o CanESM5 apresenta acentuação dos extremos, enquanto os demais modelos se aproximam da média histórica.

7 ANOMALIAS, AVALIAÇÃO DA SECA E GESTÃO DE RISCO

7.1 Considerações sobre as incertezas dos modelos

O caráter aleatório e a variabilidade dos processos naturais, especialmente dos regimes de chuva e de vazão, impõe reconhecido desafio para sua representação conceitual. Por essa razão, a estimação simplificada de fenômenos hidroclimatológicos se dá através de modelos que geralmente trazem consigo determinado grau de incerteza (Tucci et al, 1993; 1998; ANA, 2016; CGEE & WORLD BANK, 2016).

Segundo Estácio, Souza-Filho & Rocha (2019) para modelos hidrológicos algumas das fontes dessa incerteza podem ser a própria forma funcional do modelo, os dados de entrada, as condições de contorno adotadas, as condições iniciais, ou, ainda, os parâmetros do modelo, que buscam representar o comportamento médio de uma bacia.

No caso de modelos hidrológicos conceituais, como o SMAP, séries de precipitação, evapotranspiração ou vazão, observadas ou calculadas, configuram-se como dados de entrada e podem oferecer incertezas provenientes de falhas nos instrumentos de medição, cálculo, ou, até mesmo, da adoção de dados médios ou representativos de determinada região (Estácio, Souza-Filho & Rocha, 2019).

Quando são envolvidos fatores relacionados às mudanças do clima, tem-se ainda a incerteza relacionada às projeções dos MCGs, que nada mais são que uma simplificação de processos físicos não-lineares que também carregam incertezas devido às suas condições iniciais, escala e estrutura (CGEE, 2014; ANA, 2016; 2021; IPCC, 2021). Além disso, cabe ressaltar que os modelos globais geralmente possuem baixa resolução espacial, o que não permite a adequada reprodução de alguns processos físicos em micro ou mesoescala (ANA, 2016).

Dentre as incertezas inerentes à projeção de cenários climáticos, ANA (2016) e GVces, (2016) citam as tendências nas emissões de gases do efeito estufa, concentrações atmosféricas e sumidouros, forçantes provenientes de outros gases, variabilidade natural do clima, forma funcional do modelo, dentre outras.

Outro gerador de incerteza é a não adoção de cenários de uso e ocupação do solo como condição de contorno para o modelo hidrológico adotado. No entanto essa limitação é parcialmente contornada, dado que os padrões de uso do solo são considerados como uma forçante

radiativa nos cenários de mudanças climáticas definidos por O'Neill et al. (2016) e adotados neste trabalho.

Dessa forma, para buscar tendências e considerar as incertezas, a literatura recomenda a utilização de uma abordagem multi-modelo que prevê a utilização dos valores médios ou medianos de um conjunto de modelos (CGEE, 2014; ANA, 2016). Neste caso, o viés de modelos individuais passariam a ser compensados, representando melhor o clima histórico. No entanto, para fins de gestão adaptativa, pode ser mais interessante a identificação de cenários limítrofes aos quais os meios sociais e ambientais precisariam se preparar (CGEE, 2014).

Para uma adequada identificação das incertezas inerentes a todo o processo, cabe ainda uma análise sobre os dados provenientes dos estudos do IPCC.

Pesquisas recentes demonstram que, de forma geral, os modelos do CMIP6 capturam os padrões globais e regionais dos extremos de temperatura e precipitação – inclusive na América do Sul –, com limitadas melhorias quando comparado ao seu antecessor, o CMIP5 (Tokarska et al., 2020; Kim et al., 2021; Almazroui, 2021), sendo que as simulações de precipitação foram melhoradas ao apresentarem redução no viés de tempo seco (Kim et al., 2021). Além disso, Almazroui et al. (2021) identificou que os modelos tendem a concordar mais no final do século do que na metade do século XXI; por essa razão, mudanças identificadas nos padrões de temperatura e precipitação tendem a ficar mais robustas ao final do período.

Tokarska et al. (2020) e Voosen (2021) criticam os resultados do último relatório do IPCC (IPCC-AR6), indicando que os modelos possuem maior viés de aquecimento quando comparado aos modelos do CMIP5.

O primeiro autor explica que um terço dos modelos submetidos ao IPCC-AR6 excedem de 17 a 83% a faixa de aumento da temperatura (de 1,5°C a 4,5°C) identificada no relatório IPCC-AR5 devido ao viés de aumento na temperatura identificada na última década. Como resultado dessa maior sensibilidade climática, projeções futuras passaram a demonstrar tendência média de aquecimento global mais acentuada do que o reportado no relatório IPCC-AR5. Nessa linha, Tokarska et al. (2020) exemplifica a diferença de +0,83°C entre os dados brutos do IPCC-AR5 (CMIP5 RCP8,5) e do IPCC-AR6 (CMIP6 SSP5-8,5) previstos para o aquecimento global ao final do século.

Por sua vez, Voosen (2021) critica o alarmismo¹¹ do último relatório publicado pelo IPCC e dos modelos por ele utilizados. O autor explica que foram identificadas inconsistên-

¹¹ Do inglês: “[...] the climate models that help them [the climate scientists] project the future have grown a little too alarmist.”

cias na forma que os modelos simulam as nuvens, levando a uma tendência de maior aquecimento.

Embora o resultado da avaliação dos modelos tenha apresentado boa correlação quando comparados aos resultados destes com as séries históricas, resta claro que as incertezas estão presentes em todo o processo de representação dos fenômenos hidroclimatológicos aqui descritos, o que leva à consideração de que os resultados devem ser analisados com cautela e em conjunto com a literatura especializada, servindo como balizador (cenários limítrofes) para o desenvolvimento e aplicação de políticas de gestão adaptativa às mudanças do clima.

Cabe lembrar ainda, conforme citado no item 6, que a confiabilidade dos dados apresentados possuem maior ligação com a convergência entre os resultados de cada modelo (anomalias percentuais) do que com a avaliação de seu desempenho em relação à série histórica, o que será discutido no item a seguir.

7.2 Anomalia das vazões naturais

Diante da necessidade de identificação das tendências gerais para as vazões afluentes do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu e da confiabilidade dos resultados dos modelos, este capítulo realiza análise das anomalias percentuais médias para cada um dos modelos e bacias sob estudo.

A Figura 20 apresenta um gráfico *boxplot* com a anomalia percentual média das vazões anuais projetadas pelos modelos do CMIP6 em comparação com a média histórica para dois períodos de 30 anos, sendo 2025-2054 e 2055-2084, no cenário SSP2-4,5 em cada uma das áreas de interesse. Já a Figura 21 demonstra informação similar para o cenário SSP5-8,5 que considera maior valor de forçante radiativa.

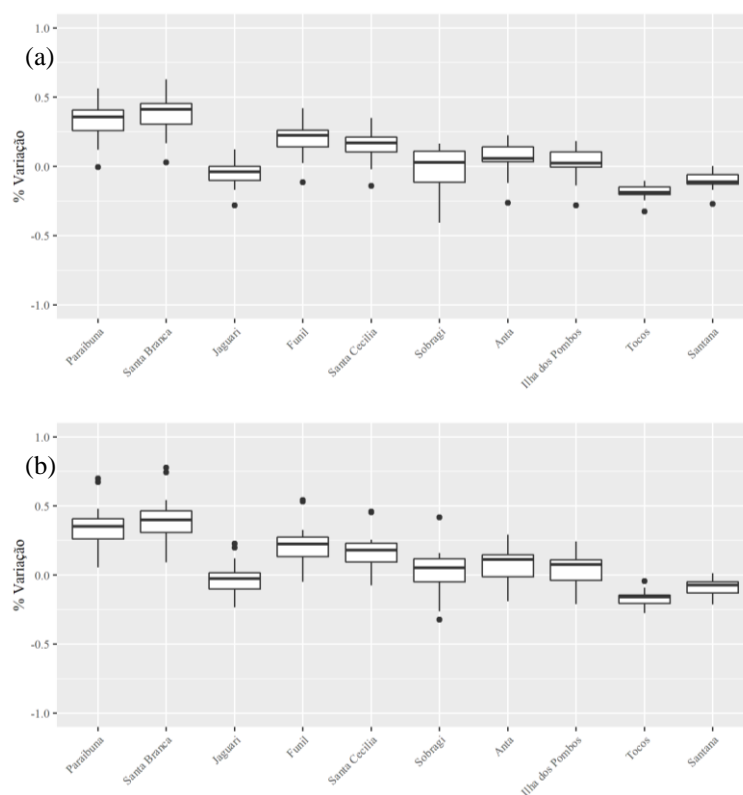
De modo geral, os modelos apresentam maiores variações no segundo período (2055-2084) do cenário SSP5-8,5, indicando maior incerteza nessas condições, conforme tendência identificada por Almazroui et al. (2021). Apesar disso, não há grande variação entre os modelos, indicando que estes explicam de forma satisfatória as condições climatológicas da região.

Os modelos demonstram tendência geral de incremento nas vazões do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu, o que pode ser explicado pelo aumento nas precipitações projetadas, especialmente na porção paulista do Sistema. Outras publicações apresentam tendências similares para a região Sudeste da América do Sul, onde está localizada a Bacia do rio

Paraíba do Sul (GVces, 2016; BRASIL, 2013; IPCC, 2014; ANA, 2016; BRASIL, 2016; Nobre et al., 2017; Silveira & Souza-Filho, 2019; Brêda et al., 2020; Caceres et al., 2021; Almazroui et al., 2021; ANA, 2021; IPCC, 2021).

As análises demonstram que os modelos do CMIP6 concordam sobre um aumento considerável nas vazões naturais das bacias de Paraíba, Santa Branca, Funil e Santa Cecília, variando entre 25 e 40% para as duas primeiras e de 15 a 25% nas duas últimas em ambos os períodos do cenário SSP2-4,5 e no primeiro período do cenário SSP5-8,5. No segundo período (2055-2084) do cenário SSP5-8,5 a variabilidade aumenta, mas os modelos mantêm a concordância sobre o incremento da vazão natural nas bacias supracitadas. Jaguari é a única exceção nas bacias paulistas, dado que os modelos indicam redução na vazão média anual em todos os períodos e cenários, com magnitude de cerca de 10%. Cabe destacar que, apesar de haver maior incerteza em Jaguari para o cenário de maior forçante climatológica, a região também apresenta mediana negativa.

Figura 20 – Anomalia percentual média das vazões anuais do CMIP6 no cenário SSP2-4,5



Legenda: Análise em relação à média histórica na Bacia do rio Paraíba do Sul; períodos de (a) 2025-2054 e (b) 2055-2084.

Fonte: O autor, 2022.

As áreas localizadas na Sub-bacia do rio Pirai, Tócos e Santana, apresentaram projeções de redução nas vazões em todos os períodos e cenários; este fato pode ser explicado pela dimensionalidade das bacias, que podem necessitar de grades com maiores resoluções para explicação de seus fenômenos climatológicos (ANA, 2016).

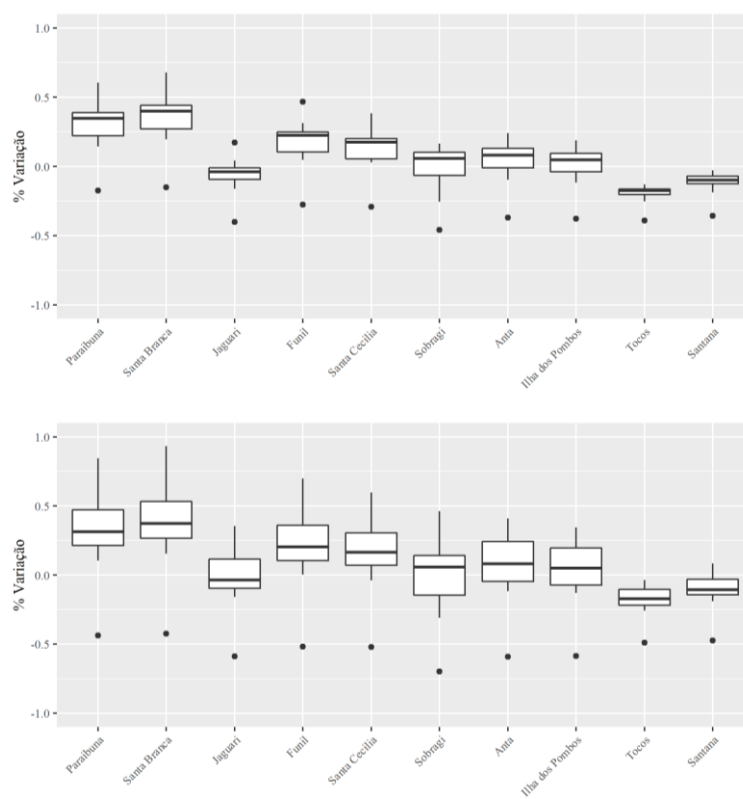
Por sua vez, as sub-bacias a jusante de Santa Cecília (Sobragi, Anta e Ilha dos Pombos) apresentam mediana positiva no cenário SSP2-4,5, indicando aumento nas projeções de vazão quando comparadas com as médias históricas. Já no cenário SSP5-8,5, apesar de apresentarem mediana positiva, parte dos modelos apresentaram variação negativa nas vazões, indicando maior nível de incerteza.

Em complementação a esta análise, no Apêndice D é possível observar as anomalias percentuais médias das vazões anuais para cada uma das bacias em relação à média histórica, em uma comparação entre os modelos do CMIP6.

Especificamente em Santa Cecília é possível notar que os modelos convergem em relação a vazão anual projetada tanto no cenário SSP2-4,5 quanto no cenário SSP5-8,5 (Figura 22). As únicas exceções foram os modelos CanESM5 (baixo desempenho) e MRI-ESM2-0 (desempenho mediano; próximo da normalidade), no cenário SSP2-4,5, e o modelo CanESM5 no cenário SSP5-8,5, que, em geral, tem apresentado projeções mais críticas em termos de redução de vazão.

Os modelos analisados apontam pelo aumento da vazão natural em Santa Cecília, acompanhando a contribuição das bacias de montante. Os modelos ACCESS-CM2 (bom desempenho) e MPI-ESM1-2-LR (ótimo desempenho) apresentaram anomalias nas vazões que podem chegar, respectivamente, a cerca de 35% e 25% de variação ao longo do período de 2025-2054, enquanto os mesmos modelos apresentam uma tendência de aumento nas vazões anuais que ultrapassam os 40% para o período de 2055-2084 no cenário SSP2-4,5. Para o cenário SSP5-8,5 há reforço na tendência, apresentando anomalias de magnitudes ainda superiores, principalmente para o modelo ACCESS-CM2.

Figura 21 – Anomalia percentual média das vazões anuais do CMIP6 no cenário SSP5-8,5



Legenda: Análise em relação à média histórica na Bacia do rio Paraíba do Sul; períodos de (a) 2025-2054 e (b) 2055-2084.

Fonte: O autor, 2022.

Figura 22 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Santa Cecília (continua)

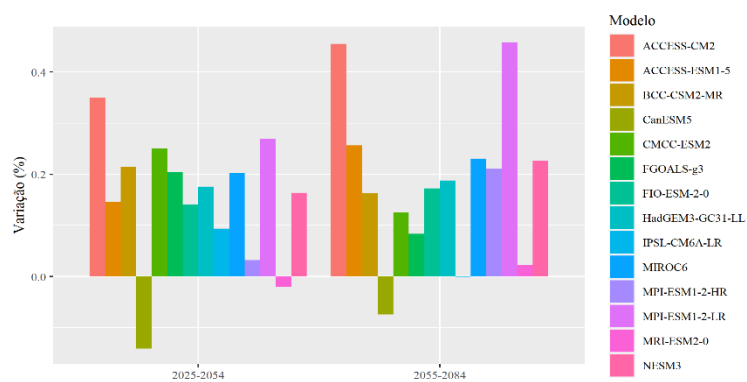
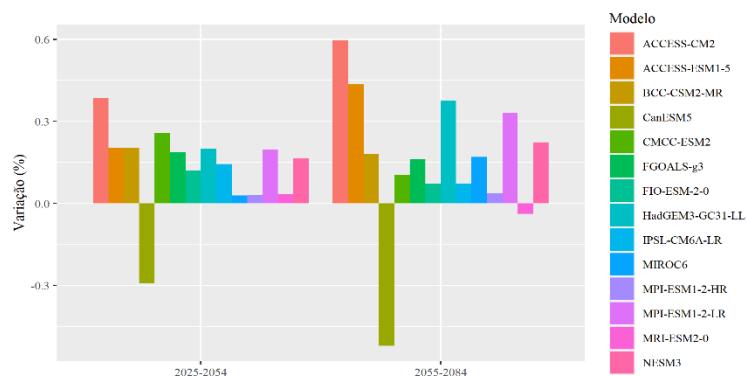


Figura 22 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Santa Cecília (continua)



Legenda: Análise para dois períodos (2025-2054 e 2055-2084) em relação à média histórica nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Fonte: O autor, 2022.

Em resumo, a análise sobre as anomalias percentuais médias das vazões anuais do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu podem ser descritas da seguinte forma:

- no cenário SSP2-4,5 e para o modelo que representa maior confiabilidade dentre as estimações do CMIP6 (FIO-ESM-2-0), a região a montante de Santa Cecília apresenta tendência de aumento das vazões naturais de 25 a 30% em relação à média histórica, proporcionando condição de maior conforto hídrico para a operação da parte alta do Sistema e para o abastecimento da Região Metropolitana do Rio de Janeiro;
- em Jaguari, bacia responsável por contribuir com o Sistema Cantareira através da interligação Jaguari-Atibainha, o modelo FIO-ESM-2-0 (ótimo desempenho) indica redução nas vazões naturais para ambos os períodos com uma anomalia de cerca de 5% em ambos os cenários, SSP2-4,5 e SSP5-8,5;
- para a Sub-bacia do rio Piraí os modelos MPI-ESM1-2-LR e NESM3 (ambos com ótimo desempenho) indicam redução nas vazões naturais para ambos os períodos, com uma anomalia que pode variar em cerca de 5 a 15% no cenário SSP2-4,5 e em até 20% no cenário SSP5-8,5;
- para as sub-bacias a jusante de Santa Cecília, apesar de os modelos apresentarem divergência sobre o futuro das vazões na região, o modelo BCC-CSM2-MR (ótimo desempenho) indica leve aumento (mediana positiva) nas vazões naturais para ambos os períodos com uma anomalia que pode variar em cerca de 6 a 12% tanto no cenário SSP2-4,5 quanto no cenário SSP5-8,5;

- e) o modelo SSP5-8,5 aponta para um futuro com menor disponibilidade hídrica no Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu. No caso dos modelos que apresentaram incremento de vazão no cenário mais conservador, no modelo SSP5-8,5 as tendências de aumento eram amenizadas. Já no caso dos modelos onde foram apresentados decréscimo de vazão no cenário mais conservador, no cenário mais pessimista a tendência será de decréscimo ainda mais acentuado;
- f) de modo geral, dada a convergência da maioria dos modelos em relação ao futuro das vazões nas sub-bacias a jusante de Santa Cecília, é possível considerar que este é um futuro factível para a região;
- g) por fim, tem-se que os modelos do CMIP6 apontam, de uma forma geral, para um futuro mais favorável em termos de volume no escoamento superficial e disponibilidade hídrica; apontando ainda para um maior risco de eventos extremos de precipitação, enchentes e inundações que precisariam ser analisados em estudos específicos.

7.3 Avaliação das secas projetadas para a transposição

Caracterizar as secas consiste na definição de suas características, como magnitude, duração e frequência das ocorrências. Essa caracterização é procedimento fundamental para adoção de medidas proativas e adaptativas acerca do fenômeno.

Nesse sentido, no que tange a precipitação, compreender o comportamento das séries passadas e buscar uma projeção futura para as séries temporais, quantificando a severidade dos eventos, compreende um avanço no processo de gestão adaptativa. Por essa razão, o SPI foi utilizado neste trabalho no intuito de mensurar a duração e a severidade dos eventos extremos projetados para o futuro do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu.

As análises foram realizadas considerando a precipitação observada no período de 1901-2018, além da precipitação projetada pelos modelos do CMIP6 dividida em dois períodos de 30 anos, de 2025-2054 e 2055-84. A análise principal considerou como entrada uma abordagem multi-modelo (CGEE, 2014; ANA, 2016) ao utilizar a média ponderada das precipitações projetadas pelos modelos do CMIP6 de acordo com suas respectivas avaliações, im-

plicando um menor peso para os modelos considerados como de menor capacidade representativa das características da região.

A avaliação das secas foi realizada sobre as sub-bacias a montante da elevatória de Santa Cecília, visando identificar as características do fenômeno a que estão submetidos o Sistema e a Região Metropolitana do Rio de Janeiro, que depende fortemente desta transposição para abastecimento humano, geração de energia, uso industrial, entre outros.

Da

Figura 23 a Figura 25 são apresentados os gráficos de SPI3, SPI6 e SPI12 para a região de montante de Santa Cecília, além dos histogramas de duração e severidade para os dois períodos analisados e nos cenários SSP2-4,5 e SSP5-8,5.

As séries calculadas de SPI3 observado e futuro estão apresentadas na

Figura 23, representando as secas meteorológicas. Para o cenário SSP2-4,5 é possível inferir que a série futura apresenta maior valor médio de SPI3 em relação ao observado (-0,08 em relação a -0,15 da observada) tanto no primeiro período quanto para o segundo período. Já para o cenário SSP5-8,5 a série futura apresenta menor valor médio de SPI3 em relação ao cenário anterior (-0,13 em relação a -0,08 do cenário SSP2-4,5), mas mantém-se superior ao apresentado no período histórico (-0,13 em relação a -0,15). Estes resultados indicam redução na tendência futura de eventos de seca meteorológica.

De modo geral, os valores de SPI3 excederam a condição extrema (limite igual a -2,0) em diversos anos da série de precipitações observadas (1901-2018), sendo a mais severa observada no ano de 1991 (superando SPI de -4,0), seguido pelos anos de 1962, 1931 e 2015, sendo este último o período da crise hídrica ocorrida entre os anos de 2014-2016 (SPI de aproximadamente -2,50, situação de seca extrema). Quanto a projeção futura no cenário SSP2-4,5, é possível observar menor valor de SPI, em aproximadamente -1,35 (seca severa), no primeiro período (2025-2054), próximo ao ano de 2032, e de aproximadamente -1,20 (seca severa) no segundo período (2055-2084), próximo ao ano 2074. Para o cenário SSP5-8,5 reduz-se a intensidade e a duração das secas observadas quando comparado ao cenário SSP2-4,5.

Ainda na

Figura 23 é apresentada a distribuição de frequências das durações e severidades da seca para os eventos passados e projeções futuras, onde a série de precipitações futuras apresentou secas meteorológicas consideravelmente menos severas e duradouras em relação a observada.

Figura 23 – Avaliação da seca com SPI3 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 (continua)

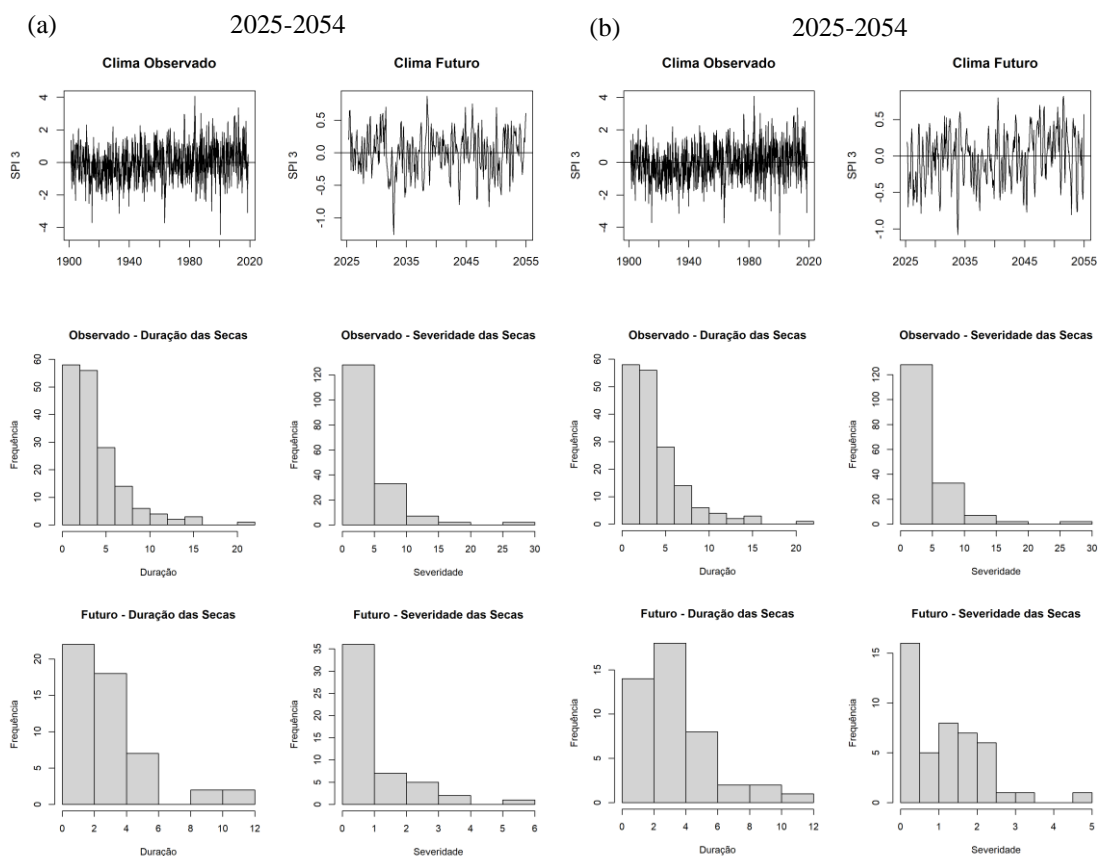
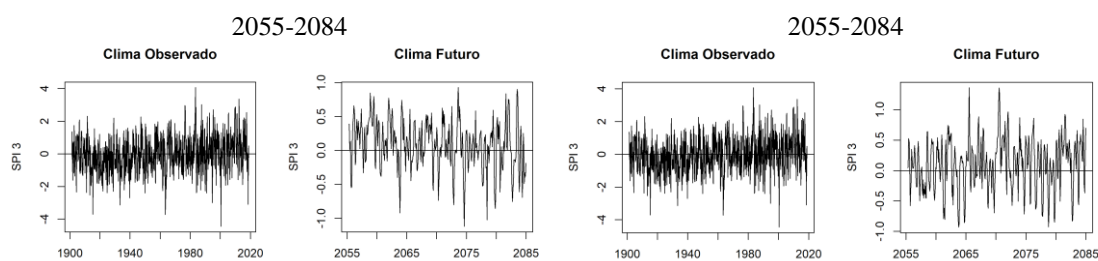
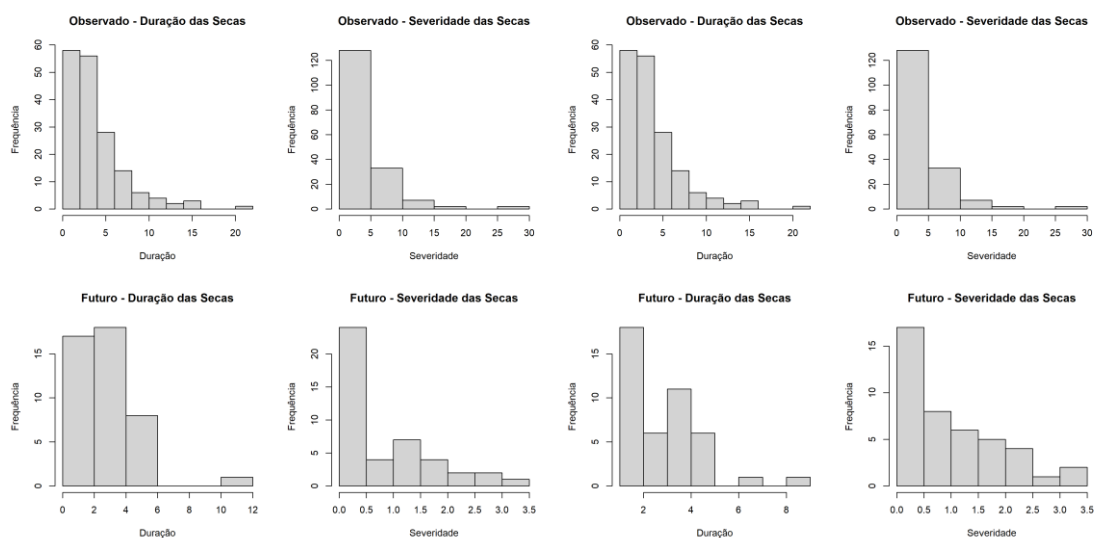


Figura 23 – Avaliação da seca com SPI3 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 (continua)





Legenda: Análise em relação à precipitação histórica (1901-2018) nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5

Fonte: O autor, 2022.

As séries calculadas de SPI6 observado e futuro estão apresentadas na Figura 24. Para o cenário SSP2-4,5 é possível inferir que a série apresenta maior valor médio de SPI6 (-0,10 em relação a -0,20 da observada) tanto no primeiro período quanto no segundo período. Já para o cenário SSP5-8,5 a série futura apresenta menor valor médio de SPI6 em relação ao cenário anterior (-0,12 em relação a -0,10 do cenário SSP2-4,5), mas mantém-se superior ao apresentado no período histórico (-0,12 em relação a -0,20). Estes resultados indicam redução na tendência futura na ocorrência de eventos de seca em relação ao período observado.

É possível observar menor valor de SPI6, em aproximadamente -1,10 (seca severa), no primeiro período (2025-2054) para o cenário mais conservador, próximo ao ano de 2032, e de aproximadamente -0,74 (seca moderada) no segundo período (2055-2084), próximo do ano 2074. Para o cenário SSP5-8,5 reduz-se a severidade das secas observadas no cenário SSP2-4,5, mas a duração das secas tende a aumentar neste segundo cenário.

Ainda na Figura 24 é apresentada a distribuição de frequências das durações e severidades da seca para os eventos passados e projeções futuras, onde a série de precipitações futuras apresentou secas de menor severidade e duração para o SPI6 em relação a observada. A única exceção está para o primeiro período do cenário SSP5-8,5, onde podem ser identificados eventos de seca que igualam o observado.

Figura 24 – Avaliação da seca com SPI6 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 (continua)

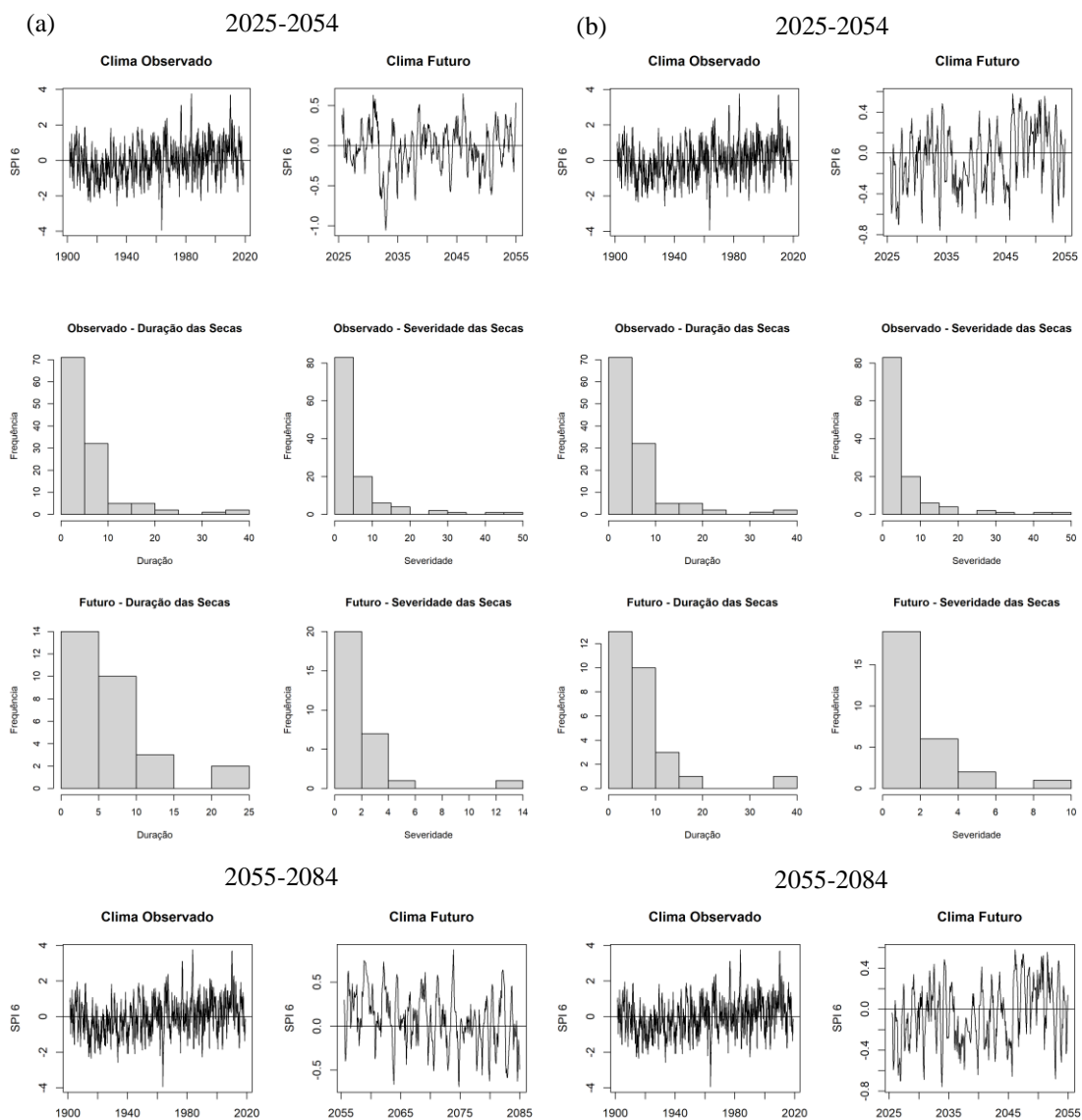
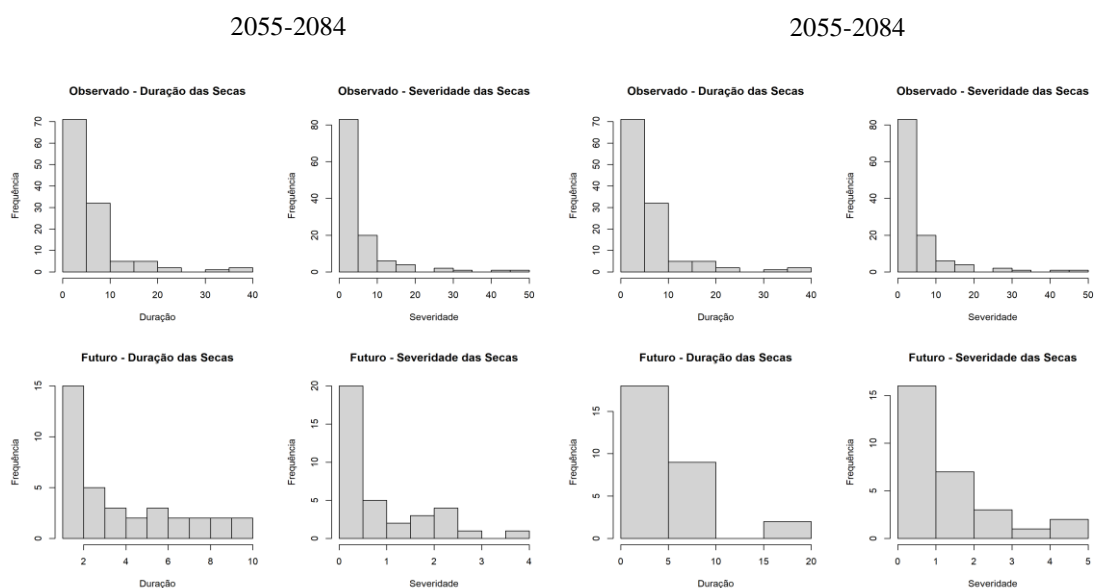


Figura 24 – Avaliação da seca com SPI6 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 (continua)



Legenda: Análise em relação à precipitação histórica (1901-2018) nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Fonte: elaborado pelo autor

Por fim, as séries calculadas de SPI12 observado e futuro estão apresentadas na Figura 25, representando as secas hidrológicas. Para o cenário SSP2-4,5 é possível identificar maior valor médio de SPI12 quando comparado ao observado (-0,09 em relação a -0,27 da observada) no primeiro período; já no segundo período há um aumento nessa diferença, mas mantém-se o valor médio do SPI12 superior para a série futura (0,06 em relação a -0,27 da observada).

Já para o cenário SSP5-8,5 a série apresenta menor valor médio de SPI12 em relação ao cenário anterior (-0,15 em relação a -0,09 do cenário SSP2-4,5), mas mantém-se superior ao apresentado no período histórico (-0,15 em relação a -0,27). Estes resultados indicam redução na tendência futura de eventos de seca em relação ao período observado; entre cenários, fica claro que o cenário SSP5-8,5 apresenta maior propensão a eventos de seca hidrológica.

Quanto a projeção futura no cenário SSP2-4,5, é possível observar menor valor de SPI12 em aproximadamente -0,93 (seca moderada) no primeiro período (2025-2054), próximo ao ano de 2032 e com duração de aproximadamente 3 anos (2031-2033), representando o rebatimento da seca meteorológica aferida pelos SPI3 e SPI6, e de aproximadamente -0,55 (seca moderada) ao final do segundo período (2055-2084), próximo ao ano de 2083. Para o cenário SSP5-8,5 aumenta-se a intensidade e a duração das secas em relação às projetadas pelo cenário SSP2-4,5.

Na Figura 25 é apresentada a distribuição de frequências das durações e severidades da seca para os eventos passados e projeções futuras, onde a série de precipitações futuras

apresentou secas hidrológicas de menor severidade e duração para o SPI12 em relação ao período observado.

Figura 25 – Avaliação da seca com SPI12 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 (continua)

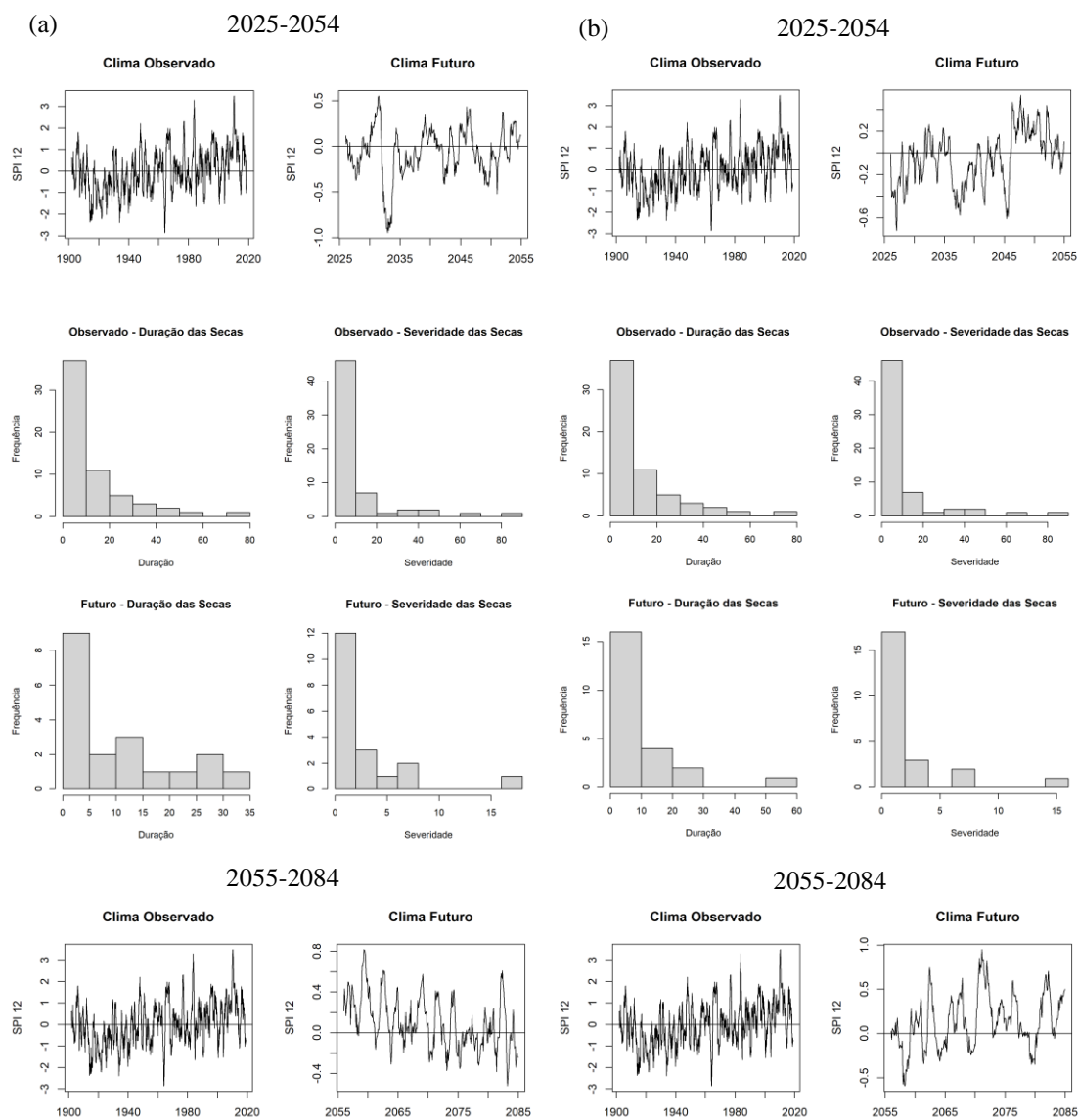
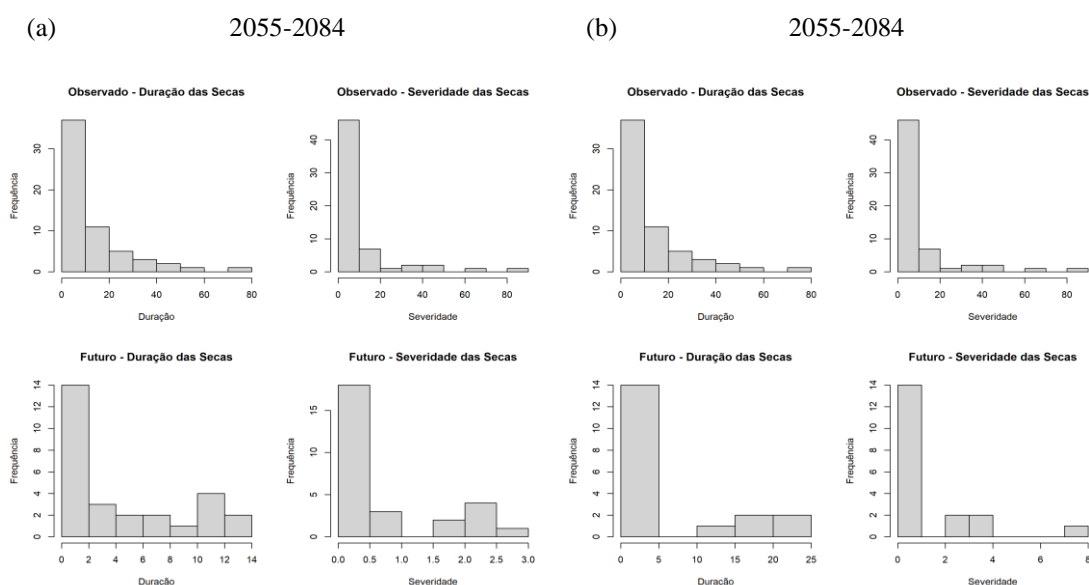


Figura 25 – Avaliação da seca com SPI12 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 (continua)



Legenda: Análise em relação à precipitação histórica (1901-2018) nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Fonte: O autor, 2022.

Em comparação, é possível observar que as projeções futuras tendem a identificar secas hidrológicas menos frequentes e menos intensas quando comparadas aos dados observados.

A redução da intensidade dos eventos de seca observadas pelos SPI3 e SPI6 (seca meteorológica) apresentam rebatimento nos resultados do SPI12 (seca hidrológica), demonstrando menor propensão à eventos extremos de seca ao longo dos próximos anos. Ainda assim, é possível observar períodos excepcionalmente secos, como o identificado entre os anos de 2035-2040 em ambos cenários.

Além destas análises, no Apêndice E, da Figura 102 a Figura 116, são apresentadas as avaliações das secas para os modelos que obtiveram desempenho alto (FIO-ESM2-0), mediano (HadGEM3-GC31-LL) e baixo (MIROC6) em relação aos demais modelos na representação das condições climatológicas da região. São apresentadas ainda as avaliações das secas para os modelos que apresentam condições extremas de precipitação (ACCESS-CM2, maior índice pluviométrico; e CanESM5, menor índice pluviométrico).

De modo geral, todos os modelos concordam sobre a redução na severidade e na duração das secas em ambos cenários e períodos em relação aos dados observados. A única exceção está para o modelo CanESM5 (baixo desempenho) que, conforme já citado, apresentou aumento significativo na severidade e na duração das secas. No entanto este modelo foi fra-

camente avaliado para as bacias de montante de Santa Cecília, com avaliação média de 41,20%, demonstrando baixa capacidade em representar os eventos climatológicos da região.

7.4 Considerações sobre gestão de riscos

A literatura ressalta que a gestão de riscos climáticos deve possuir uma abordagem proativa e adaptativa visando o planejamento e o alcance de metas de curto, médio e longo prazo para manutenção da segurança hídrica, contando com etapas de preparação, resposta, recuperação e transformação (por exemplo, Wilhite et al., 2000; González & Morcillo, 2007; Marcelino, 2008; Sayers et al., 2016; De Nys et al., 2016; Souza-Filho et al., 2019).

As metas e ações planejadas devem trazer um leque de possíveis soluções a serem implementadas para o alcance desse objetivo, dentre elas: regras para operação de sistemas hídricos, mecanismos de alocação de água, redundâncias, esforços para melhoria da comunicação e do tempo de resposta, dentre outros (Wilhite et al., 2000; González & Morcillo, 2007; Marcelino, 2008; Sayers et al., 2016; Formiga-Johnsson et al., 2019; Silveira & Souza-Filho, 2019).

No Brasil, o Plano Nacional de Adaptação à Mudança no Clima - PNA, do Governo Federal, (BRASIL, 2016), é o instrumento orientativo para iniciativas de gestão e mitigação do risco climático no longo prazo – até 2040, através de ações coordenadas e implementação de diferentes estratégias setoriais ou temáticas. Dessa forma, o documento ocupa lugar na fase preparatória de gestão de riscos, conforme definição de Sayers et al. (2016).

O Relatório Final do 1º Ciclo de Monitoramento e Avaliação do Plano Nacional de Adaptação (2016-2020), relata um conjunto de medidas de adaptação implementadas e sugeridas, além de medidas de não-arrependimento (“*no regrets*¹²”) realizadas ao longo dos últimos quatro anos. Para o setor de recursos hídricos, o relatório relata que os principais avanços foram o lançamento do Plano Nacional de Segurança Hídrica - PNSH (ANA, 2019), que orienta investimentos de R\$ 27,6 bilhões até 2035 em infraestruturas que reduzam os impactos nas secas e cheias, e o novo papel atribuído a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.

¹² “[...] são aquelas dirigidas à solução de problemas associados à variabilidade climática existente enquanto, ao mesmo tempo, aumentam a resiliência aos possíveis impactos da mudança climática. Ou seja, enfrentando-se os problemas atuais, aumentar-se-á a capacidade da sociedade e da economia de lidar com as alterações esperadas. Os benefícios das medidas “sem arrependimento” serão percebidos independentemente do grau de mudança climática.”, (ANA, 2016).

co - ANA, que passou, a partir de 2020, a regular o setor de saneamento, com papel fundamental no controle da demanda e na qualidade ambiental (BRASIL, 2020).

É possível notar que nesses primeiros quatro anos, o PNA se desenvolveu no sentido de inserir a adaptação às mudanças climáticas nas políticas públicas e no planejamento governamental, assim como relatado por atores envolvidos no processo (BRASIL, 2020). No entanto, apesar de mencionado como um dos principais avanços do setor, o chamado Novo Marco do Saneamento (Lei Federal nº 14.026/2020) sequer menciona a adaptação às mudanças no clima em seu texto, posicionando-se no sentido de controle de perdas na distribuição de água tratada e no estímulo à racionalização de consumo dos usuários; ambos sem metas explícitas.

Uma vez que os impactos das mudanças do clima acontecem em escala local, as medidas de enfrentamento precisam ser implementadas em ações coordenadas, envolvendo as três esferas de governo e atores fundamentais. Em nível de bacia hidrográfica, os planos de recursos hídricos têm grande potencial para desenvolver a capacidade adaptativa de sistemas hídricos. Diante de cenários incertos é premente que estes apresentem medidas e ações de adaptação que busquem reduzir vulnerabilidades e riscos (eg. falta ou excesso de água) em sua área de atuação (ANA, 2016).

Contudo, na Bacia do rio Paraíba do Sul, por exemplo, o Plano Integrado de Recursos Hídricos - PIRH-PS, atualizado no ano de 2021, não apresenta detalhamento sobre os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade nem na demanda hídrica. O prognóstico desenvolvido considera apenas cenarizações da dinâmica econômica e populacional, quando referente à demanda hídrica, bem como séries históricas de vazões, quando se refere à disponibilidade. No entanto o Manual Operativo do Plano - MOP conta com ações que visam a elaboração de um Plano de Gerenciamento de Riscos e ainda uma contratação para refinamento das disponibilidades hídricas da bacia considerando os impactos das mudanças no clima (CEIVAP, 2020).

O mesmo ocorre no Plano Estratégico de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim - PERH Guandu/RJ, aprovado em 2018. O plano realizou estudos que apresentam tendências gerais de mudanças nos regimes de chuva e na temperatura baseadas em dados históricos, mas não as relacionam à cenarização de disponibilidades e demandas hídricas futuras. Por sua vez, o MOP do Guandu/RJ conta apenas com ações de cunho institucional, visando a construção de um pacto de gestão para a segurança hídrica no Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu (GUANDU, 2018).

Considerando a importância desse Sistema para o abastecimento de um grande número de habitantes e setores produtivos, nota-se que há muito o que aprimorar e desenvolver quando o assunto é adaptação e gestão de riscos. Vislumbrando este aprimoramento, a ANA (2016) recomenda que os planos de recursos hídricos devem sinalizar os efeitos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica futura, devendo elencar quais serão as diretrizes de atuação diante dessas novas condições. No limite, orienta que medidas para o enfrentamento e mitigação de eventos extremos poderão ser objeto de estudos específicos, como previsto no Plano de Recursos Hídricos da Bacia do rio Paraíba do Sul.

Cabe ressaltar ainda que instrumentos de planejamento e adaptação, como o Plano Nacional de Segurança Hídrica - PNSH (ANA, 2019) e o ATLAS AGUÁS (ANA, 2021), ainda não fazem uso de modelos climáticos globais, como os do CMIP, para a caracterização de aspectos relacionados às mudanças no clima. Ao contrário do realizado neste trabalho, estes estudos optaram por utilizar séries de dados históricos para simular o impacto futuro das mudanças climáticas devido às incertezas inerentes aos modelos globais.

Não obstante, ainda que utilizadas séries históricas como forma de representar o regime futuro, a variabilidade natural do clima, tanto passado quanto futuro, se mantém presente como fator de incerteza e é por essa razão que para o adequado planejamento e implementação de ações de gestão adaptativa, é positivo que o gestor tenha em mãos um conjunto de cenários que possibilitem pensar ações de preparação, adaptação e resposta às mais variadas situações.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi realizado com o objetivo geral de identificar tendências de variação da vazão natural afluyente do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu em face às mudanças climáticas globais e, em especial, das vazões ofertadas para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro - RMRJ e demais usuários do rio Guandu, através da transposição do rio Paraíba do Sul em Santa Cecília.

Além do objetivo geral também foram propostos os seguintes objetivos específicos: (a) avaliar o desempenho dos modelos climáticos na representação das séries históricas através de índices estatísticos; (b) apresentar a projeção hidroclimatológica da região para o século XXI de acordo com os cenários de forçantes definidos pelo IPCC; (c) analisar as anomalias futuras das vazões naturais afluentes aos reservatórios do Sistema Hidráulico de acordo com os modelos climáticos do CMIP6 e cenários acima mencionados; e (d) desenvolver análise das secas futuras, considerando as bacias a jusante da usina elevatória de Santa Cecília, quanto à frequência e intensidade dos eventos em relação ao período histórico.

A metodologia de pesquisa foi construída em 9 etapas, sendo elas: (1) definição dos cenários e coleta de dados; (2) *downscaling* estatístico; (3) correção de viés; (4) cálculo da evapotranspiração; (5) calibração do modelo hidrológico; (6) simulação hidrológica; (7) avaliação dos modelos climáticos; (8) avaliação das secas; e (9) panorama da gestão adaptativa na região. O Capítulo 4 apresenta, em detalhes, os procedimentos de cada uma dessas etapas, de modo a facilitar a sua aplicação em sistemas hidráulicos de outras bacias hidrográficas.

Em relação à avaliação dos modelos climáticos, conclui-se que os modelos globais do CMIP6 apresentam correlações suficientemente elevadas em relação à climatologia observada no período histórico para o Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu, demonstrando que esses modelos foram capazes de captar as variações sazonais e interanuais da região. Com isso, apesar de incertezas intrínsecas à variabilidade do clima, os modelos podem ser considerados como uma boa opção para a investigação dos efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos na Bacia.

A avaliação geral apontou que as melhores simulações do clima para a região de Santa Cecília e montante se referem ao modelo FIO-ESM-2-0, enquanto as piores simulações se referem ao modelo MIROC6. Com a avaliação dos demais modelos, fica aqui estabelecida

uma margem de possíveis cenários de variabilidade climática para a região do Paraíba do Sul que deve ser usada para adoção de políticas públicas e gestão adaptativa.

Em relação a apresentação dos dados climatológicos para o século XXI, o item 6.2 apresentou as projeções de acordo com os cenários definidos.

Os resultados mostram o quão complexo e variável é o comportamento hidroclimático da região: quanto às projeções de temperatura, observa-se que todos os modelos do CMIP6 concordam quanto à tendência de aumento, variando apenas em magnitude. Em média a temperatura poderá aumentar em 1,5°C ($\pm 0,25$), ao considerar o cenário SSP2-4,5, e em até 3,2°C ($\pm 0,5$) no cenário SSP5-8,5; já em relação à precipitação, é possível observar que os modelos do CMIP6 divergem em relação à tendência futura e à magnitude das alterações a depender da bacia; nota-se que o modelo ACCESS-CM2 tende a superestimar as taxas de precipitação, enquanto o modelo CanESM5 tende a subestimá-las.

Em relação à análise das projeções futuras de vazão, os modelos apontam tendência de aumento na vazão incremental para as sub-bacias localizadas a montante de Santa Cecília (partes alta e média da Bacia do rio Paraíba do Sul) ao longo do século XXI em comparação à média histórica. Esta tendência é devida ao significativo aumento projetado para as taxas de precipitação da região para a maioria dos modelos. A convergência entre a maioria dos modelos, apontando por um incremento nas vazões afluentes nas sub-bacias a montante de Santa Cecília indicam que este é um futuro factível para a região.

Especificamente em Santa Cecília e para as sub-bacias a jusante, pode-se dizer que não houve unanimidade entre os modelos na indicação de aumento ou redução nas vazões incrementais para o século XXI em relação à média histórica.

Apesar de os modelos divergirem em relação ao futuro das vazões a montante e a jusante, a análise sobre as anomalias de vazão do Sistema aponta tendência significativa de aumento nas vazões para as sub-bacias a montante de Santa Cecília (de 25 a 30%), com exceção da Sub-bacia do rio para Jaguari (SP), que apresentou leve tendência de redução das vazões. Esta análise aponta ainda leve tendência de aumento de vazão para as sub-bacias de jusante (de 6 a 12%), exceto para a Sub-bacia do rio Piraí (RJ), que apresentou tendência de redução nas vazões em ambos os cenários.

Em relação à avaliação das secas para Santa Cecília, ponto central do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu, é possível observar que as projeções futuras tendem a identificar secas menos frequentes e menos intensas quando comparadas aos dados observados. De modo geral, os modelos concordam sobre a redução da severidade e da duração das secas em

ambos os cenários e períodos em relação aos dados observados. A única exceção está para o modelo CanESM5 que apresentou aumento significativo da severidade e da duração das secas. No entanto este modelo foi fracamente avaliado para as sub-bacias a montante de Santa Cecília, com avaliação média de 41,2%, demonstrando baixa capacidade em representar os eventos climatológicos da região.

Por fim, conclui-se que os modelos do CMIP6 apontam, de forma geral, para um futuro mais favorável em termos de escoamento superficial e disponibilidade hídrica; apontando ainda para a possibilidade de que eventos de cheia, enchentes e inundações sejam mais frequentes, no entanto, esta análise deve ser direcionada em trabalhos específicos. Ainda assim, é possível observar períodos excepcionalmente secos que podem impactar as vazões do rio Paraíba do Sul, em Santa Cecília, e que devem estar no radar de gestores da região, como o identificado entre os anos de 2035-2040 em ambos os cenários.

Ainda que haja aumento na disponibilidade hídrica, ainda é possível que a região apresente déficit de balanço hídrico quando consideradas as demandas dos múltiplos usos e, por essa razão, análises futuras devem considerar ainda as variações na demanda por água em decorrência das mudanças climáticas e crescimento urbano. Nesses casos, com o intuito de evitar conflitos entre usuários, a cenarização do balanço hídrico e medidas de alocação de água condicionadas aos fatores climáticos ou níveis de escassez poderiam aprimorar a gestão adaptativa na região, principalmente se previstos nos Planos de Recursos Hídricos que abrangem a bacia, sejam eles planos interfederativos ou planos de suas bacias afluentes.

Como exemplo recente, a Resolução Conjunta ANA/DAEE nº 925, de 29 de maio de 2017, definiu condições de operação para um conjunto de reservatórios do Sistema Cantareira, na Bacia do rio Piracicaba (SP), a respeito das captações realizadas pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP para o abastecimento humano da Região Metropolitana de São Paulo - RMSP. Com isso, a operação do Sistema passou a incorporar as condições de reservação e os períodos hidrológicos (úmido e seco), estabelecendo critérios para a captação da Companhia baseados em faixas de volume útil acumulado, de modo a buscar o atendimento aos usos múltiplos. Diante dessa experiência, mecanismos similares poderiam vir a ser utilizados na operação do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul - Guandu, envolvendo ainda as captações realizadas para o abastecimento da Região Metropolitana do Rio de Janeiro – RMRJ e aspectos relacionados à variabilidade climática.

Do ponto de vista da modelagem, recomenda-se que trabalhos futuros façam a utilização de outras técnicas de *downscaling*, como o dinâmico ou ainda outras técnicas estatísticas,

para identificação dos possíveis ganhos trazidos por outras ferramentas. Além disso, cabe ainda a aplicação de modelos regionalizados para a América do Sul, como os modelos Eta e BESM, ambos desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, como forma de material comparativo aos produzidos nesse trabalho para a Bacia do rio Paraíba do Sul.

Não menos importante, dados os cenários prováveis de aumento nos índices pluviométricos e aumento na vazão, torna-se ainda mais pertinente a realização de estudos que realizem a modelagem de cheias e inundações, focando, principalmente, no trecho menos regularizado da Bacia do rio Paraíba do Sul, nas Sub-bacias mineiras dos rios Pomba e Muriaé e na Sub-bacia fluminense do Baixo Paraíba do Sul e Itabapoana, que, dada esta características, apresentam maior grau de vulnerabilidade em relação às variações de vazão.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Conjuntura dos recursos hídricos 2014: encarte especial sobre a crise hídrica*, 31 p. Ministério do Meio Ambiente, Brasília/DF, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Avaliações e diretrizes para adaptação. Mudanças climáticas e recursos hídricos.*, Ministério do Meio Ambiente, Brasília/DF, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Resolução nº 1.931 de 30 de outubro de 2017, Documento nº 00000.071669/2017-32*, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Conjuntura dos recursos hídricos 2019: informe anual*, 100 p. Ministério do Desenvolvimento Regional, Brasília/DF, 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Manual de usos consuntivos da água no Brasil*, 75 p. Ministério do Desenvolvimento Regional. Brasília/DF, 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Plano nacional de segurança hídrica*, 112 p. Ministério do Desenvolvimento Regional, Brasília/DF, 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) – Paraíba do Sul*. Ministério do Desenvolvimento Regional. Brasília/DF. 75p, 2021. Disponível em: < https://www.ana.gov.br/sar/sin/sistema-interligado-nacional/sin/b_paraiba-do-sul >. Acessado em maio de 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano*. Ministério do Desenvolvimento Regional, Brasília/DF, 2021.
- AGHAKOUCHAK, A., MIRCHI, A., MADANI, K., DI BALDASSARRE, G., NAZEMI, A., ALBORZI, A. [et al] . *Anthropogenic drought: definition, challenges, and opportunities*. Reviews of Geophysics, 59, e2019RG000683. <https://doi.org/10.1029/2019RG000683>, 23 p., 2021.
- ALLEN, M.R.; O.P. DUBE, W.; SOLECKI, F.; ARAGÓN-DURAND, W.; CRAMER, S.; HUMPHREYS, M.; KAINUMA, J.; KALA, N.; MAHOWALD, Y.; MULUGETTA, R.; PEREZ, M.; *Global warming of 1.5°C. an IPCC Special report on the impacts of global warm-*

ing of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, 2018.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. *Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper, 297 p. Roma/Itália, 1998.

ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M. N. [et al]. *Assessment of CMIP6: performance and projected temperature and precipitation changes over South America*. Earth Systems and Environment 5, p. 155–183, 2021.

ARAÚJO, L. M.; OLIVEIRA-SILVA, S. M.; SOUZA-FILHO, F. A.; LOPES, T. M. X. M. *Plano proativo de seca: base conceitual*. ADAPTA: gestão adaptativa do risco climático de seca, p. 773. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza/CE, 2019.

ARAÚJO, L. M.; SOUZA-FILHO, F.A.; VASCONCELOS, F. C. *Análise das secas no sistema Jaguaribe-Metropolitano*. ADAPTA: gestão adaptativa do risco climático de seca, p. 803. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza/CE, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR ISO 31.000:2018 – Gestão de Riscos – Diretrizes*, 17 p. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

BENEVIDES, J. L. N. *Planejamento da segurança hídrica em cenário de mudança climática considerando avaliação de custos de múltiplos mananciais*. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2020.

BERAN, M. A.; RODIER, J. A. *Hydrological aspects of drought*. International Hydrological Programme; WMO, Geneva/Suíça, 1985.

BLOCK, P.J., S.F. ASSIS, F., SUN, L., KWON, H. *A Streamflow forecasting framework using multiple climate and hydrological models*. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 45(4): p. 828-843, 2009.

BRASIL, *Lei Federal nº 10.881 de 9 de junho de 2004: Dispõe sobre os contratos de gestão entre a Agência Nacional de Águas e entidades delegatárias das funções de agências de águas relativas à gestão de recursos hídricos de domínio da União e dá outras providências*, 2004.

BRASIL, *Lei Federal nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997: institui a política nacional de recursos hídricos, cria o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos, [...]*, 1997.

BRASIL. *Plano nacional de adaptação à mudança do clima, Volume I: estratégia geral*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília/DF, 2016.

BREDA, J. P. L. F.; PAICA, R. C. D.; COLLISCHON, W. [et al]. *Climate change impacts on South American waterbalance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections*. Climatic Change 159, p. 503–522, 2020.

CACERES, A. L.; JARAMILLO, P.; MATTHEWS, H. S.; SAMARAS, C.; NIJSSEN, B. *Hydropower under climate uncertainty: Characterizing the usable capacity of Brazilian, Colombian and Peruvian power plants under climate scenarios*. Energy for Sustainable Development 61, p. 217–229, 2021.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE DA FGV. *Diagnóstico preliminar das principais informações sobre projeções climáticas e socioeconômicas, impactos e vulnerabilidades disponíveis em trabalhos e projetos dos atores mapeados*. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, 2016.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE DA FGV. *Planejamento público em adaptação à mudança do clima: Principais conceitos e aprendizados a partir de experiências internacionais*. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, p. 69, 2016.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS & WORLD BANK. *Secas no Brasil: política e gestão proativas*. CGEE – Banco Mundial, Brasília/DF, 2016.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Estudos relativos às mudanças climáticas e recursos hídricos para embasar o plano nacional de adaptação às mudanças climáticas*. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Fortaleza/CE, 2014.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). *Complementação e finalização do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul - PIRH-PS e elaboração dos planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas afluentes*. Produto Parcial 02: Consolidação do diagnóstico e prognóstico e versão preliminar do banco de dados. Resende/RJ. Tomo I – 347 p., 2018.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). *Complementação e finalização do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul - PIRH-PS e elaboração dos planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas afluentes*. Produto Parcial 02: Consolidação do diagnóstico e prognóstico e versão preliminar do banco de dados. Resende/RJ. Tomo I – 476 p., 2018.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). *Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do*

Sul e Planos de Ação de Recursos Hídricos das Bacias Afluentes, 2014. Disponível em <<https://www.ceivap.org.br/instrumentos-de-gestao/plano-de-recursos-hidricos>>. Acessado em abril de 2021.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). *Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, 2021*. Disponível em <<https://www.ceivap.org.br/instrumentos-de-gestao/plano-de-recursos-hidricos>>. Acessado em junho de 2022.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). Relatório de situação da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul: informe anual 2019. Resende/RJ. 171p, 2019. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/conteudo/relsituacao2019.pdf>>. Acessado em outubro de 2020.

COMITÊ GUANDU. *Plano de contingência para abastecimento de água (GUANDU): relatório final (produto P6), Resumo Executivo*. Comitê de Bacia Hidrográfica do Guandu - CBH Guandu, Seropédica/RJ, 2015.

COMITÊ GUANDU. *Plano estratégico de recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim*. Diagnóstico – Tomo I. 567 p., 2018a.

COMITÊ GUANDU. *Plano estratégico de recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim*. Diagnóstico – Tomo II. 527 p., 2018a.

COSTA, L. F.; FARIAS JUNIOR, J. E. F.; FORMIGA-JOHNSSON, R. M.; ACSERALD, M.V. *Crise hídrica na Bacia do rio Paraíba do Sul: enfrentando a pior estiagem dos últimos 85 anos*. Revista Ineana, v. 3, n. 1, p. 26-47, 2015.

DE NYS, E., ENGLE, N. AND MAGALHÃES, A.R. (2016). *Drought in Brazil: Proactive Management and Policy*. Boca Raton, USA: CRC Press, 230 p.

ESCADA, P.; COELHO, C. A. S.; TADDEI, R.; DESSAI, S. [et al]. *Climate services in Brazil: past, present, and future perspectives*. Climate Services 24 100276, 2021.

EYRING, V., BONY, S. [et al]. *Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization*. 2016. Geosci. Model Dev., 9, 1937–1958, 2016.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A B.; PAZ, R. L.; AMORIM, A. O.; CARDOSO, A S. *Índices para a quantificação da seca*. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás/GO, 2009.

FERNANDES, R. O.; SILVEIRA, C. S.; STUDART, T. M. C.; SOUZA FILHO, F. A. *Reservoir yield intercomparison of large dams in Jaguaribe Basin-CE in climate change scenarios*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 22, p. 1-12, 2017.

FERNANDES, R.O.; STUDART, T. M. C.; SOUZA-FILHO, F. A. *Gestão adaptativa para um mundo em mudança*. ADAPTA: gestão adaptativa do risco climático de seca, p. 419. Expressão Gráfica e Editora Fortaleza/CE, 2019.

FORMIGA-JOHNSSON, R. M.; BRITTO, A. L. *Segurança hídrica, abastecimento metropolitano e mudanças climáticas: considerações sobre o caso do Rio de Janeiro*. São Paulo, vol. 23, 2020.

FORMIGA-JOHNSSON, R.M.; COSTA, L.F; FALCÃO, J.E.; ACSELRAD, M.V. *Segurança hídrica do Estado do Rio de Janeiro face à transposição paulista de águas da bacia Paraíba do Sul: relato de um acordo federativo*. Revista Ineana v.3, n. 1, p. 48-69, jul-dez, 2015.

FORMIGA-JOHNSSON, R.M.; LEMOS, M.C; E SOUZA FILHO, F.A. (2019). *Segurança hídrica e capacidade adaptativa urbana e metropolitana em tempos de mudanças climáticas*. In: Philippi Jr., A. e Sobral, M.C. (Orgs.), *Gestão de bacias hidrográficas e sustentabilidade*. São Paulo: Minha Editora.

FREIRE-GONZÁLEZ, J.; DECKER, C.; HALL, J. W. *The economic impacts of droughts: a framework for analysis*. Ecological Economics, 132, 196-204, 2017.

FUNK, C., PETERSON, P., LANDSFELD, M. *The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes*. Scientific Data 2, 150066, 2015.

GIDDENS, A. *O mundo na era da globalização*. Lisboa: Presença, 4ª ed., 2000.

GLOBAL WATER PARTNERSHIP (GWP). *Towards water security: a framework for action*. GWP, Londres/Reino Unido, 2000.

GONZÁLEZ, F. C.; MORCILLO, J. C. *Guía para la elaboración de planes de emergencia por sequía em sistemas de abastecimiento urbano*. Ministerio de Medio Ambiente: Asociación Española de abastecimientos de agua y saneamiento, 83 p., 2007.

GREY, D.; SADOFF, C. W. *Sink or Swim? Water security for growth and development*. Water Policy, v. 9, p. 545–571, 2007.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E.; DOYLE, M. E. *Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events*. Journal of Climate, v. 13, n. 1, p. 35-58, 2000.

- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. *Estimating potential evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 108, p. 225-230, 1982.
- HARRIS, I., OSBORN, T.J., JONES, P., LISTER, D. *Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset*. Scientific Data, p. 7-109.
<https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>. Dataset doi:
<http://dx.doi.org/10.5285/10d3e3640f004c578403419aac167d82> , 2020.
- HAYES, M. J.; SVOBODA, M. J.; WILHITE, D.A.; VANYARKHO, O. V. *Drought monitoring: the 1996 drought using The Standardized-Precipitation index*. Bulletin American Meteorological Society, v. 80, n. 3, p. 429-438, 1999.
- HOLLING, C.S. *Surprise for science, resilience for ecosystems and incentives for people*. Ecological Applications, v. 6, n. 3, p. 733-735, 1996.
- HUGHES, B. L. *The impracticality of a universal drought definition*. Walker Institute for Climate System Research, 5 p., 2013.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 p, 2014.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Global warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels [...] (IPCC)*, 2021.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Summary for policymakers. Climate change 2021: the physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge/Reino Unido, 2021.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Global warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels [...] (IPCC)*, 2022.
- KANE, R. P. *El Niño and La Niña events and rainfall in NE and South Brazil*. Revista Brasileira Geofísica, v. 10, p. 49-59, 1992.
- KIM, Y.; MIN, S.; ZHANG, X.; SILLMANN, J.; SANDSTAD, M. *Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices*. Weather and Climate Extremes 29 100269, 2020.

- KWON, H., S.F. ASSIS, BLOCK, P.J., SUN, L., LALL, U., REIS, D.S.J. *Uncertainty assessment of hydrologic and climate forecast models in Northeastern Brazil*. 2011. Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com).
- LALL, U. *Water Security*, v1, p. 1–2, 2017.
- LIGHT SA. *Encaminhamento de cheias no Rio Pirai*. Grupo de Trabalho Permanente de Acompanhamento da Operação Hidráulica/Plano Integrado de Recursos Hídricos do Paraíba do Sul, 2016.
- LOPES, J. E. G. *Manual do modelo SMAP, 1999*. Disponível em <http://pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=3596>. Acessado em maio de 2021.
- LOPES, J. E. G., BRAGA, B. P. F., CONEJO, J. G. L. *SMAP – A simplified hydrological model*. Applied Modelling in Catchment Hydrology (V. P. Singh, ed.). Water Resources Publications, 1982.
- MARCELINO, E. V. *Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos*. INPE/CRS, Santa Maria, 38 p., 2008.
- MARCOS-JÚNIOR, A. D.; SILVEIRA, C. S. *Balanço hídrico de Thornthwaite para sudeste e nordeste brasileiros*. ADAPTA: gestão adaptativa do risco climático de seca. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza/CE, 2019.
- MARENCO, J. A. *Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI*. MMA, Ministério do Meio Ambiente, 2006.
- MARENCO, J. A.; VALVERDE, M. C. *Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4*. Campinas. Rev. Mutic. 8, p. 5–28, 2007.
- MASON, N.; CALOW, R. *Water security: from abstract concept to meaningful metrics - an initial overview of options*. ODI Working Paper 357, Londres/Reino Unido, 2012.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. [et al]. *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anais [...], v. 17, p. 179–183, 1993.
- MCMAHON, T. A.; DIAZ-ARENAS, A. *Methods of computation of low streamflow*. Studies and Reports in Hydrology 36. Paris/França, 1982.
- MEEHL, G. A.; BOER, G. J.; COVEY, C.; LATIF, M.; STOUFFER, R. J. *Intercomparison makes for a better climate model*, Eos, Transactions American Geophysical Union, v. 78, p. 445–451, 1997.

- MELO, M. C.; FORMIGA-JOHNSON, R. M. *O conceito emergente de segurança hídrica*. Sustentare, Três Corações, v. 1, n. 1, p.72-92, 2017.
- MINAS GERAIS. *Decreto Estadual nº 47.633, de 12 de abril de 2019: dispõe sobre os contratos de gestão firmados entre o Estado, representado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas, e as Agências de Bacias Hidrográficas [...]*. Minas Gerais, 2019.
- NAUDITT, A. [et al]. *A grande seca de 2014-2015 na bacia do rio Paraíba do Sul [...]*. ADAPTA: gestão adaptativa do risco climático de seca. Expressão Gráfica e Editora, p. 825-840, Fortaleza/CE, 2019.
- NAUDITT, A.; FIROZ, A. B. M.; VIET, T. Q.; FINK, M.; STOLPE, H.; RIBBE, L. *Hydrological drought risk assessment in an anthropogenically impacted tropical catchment*. Land use and climate change interactions in central vietnam, springer book series: Water resources and development, ISBN 978-981-10-2623-2., 2017.
- NAUDITT, A.; HANN, H.; STAHL, K.; RIBBE, L. *Evaluating drought risk in data scarce tropical environments*. AGU Fall Meeting, 2018.
- NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. (organizadores). *Mudanças climáticas em rede: um olhar interdisciplinar*. Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT), São José dos Campos/SP, 2017.
- O'NEILL, B.C., KRIEGLER, E. [et al]. *A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways*. Climatic Change 122, p. 387–400, 2014.
- O'NEILL, B.C., TEBALDI, C. [et al]. *The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6*. 2016. Geosci. Model Dev. 9, p. 3461–3482, 2016.
- OBSERVATÓRIO DO CLIMA. *Vinte e um recados fundamentais do novo relatório do IPCC*. Disponível em: <<https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2022/04/IPCC-WG3-resmo-OC.pdf>>. Acessado em: 15 de maio de 2022.
- OLIVEIRA-SILVA, S. M.; SOUZA-FIHO, F. A. *Estratégia geral para planos de segurança hídrica*. ADAPTA: gestão adaptativa do risco climático de seca, p. 665. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza/CE, 2019.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Water security in the global water agenda: a UN-Water analytical brief*. United Nations University, Ontário/Canadá, 2013.
- ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). *Fostering water resilience in Brazil: turning strategy into action*. The Organisation for Economic Co-operation and Development Studies on Water, 2022.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). *Water security for better lives*. The Organisation for Economic Co-operation and Development Studies on Water, 2013.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). *Water, growth and finance: policy perspectives*. The Organisation for Economic Co-operation and Development Studies on Water, 2016.

PADRÓN, R.; GUDMUNDSSON, L.; DECHARME, B.; DUCHARME, A.; LAWRENCE, D. [et al]. *Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change*. Nature Geoscience, Nature Publishing Group, 13 (7), p. 477-481, 2020.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. *Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification*, Hydrology and Earth System Sciences, 11, p. 1633–1644, 2007.

PORTELA, M. M.; SANTOS, J. F. F.; NAGHETTINI M.; MATOS, J. P.; SILVA, A. T. *Superfícies de limiares de precipitação para identificação de secas em Portugal continental: uma aplicação complementar do índice de precipitação padronizada, SPI*. Revista Recursos Hídricos, vol. 33, n. 2, p. 5-23, 2012.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. *Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (Guia PMBOK)*. Sexta edição. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2017.

REIS, G. A.; SOUZA-FILHO, F. A.; OLIVEIRA, T. A. *Análise da vulnerabilidade à seca no estado do Ceará*. ADAPTA: gestão adaptativa do risco climático de seca, p. 785. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza/CE, 2019.

RIBEIRO, F. W. *Modelo de cobrança de água por faixa de consumo com uso de subsídio cruzado*. ADAPTA: Gestão Adaptativa do Risco Climático de Seca. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza/CE, 2019.

RIBEIRO, N. B. *Governança das águas em bacias hidrográficas: proposta conceitual e metodológica e sua aplicação na Bacia Lagos São João, RJ*. Tese de Doutorado em Meio Ambiente (PPGMA) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), 2016.

RIO DE JANEIRO. *Lei Estadual nº 5.639, de 6 janeiro de 2010: Dispõe sobre os contratos de gestão entre o órgão gestor e executor da Política Estadual de Recursos Hídricos e entidades delegatárias de funções de agência de água relativos à gestão de recursos hídricos de domínio do estado, e dá outras providências*. Rio de Janeiro, 2010.

- ROCKSTRÖM, J.; FALKENMARK, M.; FOLKE, C.; LANNERSTAD, M.; BARRON, J.; ENFORS, E.; GORDON, L.; HEINKE, J.; HOFF, H.; PAHL- -WOSTL, C. *Water resilience for human prosperity*. Cambridge University. Press, Nova Iorque/ EUA, 292 p., 2014.
- ROLIM, L. Z. R; SOUZA-FILHO, F. A. *Análise dos modos de variação sazonal, interanual e multidecadal do clima atual através da análise de séries temporais de vazões*. ADAPTA: Gestão adaptativa do risco climático de seca. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza/CE, 2019.
- ROLIM, L. Z. R; SOUZA-FILHO, F. A.;ROCHA, R. V. *Análise da estacionariedade das séries de precipitação e vazão*. ADAPTA: Gestão Adaptativa do Risco Climático de Seca. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza/CE, 2019.
- SABESP. *Estratégias resilientes: um plano de adaptação às variações climáticas na gestão de recursos hídricos para o abastecimento da região metropolitana de São Paulo*. 1ª Edição São Paulo, 127 p., 2020.
- SATOH, Y.; SHIOGAMA, H; HANASAKI, N.; POKHREL, Y.; BOULANGE, J. E. S. [et al]. A quantitative evaluation of the issue of drought definition:a source of disagreement in future drought assessments. *Environmental research letters* 16, 104001, 2021.
- SAYERS, P. B.; MONCRIEFF, C.; TICKNER, D. [et al]. *Drought risk management: A strategic approach*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris/França, 2016.
- SAYERS, P. B.; YUANYUAN, L.; MONCRIEFF, C. [et al]. *Strategic drought risk management: eight 'goldenrules' to guide a sound approach*. *International Journal of River Basin Management*, DOI:10.1080/15715124.2017.1280812, 2017.
- SHUKLA, S.; WOOD, A. W. *Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought*. *Geophysical Research Letters*, v. 35, L02405, DOI:10.1029/2007GL032487, 2008.
- SILVA, S. M. O.; SOUZA-FILHO, F. A. *Alocação de água – base conceitual*. ADAPTA: gestão adaptativa do risco climático de seca. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza/CE, 2019.
- SILVEIRA, C. S; SOUZA-FILHO, F. A. *Impacto das mudanças climáticas sobre Paraíba do Sul*. ADAPTA: gestão adaptativa do risco climático de seca. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza/CE, 2019.
- SILVEIRA, C. S. [et al]. *Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região nordeste do*

- Brasil, Amazônia e bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5*. Revista Brasileira de Meteorologia, ISSN 0102-7786. v. 28, n. 3, p. 317-330, 2013.
- SILVEIRA, C. S. [et al]. *Sazonalidade da precipitação sobre o nordeste setentrional brasileiro nas simulações do IPCC-AR4*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.17, n.2, p. 125-134, 2012.
- SILVEIRA, C. S.; ASSIS, F. S. F. *Impacto das mudanças climáticas sobre Paraíba do Sul. ADAPTA: Gestão adaptativa do risco climático de seca. Seção 2 – Variabilidade e mudança do clima*, p. 261-270, 2019.
- SILVEIRA, C. S.; ASSIS, F. S. F., VASCONCELOS, F. C. *Streamflow projections for the Brazilian hydropower sector from RCP scenarios*. IWA Publishing, Journal os Water and Climate Change, 08-1, 2017.
- SISTEMA INTEGRADO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – CEIVAP. *SIGA WEB*. Disponível em: <<https://sigaaguas.org.br/sigaweb/apps/ceivap/>>. Acessado em 12 de junho de 2021.
- SOUZA-FILHO, F. A.; AQUINO, S. H. S.; MARTINS, E. S. P. R. *Documento sobre bases conceituais sobre mudanças climáticas, impactos e adaptação em recursos hídricos. Relatório para o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima*, 2014.
- SOUZA-FILHO, F. A.; OLIVEIRA-SILVA, S. M.; FORMIGA-JOHNSSON, R. M.; NELSON, D. R.; NAUDIT, A.; RIBBE, L. *ADAPTA: Gestão adaptativa do risco climático de seca*. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza/CE, 2019.
- SUSTAINABLE WATER PARTNETSHIP (SWP). *Final Report*. United States Agency for International Development, 2017.
- SWAMINATHAN, M. *Ecology and equity: key determinants of sustainable water security*. Water Science and Technology, v. 43, n. 1, p. 35-44, 2001.
- TAKESHIMA, A.; KIM, H.; SHIOGAMA, H. [et al]. *Global aridity changes due to differences in surface energy and water balance between 1.5°C and 2°C warming*. Environmental Research Letters 15 0940a7, 2020.
- TATE, E. L.; GUSTARD, A. *Drought definition: a hydrological perspective*. Institute of Hydrology, Wallingford/Reino Unido, 2000.
- TOKARSKA, K. B.; STOLPE, M. B.; SIPPEL, S. [et al]. *Past warming trend constrains future warming in CMIP6 models*. Science Advances 6: eaaz9549, 2020.
- TSAKIRIS, G. *Drought risk assessment and management*. Water Resour Manage 31, p. 3083-3095, 2017.

- TSAKIRIS, G.; NALBANTIS, I.; VANGELIS, H.; [et al]. *A system-based paradigm of drought analysis for operational management*. *Water Resources Management* 27(15), p. 5281–5297, 2013.
- TUCCI, C.E.M. *Modelos hidrológicos*. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2ª Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 678 p., 2005. 1ª Edição, 1998.
- TUCCI, C.E.M., SILVEIRA, A.L. [et al]. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Coleção Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 4ª Edição, 9ª Reimpressão. Porto Alegre: Editora ABRH. 943 p., 2020. 1ª Edição, 1993.
- UN WATER. *Water and climate change*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization 7 Place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France. 235 p., 2020.
- UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). *Mainstreaming drought risk management - a primer*. UNON Printshop, Nairobi, 2011.
- VASCONCELOS, N. A.; FORMIGA-JOHNSON, R. M.; RIBEIRO, N. B. *Impactos da crise hídrica 2014-2016 sobre os usuários dos rios Paraíba do Sul e Guandu*. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 16, e14, 2019.
- VIEIRA, V. P. P. B. *Análise de risco em recursos hídricos: Fundamentos e aplicações*. Porto Alegre: Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 10, 372 p., 2005.
- VOOSEN, P. U. N. *Climate panel confronts implausibly hot forecasts of future warming*. *Science*, volume 373 – edição 6554, 2021.
- WALKER, B.; HOLLING, C. S.; CARPENTER, S. R.; E KINZIG, A. *Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems*. *Ecology and Society*, v.9, n. 2, 5 p., 2004.
- WILHITE, D. A.; BUCHANAN-SMITH, M. *Drought as a natural hazard: understanding the natural and social context*. *Drought and water crises: science, technology, and management issues*. Editora CRC, pp 3–29. Boca Raton/EUA, 2005.
- WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. *Understanding the drought phenomenon: the role of definitions*. *Water International*, 10:3, 111-120 p., 1985.
- WILHITE, D. A.; SVOBODA, M. D.; HAYES, M. J. *Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness*. *Water Resources Management* 21, 763–774 p. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska, Lincoln/EUA, 2007.

WILHITE, D. A.; HAYES, M. J.; KNUTSON, C. L. *Drought preparedness planning: building institutional capacity*. Drought and water crises: science, technology, and management 93-153p, CRC Press, Boca Raton/EUA, 2005.

WILHITE, D. A.; HAYES, M. J.; KNUTSON, C. L.; SMITH, K. H. *Planning for drought: moving from crisis to risk management*. Journal of the American Water Resources Association, 2000.

WORLD ECONOMIC FORUM. *Relatório global de riscos 2020 – sumário executivo*. Relatório de análise, 15ª edição. World Economic Forum 91–93 route de la capite CH-1223. 8p, 2020.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *WMO statement on the state of the global climate in 2019*. WMO-No 1248. 44 p., 2020.

WORLD WATER COUNCIL (WWC). *Strategy: water security, sustainability and resilience*. World Water Council, 2018.

WRI BRASIL. *Mais intensos e frequentes, eventos climáticos são ameaça à saúde global*. Disponível em: < <https://wribrasil.org.br/pt/blog/2019/02/eventos-climaticos-recentes-sao-ameaca-a-saude-global> >. Acessado em outubro de 2020.

APÊNDICE A – Avaliação dos MCGs por área de interesse

Tabela 11 – Avaliação dos modelos para Paraibuna

| # | MODELO | AVALIAÇÃO SAZONAL | | | AVALIAÇÃO INTERANUAL | | | AVAL _F |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | CORREL | ERRO _P | AVAL _S | CORREL | ERRO _P | AVAL _I | |
| 1 | FIO-ESM-2-0 | 0,9999990 | 0,0063772 | 0,898 | 0,6664972 | 0,0398144 | 1,000 | 0,949 |
| 2 | NESM3 | 0,9999997 | 0,0035905 | 0,970 | 0,6560360 | 0,0404346 | 0,793 | 0,882 |
| 3 | MPI-ESM1-2-HR | 0,9999999 | 0,0022350 | 1,000 | 0,6528237 | 0,0405762 | 0,738 | 0,869 |
| 4 | ACCESS-CM2 | 0,9999994 | 0,0057338 | 0,922 | 0,6542469 | 0,0405100 | 0,763 | 0,843 |
| 5 | FGOALS-g3 | 0,9999995 | 0,0049281 | 0,940 | 0,6519191 | 0,0406270 | 0,721 | 0,831 |
| 6 | HadGEM3-GC31-LL | 0,9999994 | 0,0048868 | 0,939 | 0,6502550 | 0,0407577 | 0,682 | 0,811 |
| 7 | BCC-CSM2-MR | 0,9999977 | 0,0096662 | 0,792 | 0,6555099 | 0,0404323 | 0,789 | 0,791 |
| 8 | IPSL-CM6A-LR | 0,9999968 | 0,0114744 | 0,729 | 0,6591772 | 0,0402925 | 0,848 | 0,789 |
| 9 | MPI-ESM1-2-LR | 0,9999992 | 0,0057876 | 0,914 | 0,6452997 | 0,0410580 | 0,583 | 0,749 |
| 10 | CMCC-ESM2 | 0,9999994 | 0,0068275 | 0,905 | 0,6441770 | 0,0411179 | 0,562 | 0,734 |
| 11 | MRI-ESM2-0 | 0,9999994 | 0,0050261 | 0,934 | 0,6152366 | 0,0427769 | 0,000 | 0,467 |
| 12 | CanESM5 | 0,9999972 | 0,0155856 | 0,674 | 0,6217955 | 0,0424501 | 0,119 | 0,397 |
| 13 | MIROC6 | 0,9999861 | 0,0313656 | 0,000 | 0,6286957 | 0,0419414 | 0,272 | 0,136 |
| 14 | ACCESS-ESM1-5 | 0,9999883 | 0,0236875 | 0,211 | 0,6192797 | 0,0427006 | 0,052 | 0,132 |

Nota: Modelos do CMIP6, CORREL, ERRO_P, AVAL_S, AVAL_I e classificação final – AVAL_F para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$

Tabela 12 – Avaliação dos modelos para Santa Branca

| # | MODELO | AVALIAÇÃO SAZONAL | | | AVALIAÇÃO INTERANUAL | | | AVAL _F |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | CORREL | ERRO _P | AVAL _S | CORREL | ERRO _P | AVAL _I | |
| 1 | FIO-ESM-2-0 | 0,9999994 | 0,0049299 | 0,978 | 0,6377189 | 0,0421345 | 1,000 | 0,989 |
| 2 | NESM3 | 0,9999997 | 0,0033415 | 0,999 | 0,6195844 | 0,0432060 | 0,700 | 0,850 |
| 3 | FGOALS-g3 | 0,9999992 | 0,0059777 | 0,965 | 0,6175643 | 0,0432563 | 0,676 | 0,821 |
| 4 | ACCESS-CM2 | 0,9999993 | 0,0058965 | 0,967 | 0,6174952 | 0,0433010 | 0,669 | 0,818 |
| 5 | IPSL-CM6A-LR | 0,9999972 | 0,0106603 | 0,892 | 0,6217442 | 0,0431482 | 0,726 | 0,809 |
| 6 | BCC-CSM2-MR | 0,9999954 | 0,0133129 | 0,845 | 0,6215031 | 0,0430537 | 0,737 | 0,791 |
| 7 | MPI-ESM1-2-HR | 0,9999997 | 0,0032203 | 1,000 | 0,6118691 | 0,0435864 | 0,582 | 0,791 |
| 8 | HadGEM3-GC31-LL | 0,9999989 | 0,0067653 | 0,953 | 0,6143875 | 0,0434950 | 0,616 | 0,785 |
| 9 | MPI-ESM1-2-LR | 0,9999994 | 0,0046815 | 0,981 | 0,6103542 | 0,0437226 | 0,551 | 0,766 |
| 10 | CMCC-ESM2 | 0,9999926 | 0,0199496 | 0,744 | 0,6052559 | 0,0439222 | 0,480 | 0,612 |
| 11 | MRI-ESM2-0 | 0,9999995 | 0,0043737 | 0,985 | 0,5817331 | 0,0453190 | 0,090 | 0,538 |
| 12 | CanESM5 | 0,9999983 | 0,0124950 | 0,884 | 0,5840917 | 0,0452530 | 0,119 | 0,502 |
| 13 | MIROC6 | 0,9999828 | 0,0346688 | 0,480 | 0,5918427 | 0,0446297 | 0,270 | 0,375 |
| 14 | ACCESS-ESM1-5 | 0,9999526 | 0,0494424 | 0,000 | 0,5787927 | 0,0457938 | 0,000 | 0,000 |

Nota: Modelos do CMIP6, CORREL, ERRO_P, AVAL_S, AVAL_I e classificação final – AVAL_F para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$

Tabela 13 – Avaliação dos modelos para Jaguarí

| # | MODELO | AVALIAÇÃO SAZONAL | | | AVALIAÇÃO INTERANUAL | | | AVAL _F |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | CORREL | ERRO _P | AVAL _S | CORREL | ERRO _P | AVAL _I | |
| 1 | FIO-ESM-2-0 | 0,9999995 | 0,0050882 | 0,966 | 0,6762072 | 0,0419842 | 1,000 | 0,983 |
| 2 | FGOALS-g3 | 0,9999994 | 0,0060525 | 0,946 | 0,6619741 | 0,0428711 | 0,728 | 0,837 |
| 3 | IPSL-CM6A-LR | 0,9999989 | 0,0072165 | 0,908 | 0,6607931 | 0,0429992 | 0,698 | 0,803 |
| 4 | ACCESS-CM2 | 0,9999994 | 0,0059930 | 0,947 | 0,6574205 | 0,0431907 | 0,636 | 0,792 |
| 5 | NESM3 | 0,9999997 | 0,0036536 | 0,997 | 0,6543631 | 0,0434083 | 0,573 | 0,785 |
| 6 | MPI-ESM1-2-LR | 0,9999994 | 0,0054360 | 0,954 | 0,6552948 | 0,0433123 | 0,597 | 0,776 |
| 7 | HadGEM3-GC31-LL | 0,9999993 | 0,0059765 | 0,942 | 0,6553721 | 0,0433339 | 0,594 | 0,768 |
| 8 | MPI-ESM1-2-HR | 0,9999997 | 0,0034760 | 1,000 | 0,6513332 | 0,0435458 | 0,523 | 0,762 |
| 9 | BCC-CSM2-MR | 0,9999961 | 0,0134190 | 0,695 | 0,6571019 | 0,0431891 | 0,633 | 0,664 |
| 10 | MRI-ESM2-0 | 0,9999996 | 0,0042375 | 0,983 | 0,6245376 | 0,0452504 | 0,007 | 0,495 |
| 11 | ACCESS-ESM1-5 | 0,9999987 | 0,0083712 | 0,881 | 0,6296492 | 0,0449799 | 0,097 | 0,489 |
| 12 | CanESM5 | 0,9999989 | 0,0110857 | 0,845 | 0,6248619 | 0,0452941 | 0,003 | 0,424 |
| 13 | CMCC-ESM2 | 0,9999886 | 0,0271214 | 0,176 | 0,6457835 | 0,0438351 | 0,426 | 0,301 |
| 14 | MIROC6 | 0,9999873 | 0,0350259 | 0,000 | 0,6338881 | 0,0445458 | 0,204 | 0,102 |

Nota: Modelos do CMIP6, CORREL, ERRO_P, AVAL_S, AVAL_I e classificação final – AVAL_F para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$

Tabela 14 – Avaliação dos modelos para Funil

| # | MODELO | AVALIAÇÃO SAZONAL | | | AVALIAÇÃO INTERANUAL | | | AVAL _F |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | CORREL | ERRO _P | AVAL _S | CORREL | ERRO _P | AVAL _I | |
| 1 | FIO-ESM-2-0 | 0,9999995 | 0,0049745 | 0,929 | 0,7102402 | 0,0391203 | 1,000 | 0,965 |
| 2 | NESM3 | 0,9999997 | 0,0033110 | 0,973 | 0,6972121 | 0,0400042 | 0,730 | 0,852 |
| 3 | MPI-ESM1-2-HR | 0,9999999 | 0,0022168 | 1,000 | 0,6936924 | 0,0401940 | 0,665 | 0,833 |
| 4 | ACCESS-CM2 | 0,9999994 | 0,0056347 | 0,915 | 0,6960028 | 0,0400596 | 0,709 | 0,812 |
| 5 | FGOALS-g3 | 0,9999995 | 0,0050241 | 0,931 | 0,6945696 | 0,0401386 | 0,682 | 0,807 |
| 6 | HadGEM3-GC31-LL | 0,9999995 | 0,0050348 | 0,927 | 0,6925666 | 0,0402989 | 0,637 | 0,782 |
| 7 | IPSL-CM6A-LR | 0,9999973 | 0,0111920 | 0,695 | 0,6996024 | 0,0398736 | 0,775 | 0,735 |
| 8 | MPI-ESM1-2-LR | 0,9999994 | 0,0053092 | 0,916 | 0,6869532 | 0,0406706 | 0,522 | 0,719 |
| 9 | BCC-CSM2-MR | 0,9999973 | 0,0111427 | 0,699 | 0,6968511 | 0,0399961 | 0,728 | 0,714 |
| 10 | CMCC-ESM2 | 0,9999988 | 0,0096347 | 0,807 | 0,6858247 | 0,0407144 | 0,504 | 0,656 |
| 11 | MRI-ESM2-0 | 0,9999995 | 0,0046572 | 0,936 | 0,6610199 | 0,0423362 | 0,000 | 0,468 |
| 12 | CanESM5 | 0,9999981 | 0,0140592 | 0,687 | 0,6645194 | 0,0421631 | 0,062 | 0,375 |
| 13 | ACCESS-ESM1-5 | 0,9999946 | 0,0169497 | 0,445 | 0,6640609 | 0,0422303 | 0,047 | 0,246 |
| 14 | MIROC6 | 0,9999907 | 0,0293133 | 0,000 | 0,6716083 | 0,0415817 | 0,225 | 0,113 |

Nota: Modelos do CMIP6, CORREL, ERRO_P, AVAL_S, AVAL_I e classificação final – AVAL_F para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$

Tabela 15 – Avaliação dos modelos para Santana

| # | MODELO | AVALIAÇÃO SAZONAL | | | AVALIAÇÃO INTERANUAL | | | AVAL _F |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | CORREL | ERRO _P | AVAL _S | CORREL | ERRO _P | AVAL _I | |
| 1 | MPI-ESM1-2-LR | 0,9999998 | 0,0039494 | 0,985 | 0,704792 | 0,040357 | 0,956 | 0,971 |
| 2 | MPI-ESM1-2-HR | 0,9999998 | 0,0032856 | 1,000 | 0,699464 | 0,040701 | 0,868 | 0,934 |
| 3 | NESM3 | 0,9999984 | 0,0091201 | 0,805 | 0,707402 | 0,040178 | 1,000 | 0,903 |
| 4 | BCC-CSM2-MR | 0,9999989 | 0,0076257 | 0,860 | 0,699074 | 0,040762 | 0,857 | 0,859 |
| 5 | IPSL-CM6A-LR | 0,9999973 | 0,0114590 | 0,705 | 0,701212 | 0,040656 | 0,889 | 0,797 |
| 6 | FGOALS-g3 | 0,9999994 | 0,0058372 | 0,924 | 0,683632 | 0,041838 | 0,594 | 0,759 |
| 7 | ACCESS-CM2 | 0,9999982 | 0,0102800 | 0,770 | 0,690573 | 0,041358 | 0,712 | 0,741 |
| 8 | HadGEM3-GC31-LL | 0,9999982 | 0,0109595 | 0,757 | 0,686944 | 0,041626 | 0,648 | 0,703 |
| 9 | FIO-ESM-2-0 | 0,9999961 | 0,0149637 | 0,570 | 0,698353 | 0,040903 | 0,834 | 0,702 |
| 10 | CMCC-ESM2 | 0,9999981 | 0,0110521 | 0,749 | 0,683387 | 0,041876 | 0,587 | 0,668 |
| 11 | MRI-ESM2-0 | 0,9999977 | 0,0107653 | 0,735 | 0,664949 | 0,043047 | 0,286 | 0,511 |
| 12 | CanESM5 | 0,9999980 | 0,0146523 | 0,664 | 0,664400 | 0,043119 | 0,273 | 0,469 |
| 13 | MIROC6 | 0,9999924 | 0,0256749 | 0,162 | 0,674484 | 0,042451 | 0,441 | 0,302 |
| 14 | ACCESS-ESM1-5 | 0,9999889 | 0,0246061 | 0,024 | 0,648518 | 0,044239 | 0,000 | 0,012 |

Nota: Modelos do CMIP6, CORREL, ERRO_P, AVAL_S, AVAL_I e classificação final – AVAL_F para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$

Tabela 16 – Avaliação dos modelos para Tócos

| # | MODELO | AVALIAÇÃO SAZONAL | | | AVALIAÇÃO INTERANUAL | | | AVAL _F |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | CORREL | ERRO _P | AVAL _S | CORREL | ERRO _P | AVAL _I | |
| 1 | NESM3 | 0,9999997 | 0,0039839 | 0,962 | 0,7137200 | 0,0399065 | 1,000 | 0,981 |
| 2 | MPI-ESM1-2-HR | 0,9999999 | 0,0029539 | 1,000 | 0,7095085 | 0,0401645 | 0,891 | 0,946 |
| 3 | BCC-CSM2-MR | 0,9999990 | 0,0074158 | 0,827 | 0,7090227 | 0,0402200 | 0,874 | 0,851 |
| 4 | IPSL-CM6A-LR | 0,9999974 | 0,0114182 | 0,618 | 0,7136833 | 0,0399362 | 0,994 | 0,806 |
| 5 | FGOALS-g3 | 0,9999993 | 0,0062739 | 0,882 | 0,7007697 | 0,0408300 | 0,640 | 0,761 |
| 6 | MPI-ESM1-2-LR | 0,9999993 | 0,0060870 | 0,881 | 0,6978563 | 0,0409971 | 0,567 | 0,724 |
| 7 | ACCESS-CM2 | 0,9999979 | 0,0111631 | 0,662 | 0,7027603 | 0,0406770 | 0,698 | 0,680 |
| 8 | HadGEM3-GC31-LL | 0,9999979 | 0,0122604 | 0,633 | 0,7003841 | 0,0408640 | 0,628 | 0,631 |
| 9 | FIO-ESM-2-0 | 0,9999934 | 0,0196452 | 0,120 | 0,7081547 | 0,0403946 | 0,827 | 0,474 |
| 10 | CMCC-ESM2 | 0,9999946 | 0,0186402 | 0,237 | 0,6980043 | 0,0410584 | 0,557 | 0,397 |
| 11 | MRI-ESM2-0 | 0,9999973 | 0,0116195 | 0,607 | 0,6785215 | 0,0423118 | 0,043 | 0,325 |
| 12 | CanESM5 | 0,9999981 | 0,0146034 | 0,595 | 0,6771643 | 0,0424360 | 0,000 | 0,298 |
| 13 | ACCESS-ESM1-5 | 0,9999946 | 0,0181729 | 0,250 | 0,6781864 | 0,0424016 | 0,021 | 0,136 |
| 14 | MIROC6 | 0,9999936 | 0,0248963 | 0,014 | 0,6854318 | 0,0418444 | 0,230 | 0,122 |

Nota: Modelos do CMIP6, CORREL, ERRO_P, AVAL_S, AVAL_I e classificação final – AVAL_F para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$

Tabela 17 – Avaliação dos modelos para Santa Cecília

| # | MODELO | AVALIAÇÃO SAZONAL | | | AVALIAÇÃO INTERANUAL | | | AVAL _F |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | CORREL | ERRO _P | AVAL _S | CORREL | ERRO _P | AVAL _I | |
| 1 | NESM3 | 0,9999999 | 0,0021230 | 0,999 | 0,7478742 | 0,0394550 | 1,0000 | 0,9995 |
| 2 | MPI-ESM1-2-HR | 0,9999999 | 0,0023390 | 0,995 | 0,7421113 | 0,0398773 | 0,8610 | 0,9280 |
| 3 | FIO-ESM-2-0 | 0,9999992 | 0,0075557 | 0,794 | 0,7463661 | 0,0396145 | 0,9560 | 0,8750 |
| 4 | BCC-CSM2-MR | 0,9999993 | 0,0067540 | 0,821 | 0,7435378 | 0,0397953 | 0,8920 | 0,8565 |
| 5 | MPI-ESM1-2-LR | 0,9999998 | 0,0031574 | 0,964 | 0,7348507 | 0,0404535 | 0,6790 | 0,8215 |
| 6 | ACCESS-CM2 | 0,9999995 | 0,0059819 | 0,859 | 0,7359901 | 0,0403927 | 0,7030 | 0,7810 |
| 7 | IPSL-CM6A-LR | 0,9999979 | 0,0109866 | 0,590 | 0,7463890 | 0,0396102 | 0,9570 | 0,7735 |
| 8 | HadGEM3-GC31-LL | 0,9999996 | 0,0050856 | 0,894 | 0,7325002 | 0,0406685 | 0,6160 | 0,7550 |
| 9 | FGOALS-g3 | 0,9999994 | 0,0063195 | 0,845 | 0,7327828 | 0,0406614 | 0,6200 | 0,7325 |
| 10 | CMCC-ESM2 | 0,9999999 | 0,0033345 | 0,962 | 0,7268963 | 0,0410975 | 0,4780 | 0,7200 |
| 11 | MRI-ESM2-0 | 0,9999996 | 0,0049647 | 0,895 | 0,7117583 | 0,0422005 | 0,1140 | 0,5045 |
| 12 | CanESM5 | 0,9999987 | 0,0125887 | 0,620 | 0,7118992 | 0,0422461 | 0,1080 | 0,3640 |
| 13 | MIROC6 | 0,9999961 | 0,0219179 | 0,143 | 0,7176675 | 0,0417374 | 0,2610 | 0,2020 |
| 14 | ACCESS-ESM1-5 | 0,9999946 | 0,0189030 | 0,076 | 0,7077051 | 0,0425986 | 0,0000 | 0,0380 |

Nota: Modelos do CMIP6, CORREL, ERRO_P, AVAL_S, AVAL_I e classificação final – AVAL_F para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$

Tabela 18 – Avaliação dos modelos para Sobragi

| # | MODELO | AVALIAÇÃO SAZONAL | | | AVALIAÇÃO INTERANUAL | | | AVAL _F |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | CORREL | ERRO _P | AVAL _S | CORREL | ERRO _P | AVAL _I | |
| 1 | BCC-CSM2-MR | 0,9999995 | 0,0078613 | 0,906 | 0,7460155 | 0,0468370 | 1,000 | 0,953 |
| 2 | IPSL-CM6A-LR | 0,9999994 | 0,0085610 | 0,888 | 0,7452810 | 0,0468987 | 0,988 | 0,938 |
| 3 | FIO-ESM-2-0 | 0,9999996 | 0,0057828 | 0,958 | 0,7399158 | 0,0474366 | 0,891 | 0,925 |
| 4 | NESM3 | 0,9999994 | 0,0079729 | 0,899 | 0,7424909 | 0,0471157 | 0,944 | 0,922 |
| 5 | ACCESS-CM2 | 0,9999994 | 0,0068789 | 0,923 | 0,7322137 | 0,0480872 | 0,764 | 0,844 |
| 6 | MPI-ESM1-2-HR | 0,9999991 | 0,0099306 | 0,840 | 0,7359315 | 0,0476892 | 0,834 | 0,837 |
| 7 | MPI-ESM1-2-LR | 0,9999992 | 0,0083208 | 0,880 | 0,7324379 | 0,0480171 | 0,773 | 0,827 |
| 8 | HadGEM3-GC31-LL | 0,9999991 | 0,0084270 | 0,875 | 0,7268908 | 0,0485608 | 0,674 | 0,775 |
| 9 | CMCC-ESM2 | 0,9999997 | 0,0053087 | 0,971 | 0,7168170 | 0,0494920 | 0,501 | 0,736 |
| 10 | MRI-ESM2-0 | 0,9999998 | 0,0041695 | 1,000 | 0,7096967 | 0,0500845 | 0,384 | 0,692 |
| 11 | FGOALS-g3 | 0,9999989 | 0,0100165 | 0,828 | 0,7193639 | 0,0491403 | 0,555 | 0,692 |
| 12 | CanESM5 | 0,9999986 | 0,0107786 | 0,800 | 0,7193295 | 0,0492828 | 0,542 | 0,671 |
| 13 | MIROC6 | 0,9999990 | 0,0138334 | 0,754 | 0,7061089 | 0,0503647 | 0,327 | 0,541 |
| 14 | ACCESS-ESM1-5 | 0,9999905 | 0,0280455 | 0,000 | 0,6878666 | 0,0521819 | 0,000 | 0,000 |

Nota: Modelos do CMIP6, CORREL, ERRO_P, AVAL_S, AVAL_I e classificação final – AVAL_F para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$

Tabela 19 – Avaliação dos modelos para Anta

| # | MODELO | AVALIAÇÃO SAZONAL | | | AVALIAÇÃO INTERANUAL | | | AVAL _F |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | CORREL | ERRO _P | AVAL _S | CORREL | ERRO _P | AVAL _I | |
| 1 | BCC-CSM2-MR | 0,9999995 | 0,0077049 | 0,888 | 0,7414186 | 0,0448302 | 1,000 | 0,944 |
| 2 | IPSL-CM6A-LR | 0,9999997 | 0,0045236 | 0,977 | 0,7350064 | 0,0454061 | 0,889 | 0,933 |
| 3 | NESM3 | 0,9999995 | 0,0072482 | 0,895 | 0,7378706 | 0,0451018 | 0,943 | 0,919 |
| 4 | FIO-ESM-2-0 | 0,9999992 | 0,0079919 | 0,864 | 0,7336441 | 0,0455576 | 0,862 | 0,863 |
| 5 | MPI-ESM1-2-LR | 0,9999992 | 0,0075320 | 0,875 | 0,7318065 | 0,0456044 | 0,842 | 0,859 |
| 6 | MPI-ESM1-2-HR | 0,9999991 | 0,0082505 | 0,853 | 0,7322281 | 0,0455596 | 0,850 | 0,852 |
| 7 | ACCESS-CM2 | 0,9999994 | 0,0063896 | 0,915 | 0,7243934 | 0,0462934 | 0,712 | 0,814 |
| 8 | HadGEM3-GC31-LL | 0,9999991 | 0,0082086 | 0,849 | 0,7197238 | 0,0466779 | 0,634 | 0,742 |
| 9 | CMCC-ESM2 | 0,9999998 | 0,0037407 | 1,000 | 0,7100250 | 0,0475243 | 0,469 | 0,735 |
| 10 | FGOALS-g3 | 0,9999991 | 0,0083198 | 0,848 | 0,7135408 | 0,0470981 | 0,540 | 0,694 |
| 11 | CanESM5 | 0,9999987 | 0,0099029 | 0,786 | 0,7139085 | 0,0472248 | 0,531 | 0,659 |
| 12 | MRI-ESM2-0 | 0,9999996 | 0,0054833 | 0,948 | 0,7031731 | 0,0480428 | 0,359 | 0,654 |
| 13 | MIROC6 | 0,9999983 | 0,0170688 | 0,590 | 0,7036450 | 0,0479732 | 0,370 | 0,480 |
| 14 | ACCESS-ESM1-5 | 0,9999917 | 0,0249511 | 0,000 | 0,6822121 | 0,0498888 | 0,000 | 0,000 |

Nota: Modelos do CMIP6, CORREL, ERRO_P, AVAL_S, AVAL_I e classificação final – AVAL_F para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$

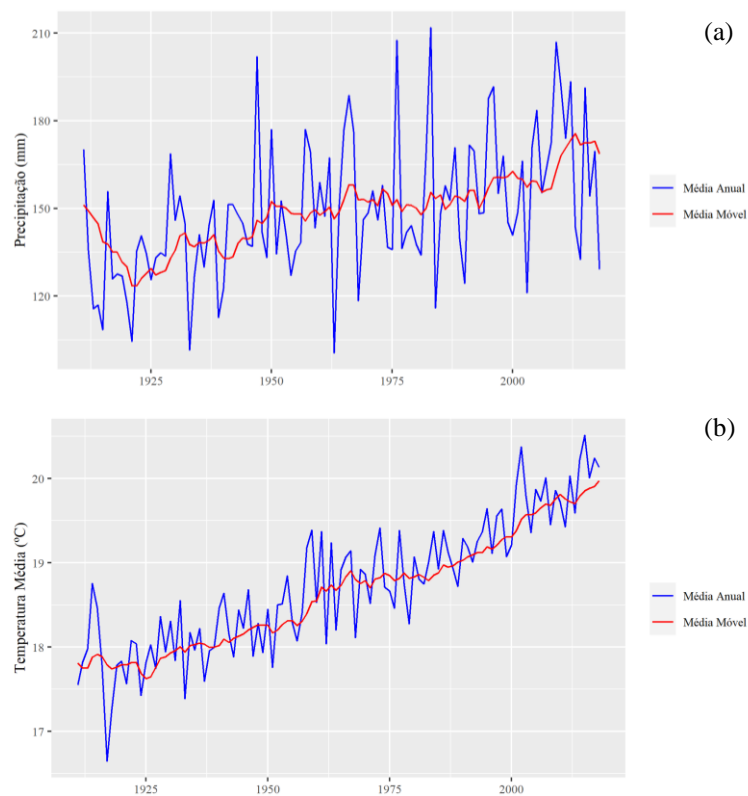
Tabela 20 – Avaliação dos modelos para Ilha dos Pombos

| # | MODELO | AVALIAÇÃO SAZONAL | | | AVALIAÇÃO INTERANUAL | | | AVAL _F |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | CORREL | ERRO _P | AVAL _S | CORREL | ERRO _P | AVAL _I | |
| 1 | BCC-CSM2-MR | 0,9999985 | 0,0127478 | 0,850 | 0,7039403 | 0,0511550 | 1,000 | 0,925 |
| 2 | NESM3 | 0,9999981 | 0,0127440 | 0,832 | 0,6923590 | 0,0520386 | 0,825 | 0,829 |
| 3 | MPI-ESM1-2-LR | 0,9999979 | 0,0130534 | 0,813 | 0,6930492 | 0,0519566 | 0,838 | 0,826 |
| 4 | IPSL-CM6A-LR | 0,9999977 | 0,0176489 | 0,702 | 0,6980297 | 0,0517310 | 0,899 | 0,801 |
| 5 | HadGEM3-GC31-LL | 0,9999993 | 0,0079246 | 0,996 | 0,6777398 | 0,0534085 | 0,581 | 0,789 |
| 6 | MPI-ESM1-2-HR | 0,9999971 | 0,0155842 | 0,721 | 0,6932266 | 0,0519395 | 0,841 | 0,781 |
| 7 | ACCESS-CM2 | 0,9999992 | 0,0079162 | 0,992 | 0,6755359 | 0,0536064 | 0,544 | 0,768 |
| 8 | FIO-ESM-2-0 | 0,9999977 | 0,0141902 | 0,779 | 0,6854598 | 0,0528543 | 0,694 | 0,737 |
| 9 | FGOALS-g3 | 0,9999985 | 0,0109979 | 0,888 | 0,6763106 | 0,0534744 | 0,563 | 0,726 |
| 10 | CMCC-ESM2 | 0,9999993 | 0,0078344 | 1,000 | 0,6628007 | 0,0547006 | 0,341 | 0,671 |
| 11 | MRI-ESM2-0 | 0,9999988 | 0,0100956 | 0,925 | 0,6650730 | 0,0544232 | 0,385 | 0,655 |
| 12 | MIROC6 | 0,9999982 | 0,0136765 | 0,814 | 0,6688220 | 0,0541311 | 0,442 | 0,628 |
| 13 | CanESM5 | 0,9999888 | 0,0299852 | 0,000 | 0,6855603 | 0,0529203 | 0,689 | 0,345 |
| 14 | ACCESS-ESM1-5 | 0,9999901 | 0,0277825 | 0,112 | 0,6411715 | 0,0565015 | 0,000 | 0,056 |

Nota: Modelos do CMIP6, CORREL, ERRO_P, AVAL_S, AVAL_I e classificação final – AVAL_F para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$

APÊNDICE B – Climatologia histórica das áreas de interesse (1911-2018)

Figura 26 – Climatologia histórica em Paraibuna



Legenda: Período de 1911-2018 (a) Precipitação média e média móvel de 10 anos e (b) Temperatura média e média móvel de 10 anos.

Figura 27 – Climatologia histórica em Santa Branca (continua)

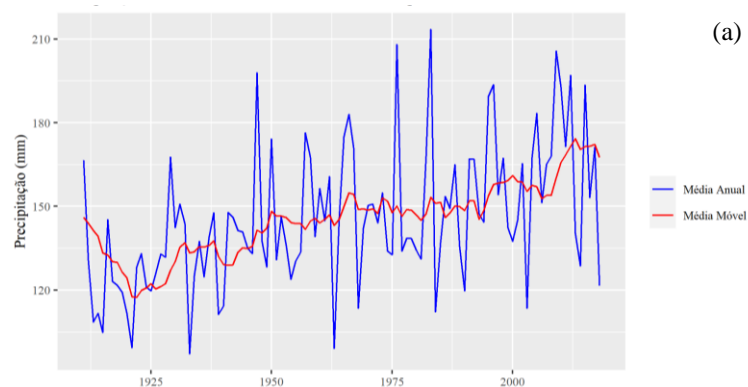
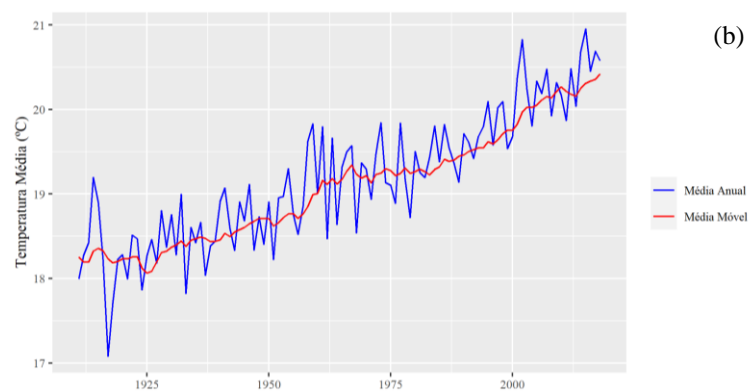
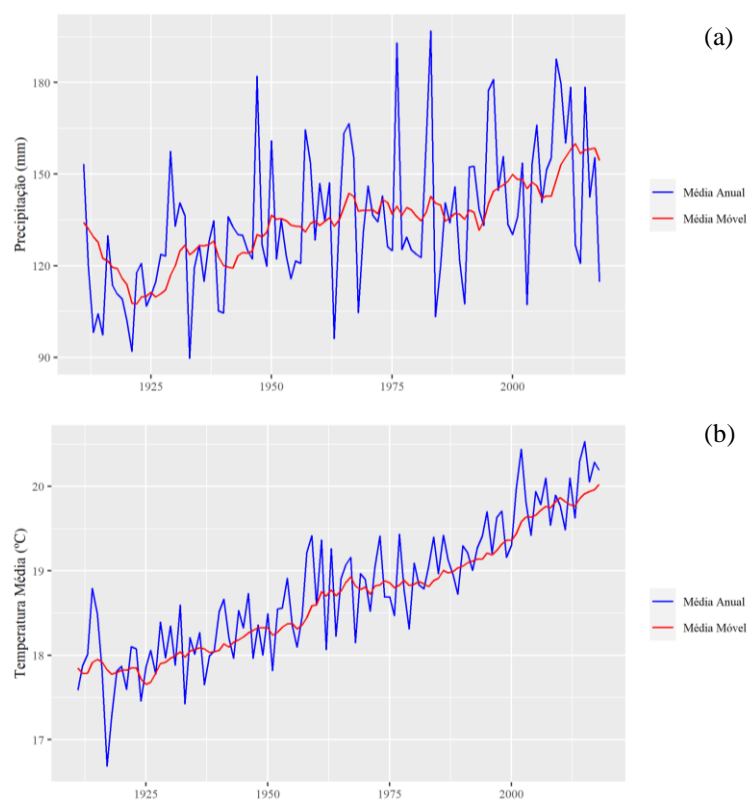


Figura 27 – Climatologia histórica em Santa Branca (continua)



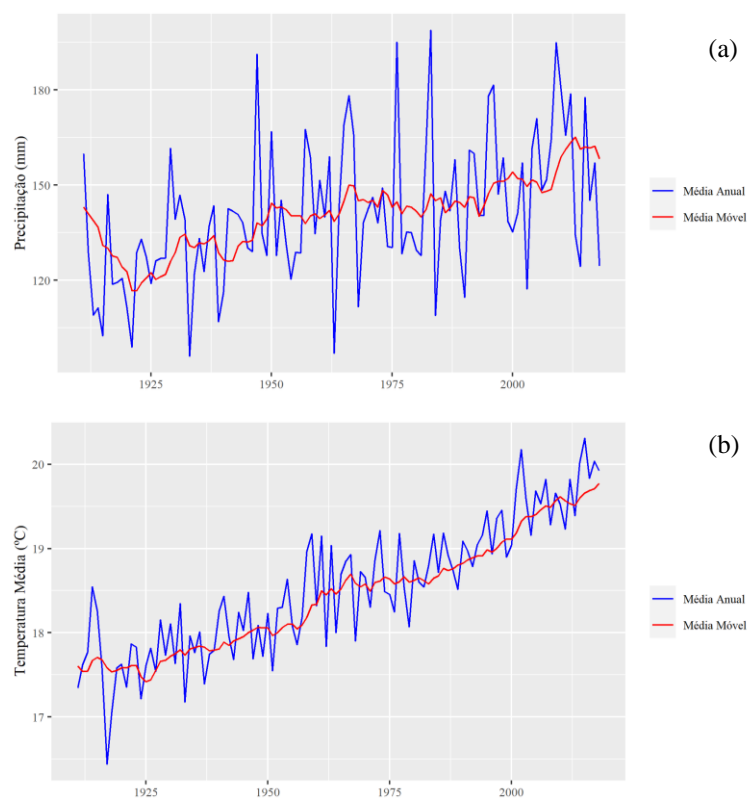
Legenda: Período de 1911-2018 (a) Precipitação média e média móvel de 10 anos e (b) Temperatura média e média móvel de 10 anos.

Figura 28 – Climatologia histórica em Jaguari



Legenda: Período de 1911-2018 (a) Precipitação média e média móvel de 10 anos e (b) Temperatura média e média móvel de 10 anos.

Figura 29 – Climatologia histórica em Funil



Legenda: Período de 1911-2018 (a) Precipitação média e média móvel de 10 anos e (b) Temperatura média e média móvel de 10 anos.

Figura 30 – Climatologia histórica em Santa Cecília (continua)

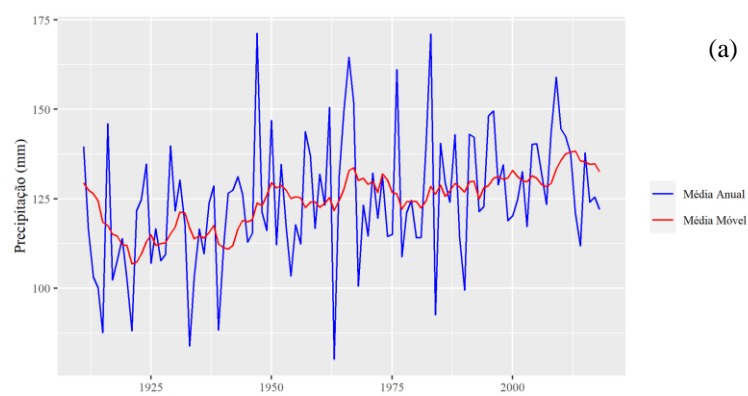
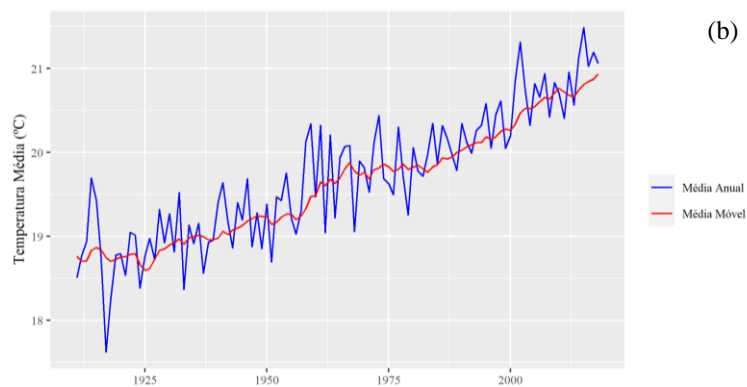
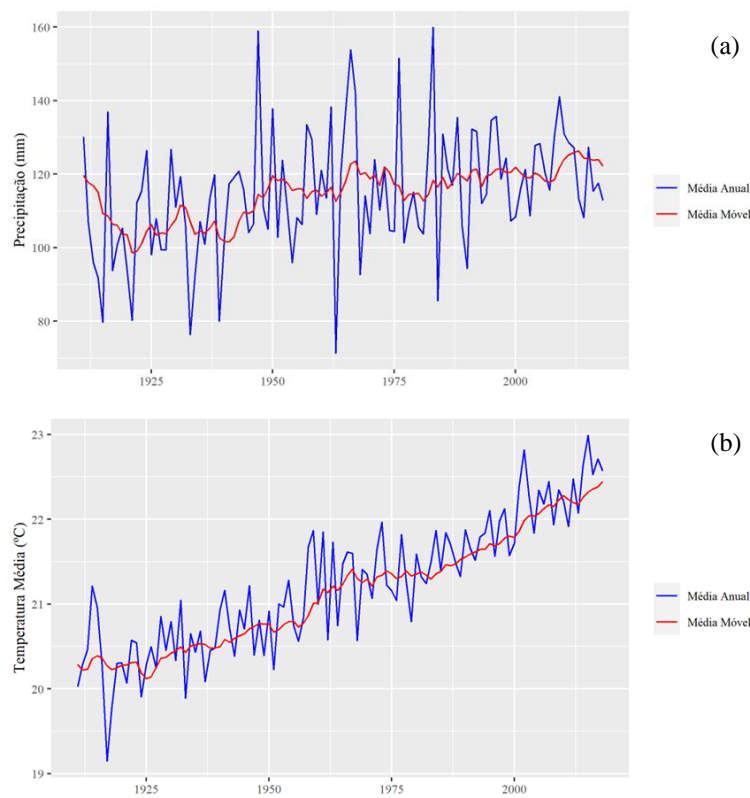


Figura 30 – Climatologia histórica em Santa Cecília (continua)



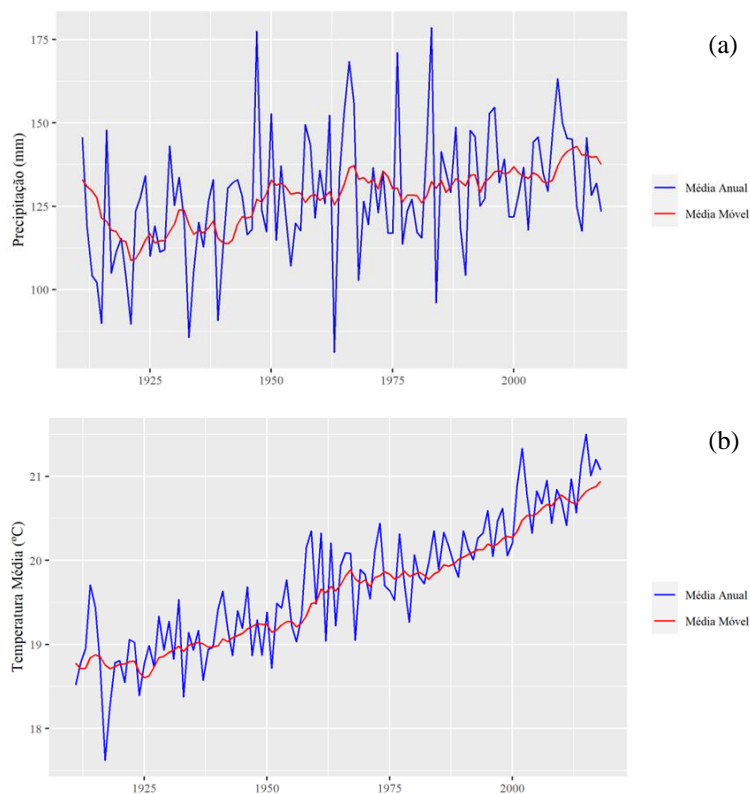
Legenda: Período de 1911-2018 (a) Precipitação média e média móvel de 10 anos e (b) Temperatura média e média móvel de 10 anos.

Figura 31 – Climatologia histórica em Santana



Legenda: Período de 1911-2018 (a) Precipitação média e média móvel de 10 anos e (b) Temperatura média e média móvel de 10 anos.

Figura 32 – Climatologia histórica em Tocos



Legenda: Período de 1911-2018 (a) Precipitação média e média móvel de 10 anos e (b) Temperatura média e média móvel de 10 anos.

Figura 33 – Climatologia histórica em Sobragi (continua)

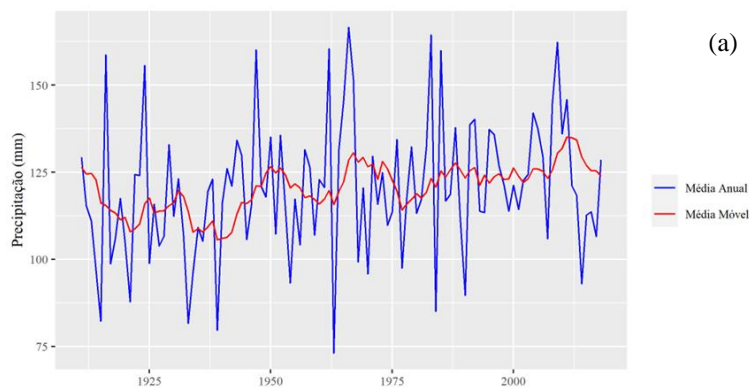
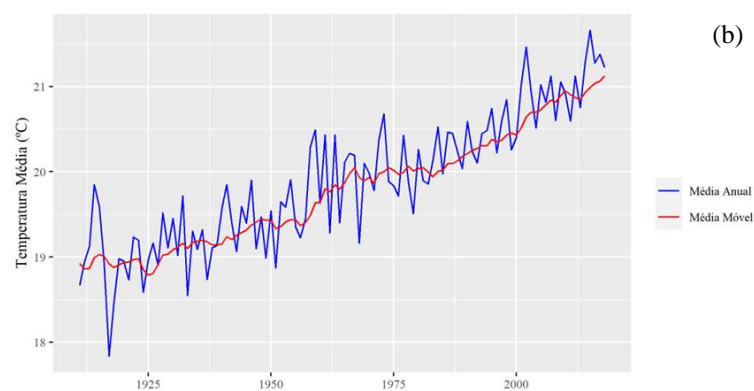
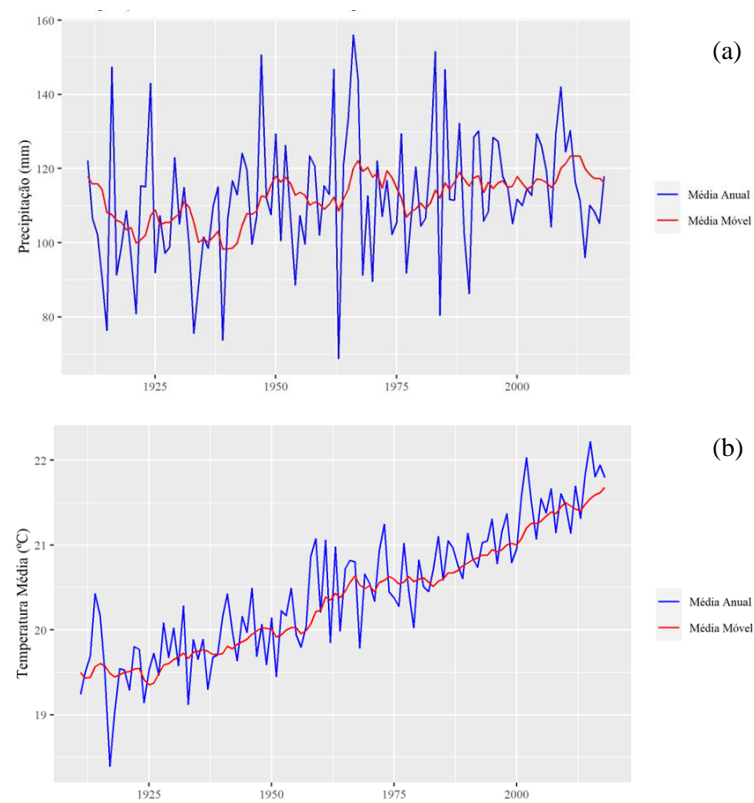


Figura 33 – Climatologia histórica em Sobragi (continua)



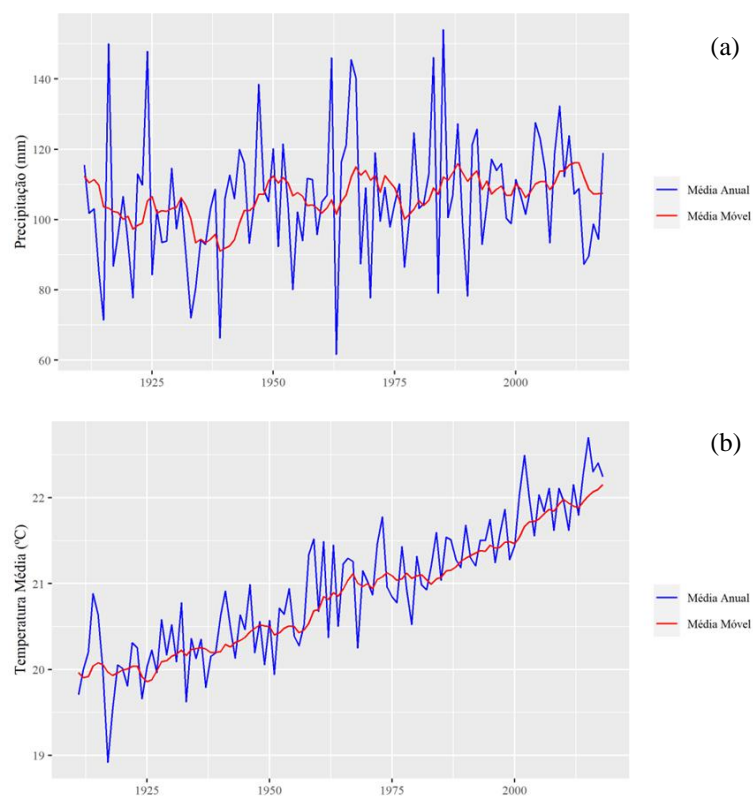
Legenda: Período de 1911-2018 (a) Precipitação média e média móvel de 10 anos e (b) Temperatura média e média móvel de 10 anos.

Figura 34 – Climatologia histórica em Anta



Legenda: Período de 1911-2018 (a) Precipitação média e média móvel de 10 anos e (b) Temperatura média e média móvel de 10 anos.

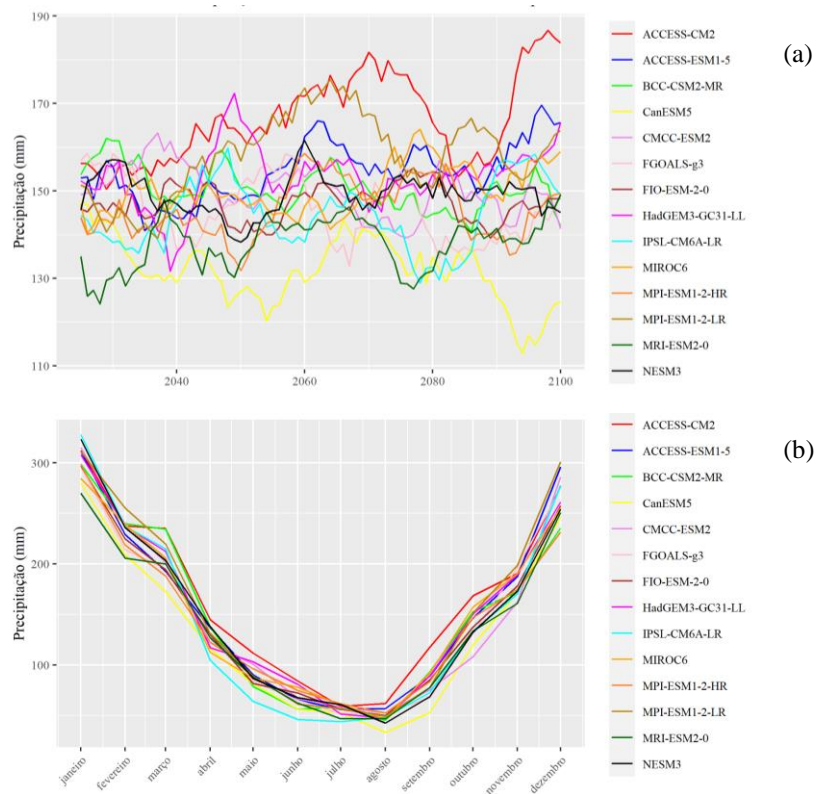
Figura 35 – Climatologia histórica em Ilha dos Pombos



Legenda: Período de 1911-2018 (a) Precipitação média e média móvel de 10 anos e (b) Temperatura média e média móvel de 10 anos.

APÊNDICE C – Climatologia e vazões projetadas das áreas de interesse (2015-2100)

Figura 36 – Precipitação projetada em Paraibuna no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 37 – Precipitação projetada em Paraibuna no cenário SSP5-8,5 (continua)

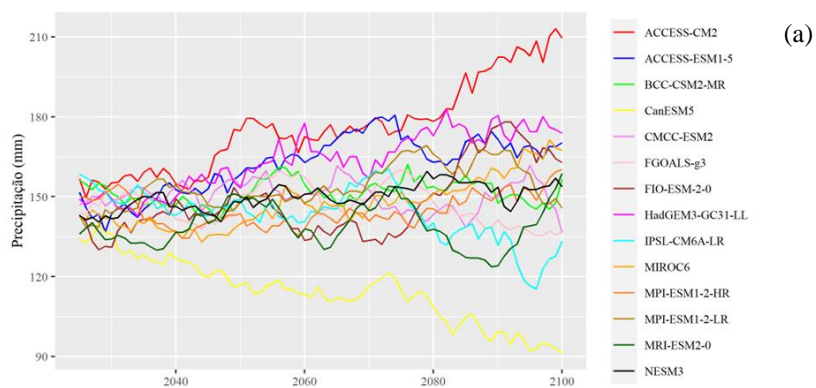
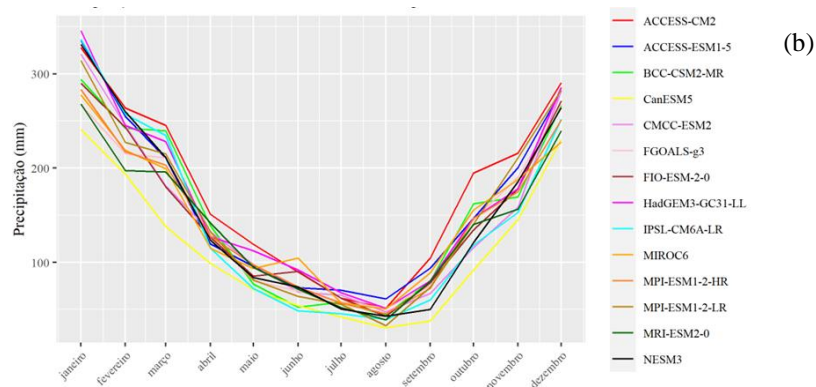
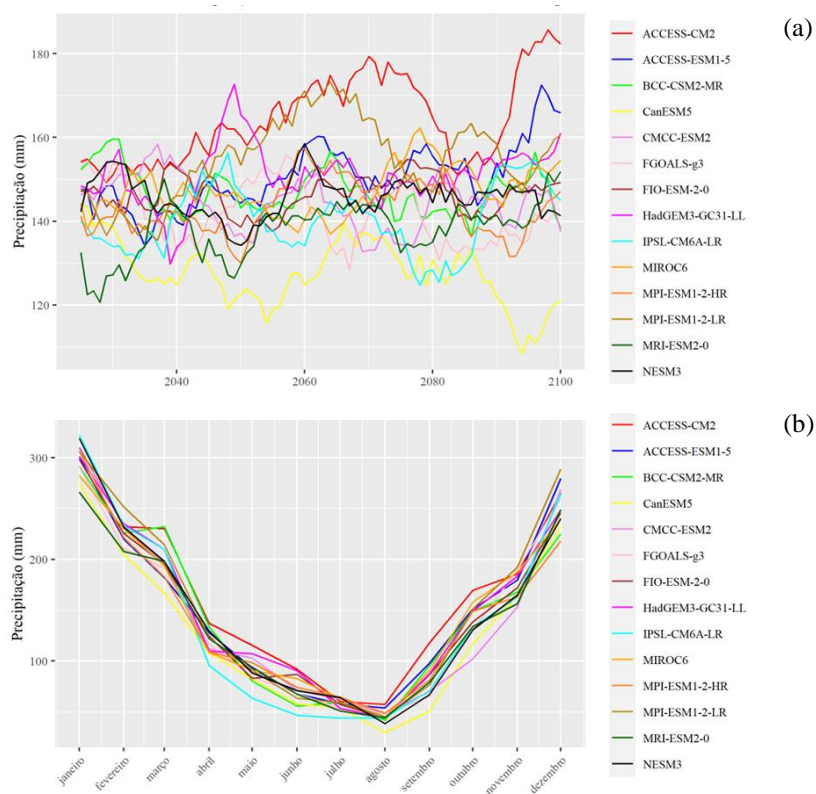


Figura 37 – Precipitação projetada em Paraibuna no cenário SSP5-8,5 (continua)



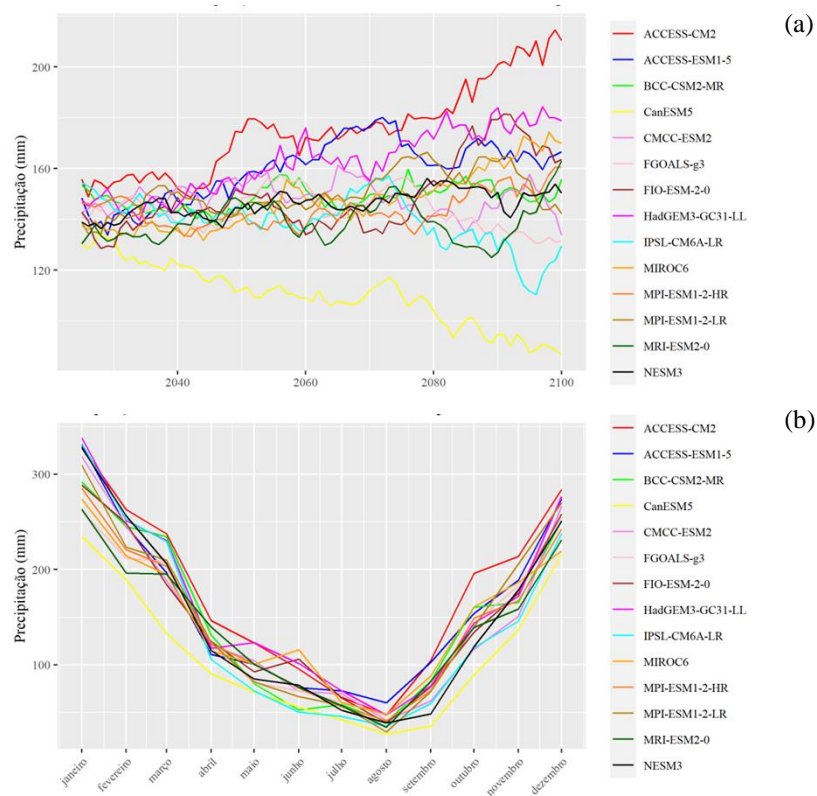
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 38 – Precipitação projetada em Santa Branca no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 39 – Precipitação projetada em Santa Branca no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 40 – Precipitação projetada em Jaguari no cenário SSP5-4,5 (continua)

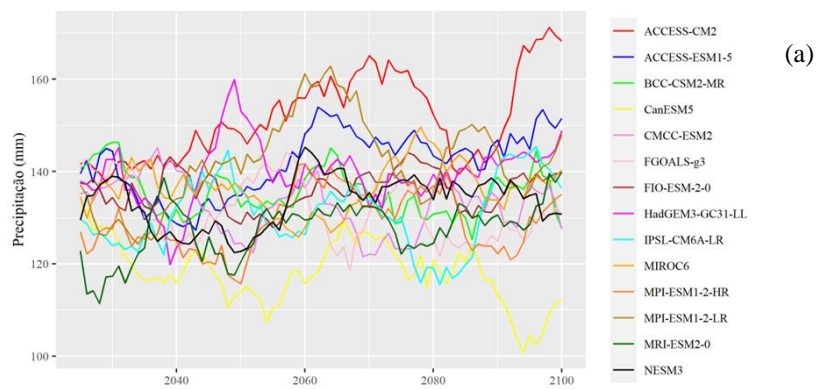
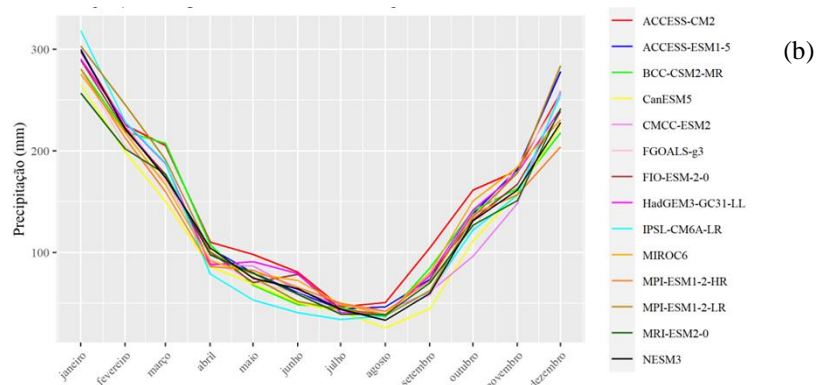
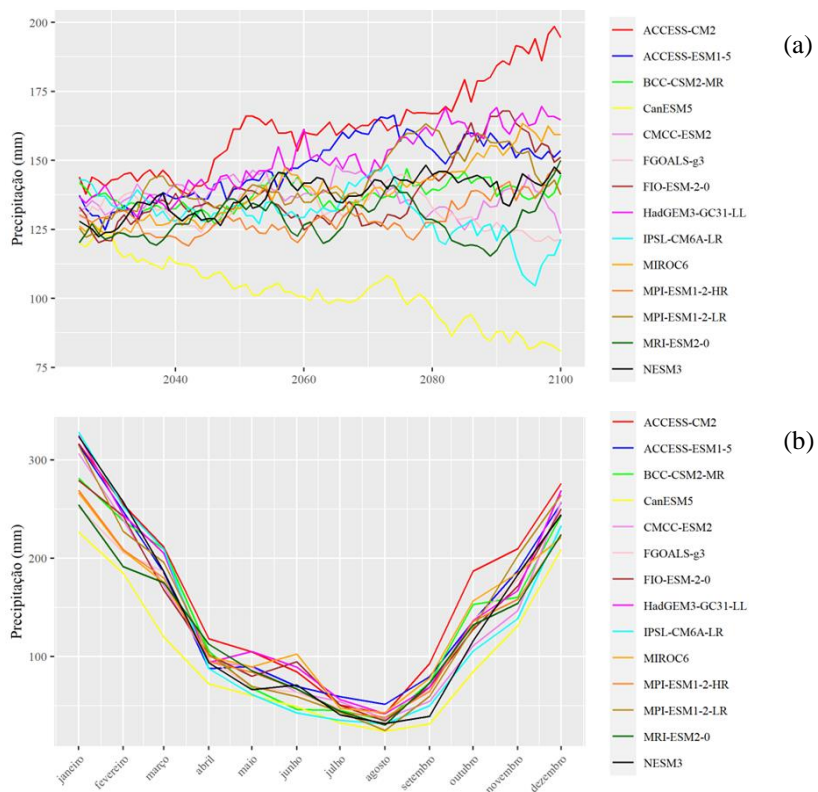


Figura 40 – Precipitação projetada em Jaguari no cenário SSP5-4,5 (continua)



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 41 – Precipitação projetada em Jaguari no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 42 – Precipitação projetada em Funil no cenário SSP2-4,5

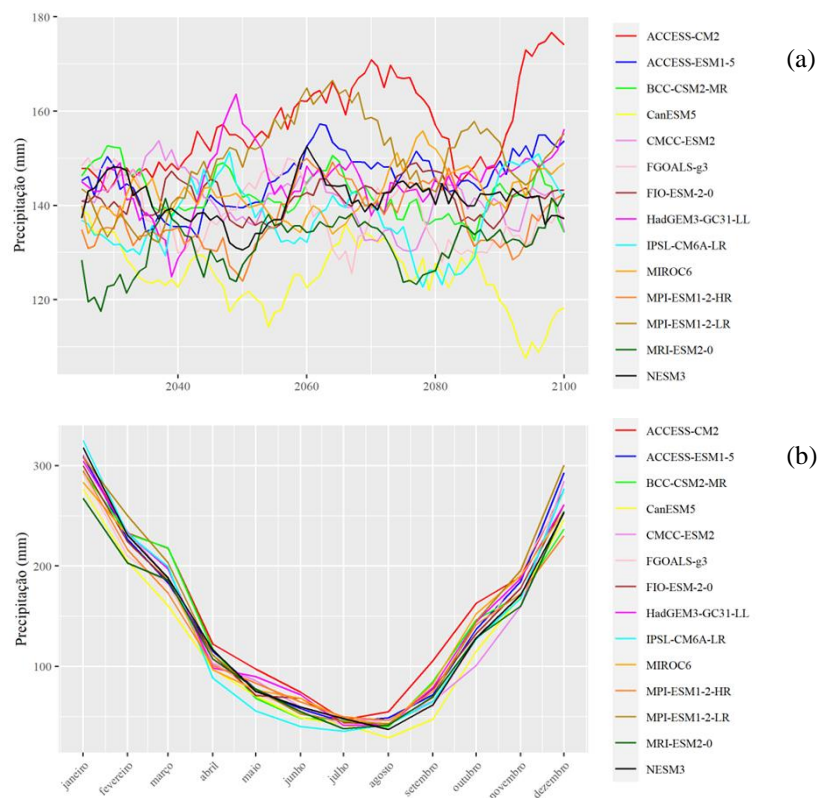


Figura 43 – Precipitação projetada em Funil no cenário SSP5-8,5 (continua)

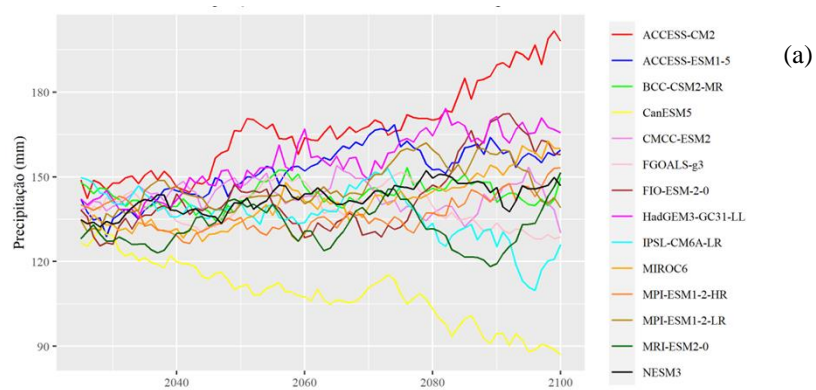
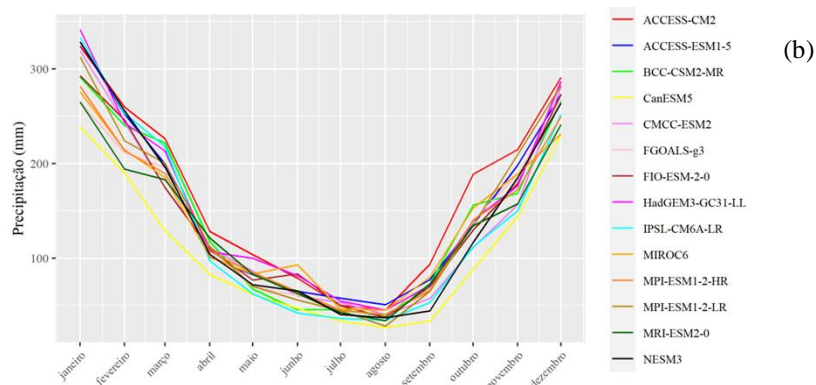
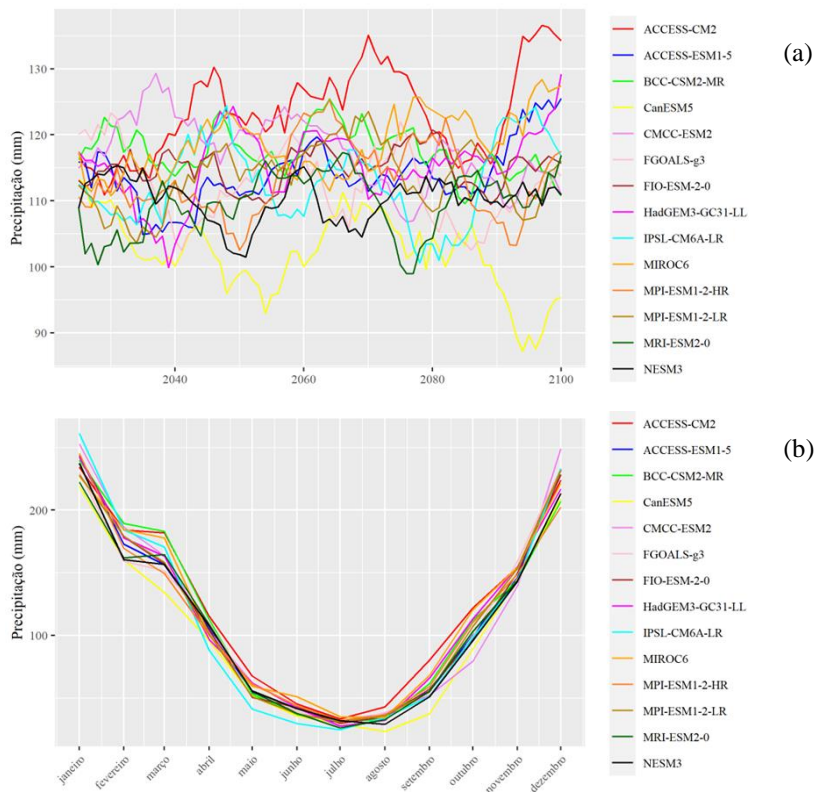


Figura 43 – Precipitação projetada em Funil no cenário SSP5-8,5 (continua)



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 44 – Precipitação projetada em Santana no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 45 – Precipitação projetada em Santana no cenário SSP5-8,5

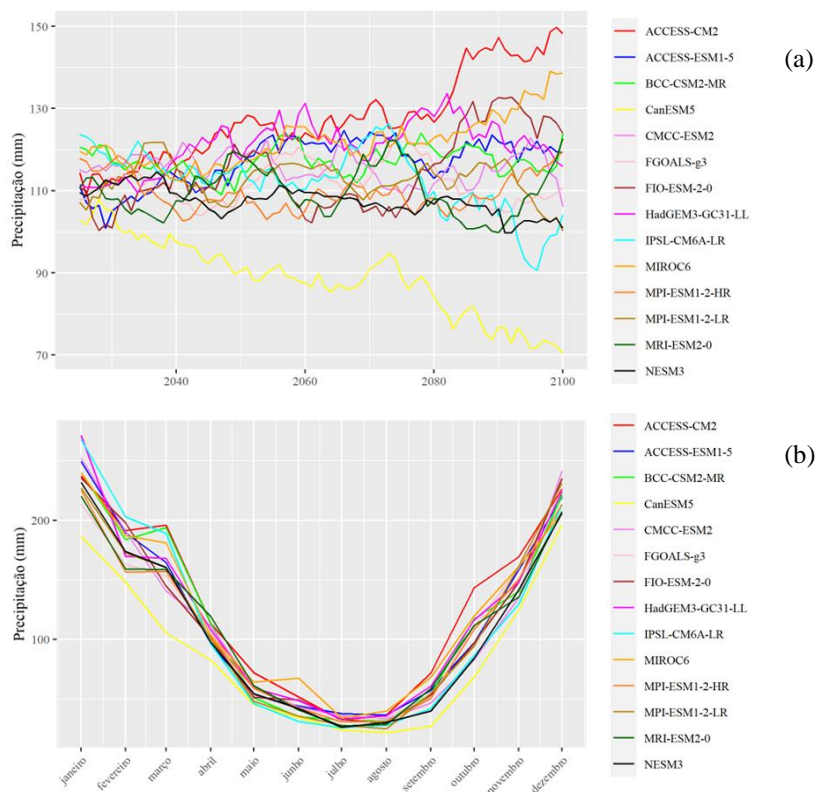
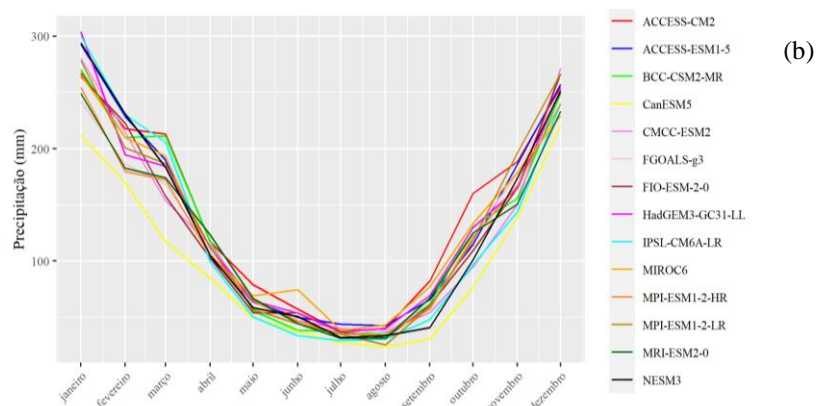


Figura 46 – Precipitação projetada em Tócos no cenário SSP5-8,5 (continua)

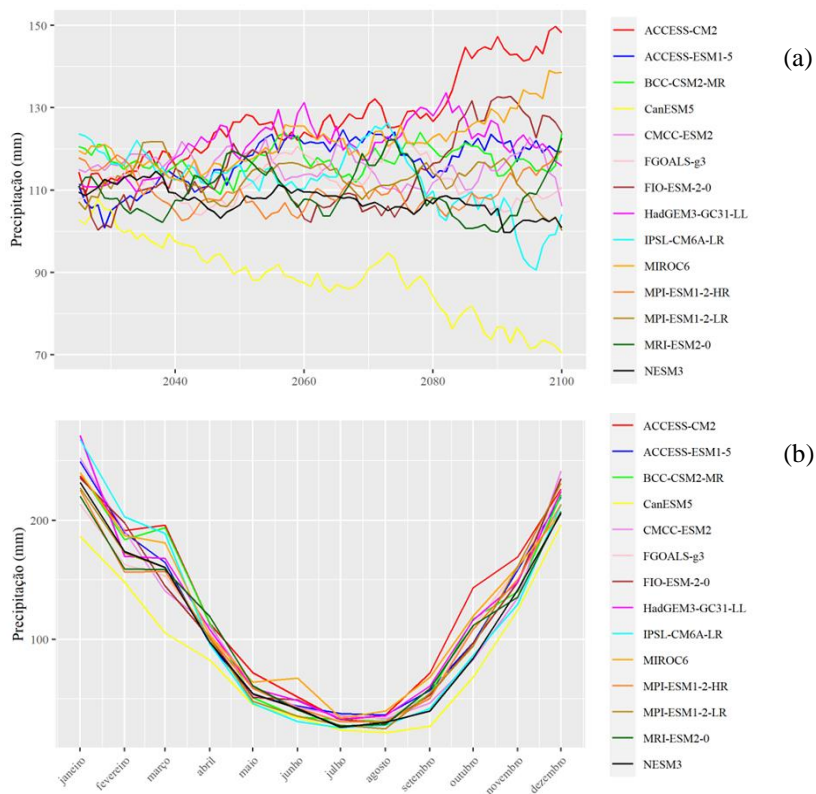


Figura 46 – Precipitação projetada em Tócos no cenário SSP5-8,5 (continua)



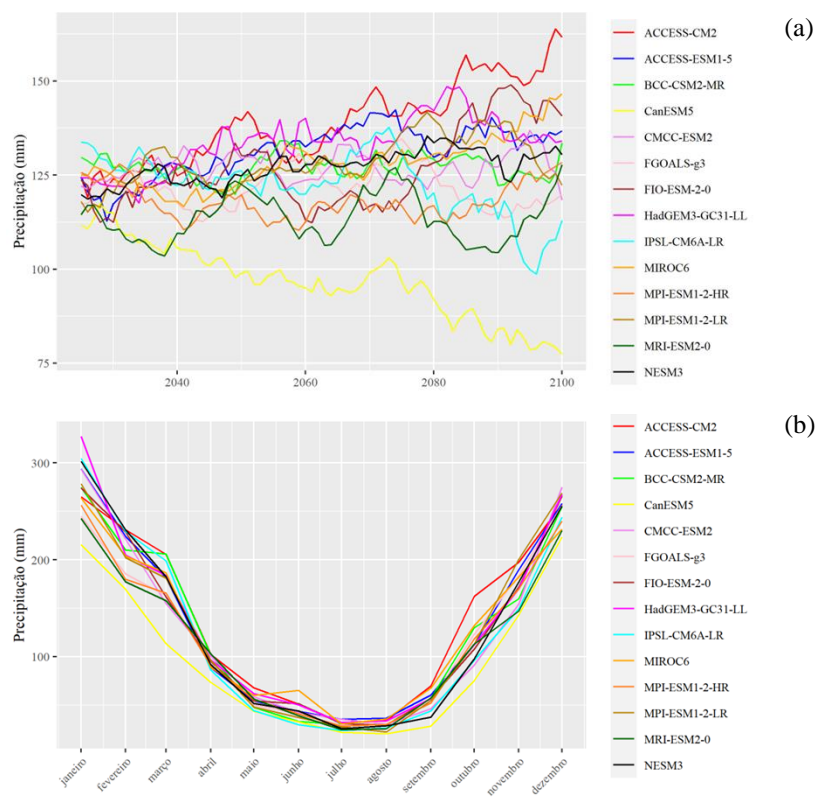
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 47 – Precipitação projetada em Santa Cecília no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 48 – Precipitação projetada em Santa Cecília no cenário SSP5-8,5

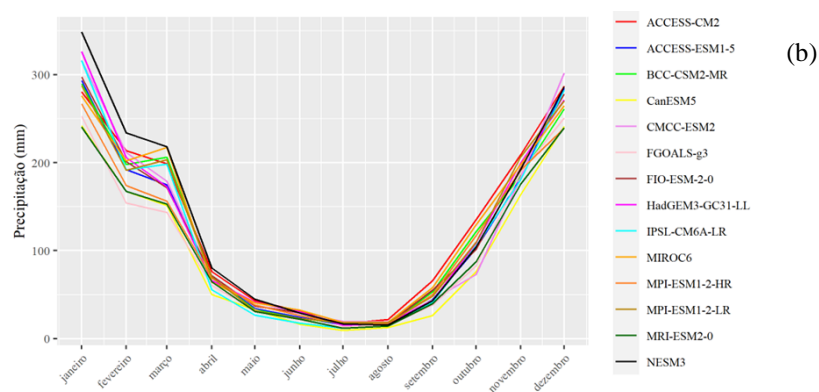


Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 49 – Precipitação projetada em Sobragi no cenário SSP2-4,5 (continua)

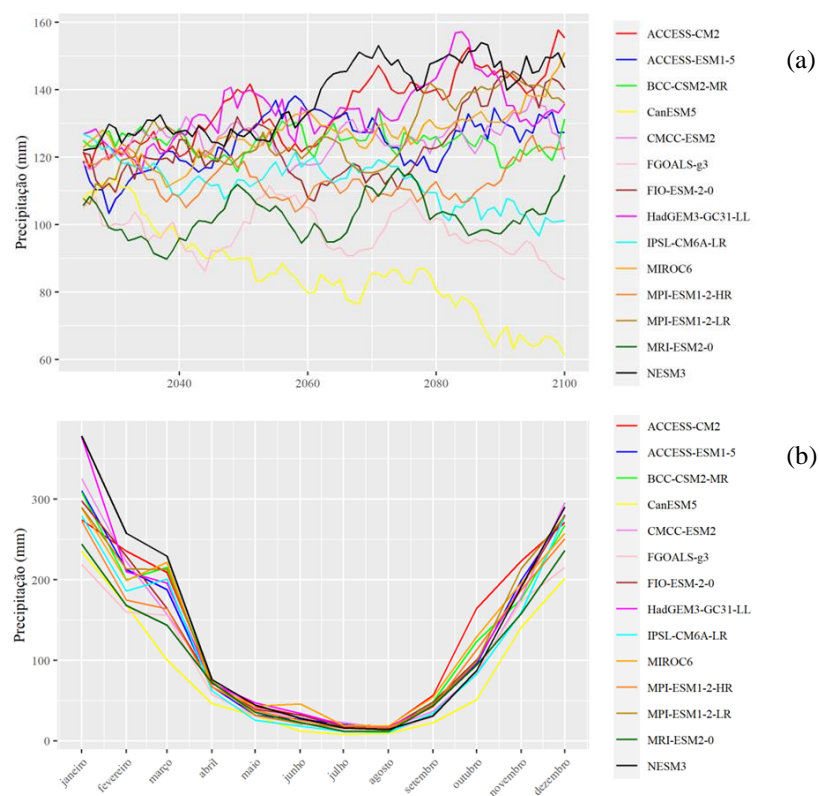


Figura 49 – Precipitação projetada em Sobragi no cenário SSP2-4,5 (continua)



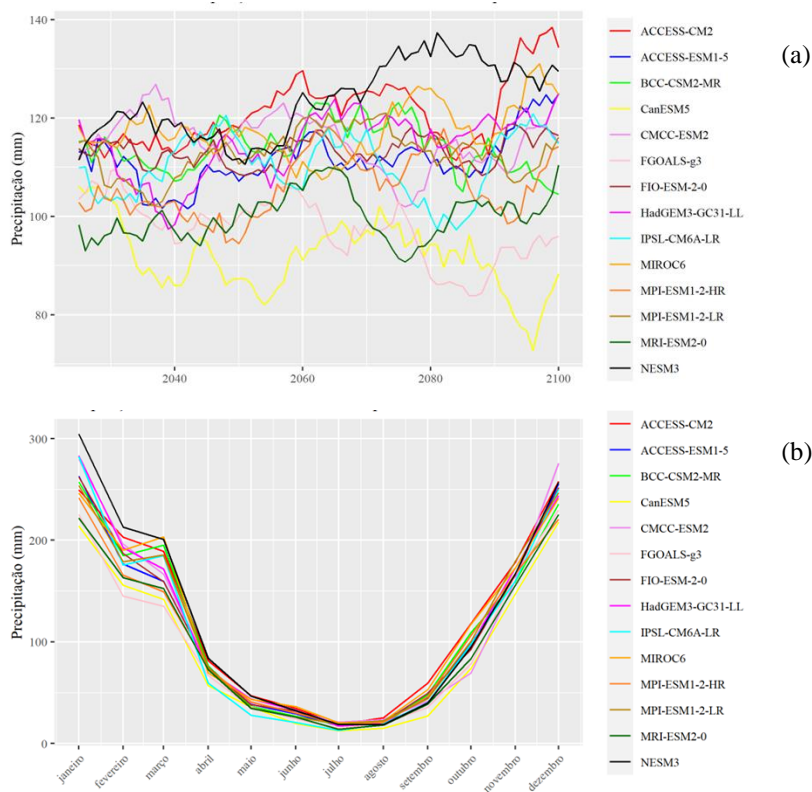
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 50 – Precipitação projetada em Sobragi no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 51 – Precipitação projetada em Anta no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 52 – Precipitação projetada em Anta no cenário SSP5-8,5 (continua)

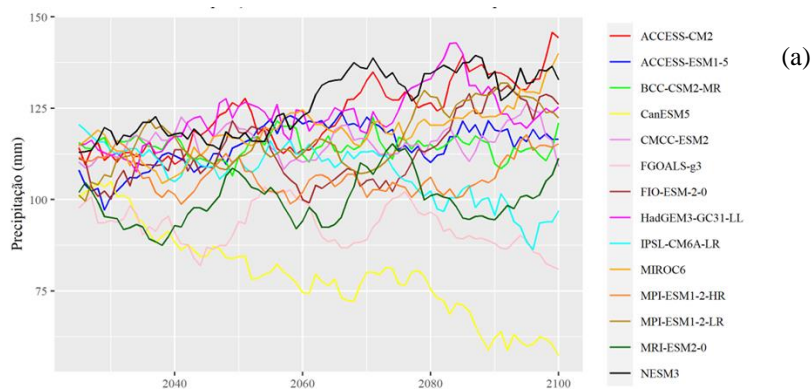
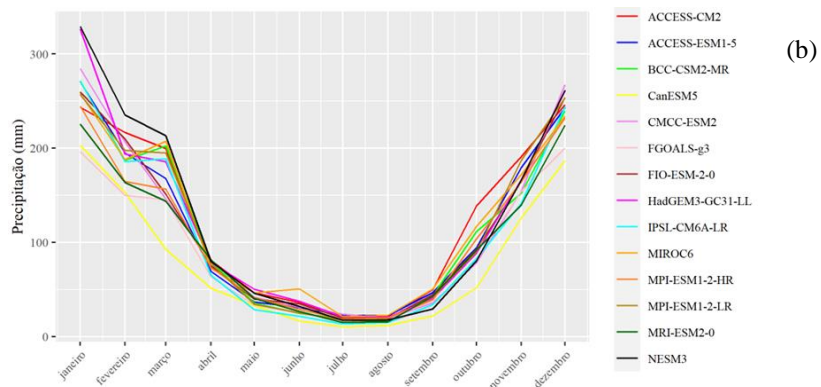
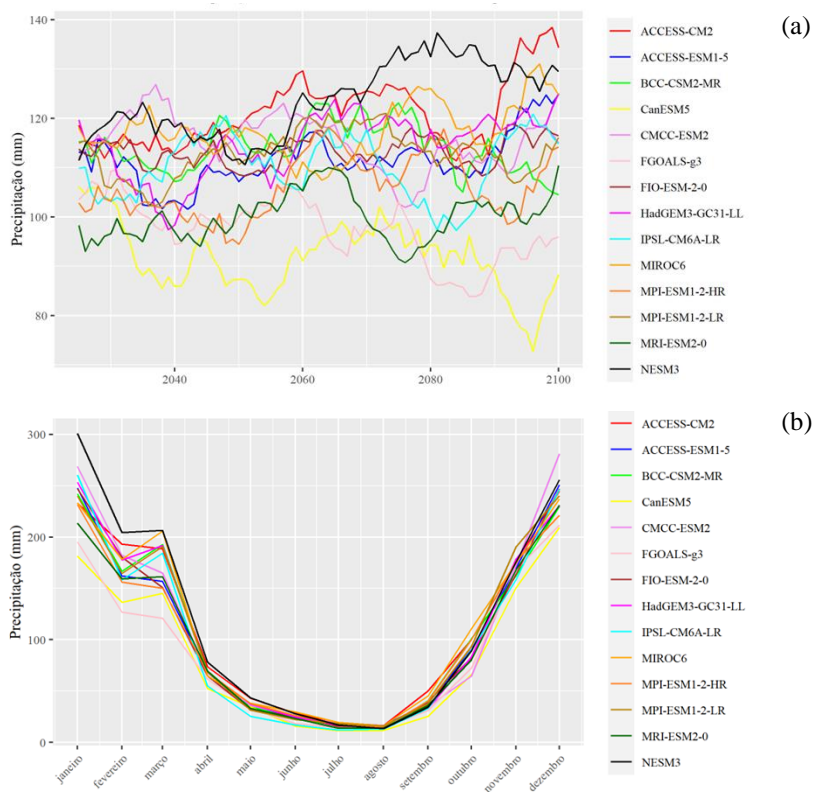


Figura 52 – Precipitação projetada em Anta no cenário SSP5-8,5 (continua)



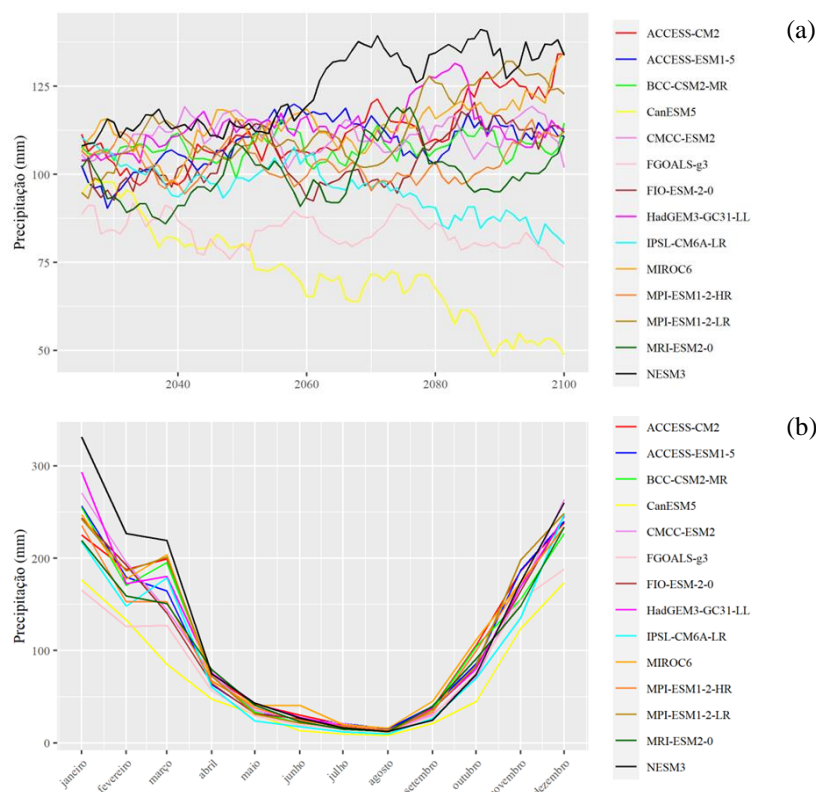
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 53 – Precipitação projetada em Ilha dos Pombos no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 54 – Precipitação projetada em Ilha dos Pombos no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 55 – Temperatura média projetada em Paraibuna no cenário SSP2-4,5 (continua)

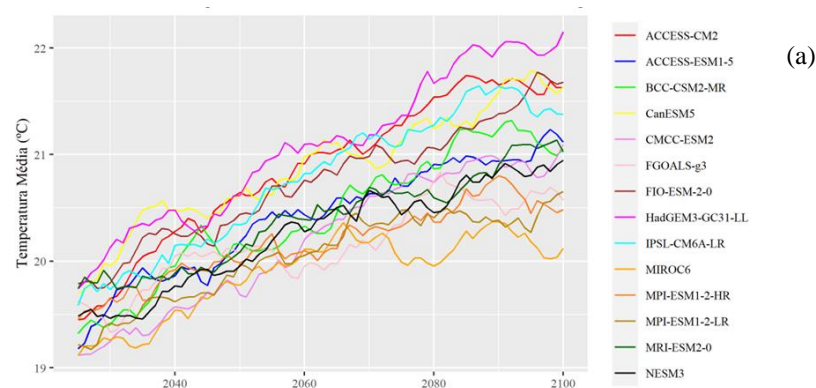
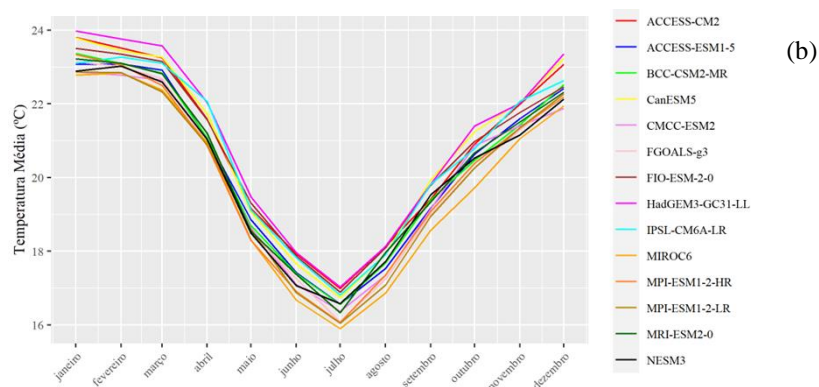
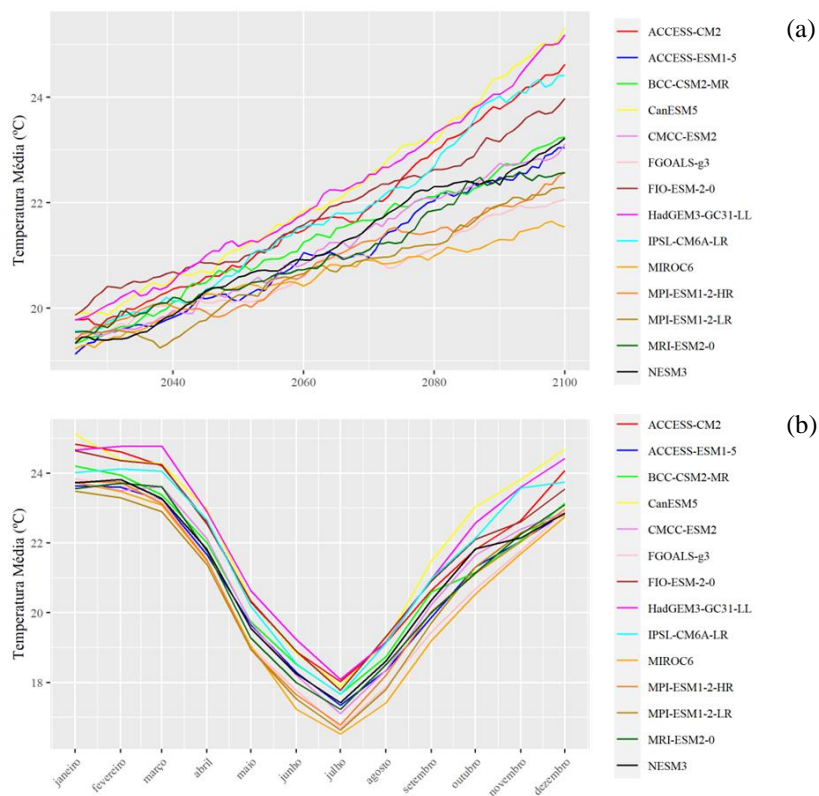


Figura 55 – Temperatura média projetada em Paraibuna no cenário SSP2-4,5 (continua)



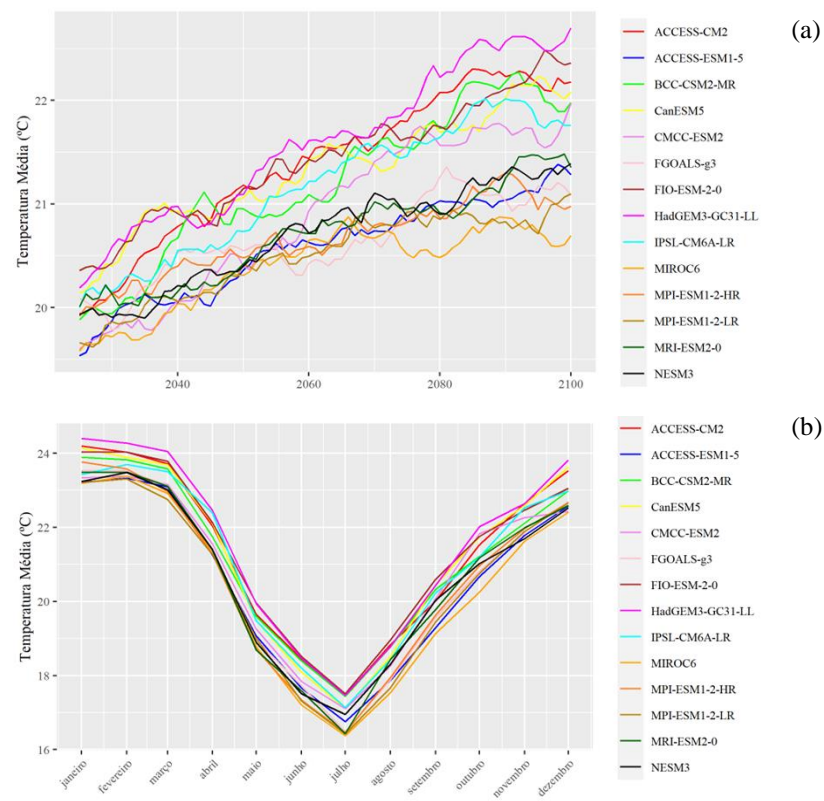
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 56 – Temperatura média projetada em Paraibuna no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 57 – Temperatura média projetada em Santa Branca no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 58 – Temperatura média projetada em Santa Branca no cenário SSP5-8,5 (continua)

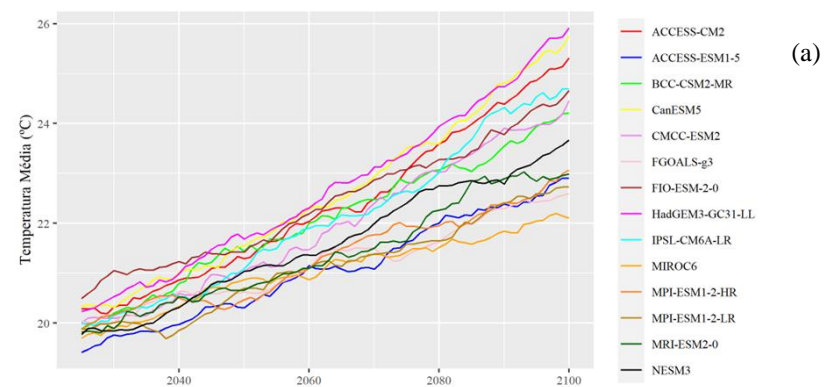
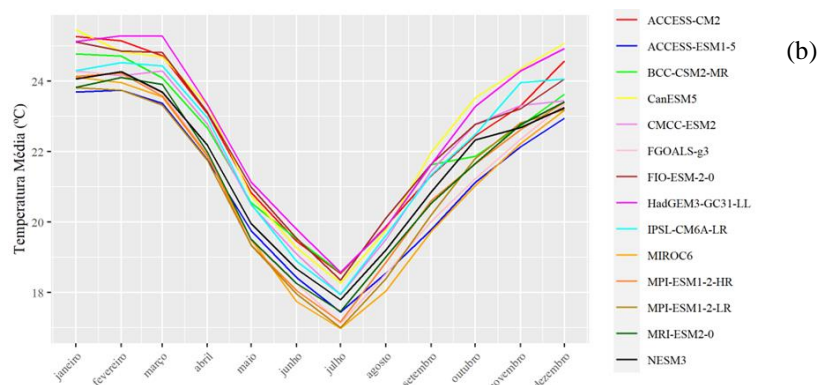
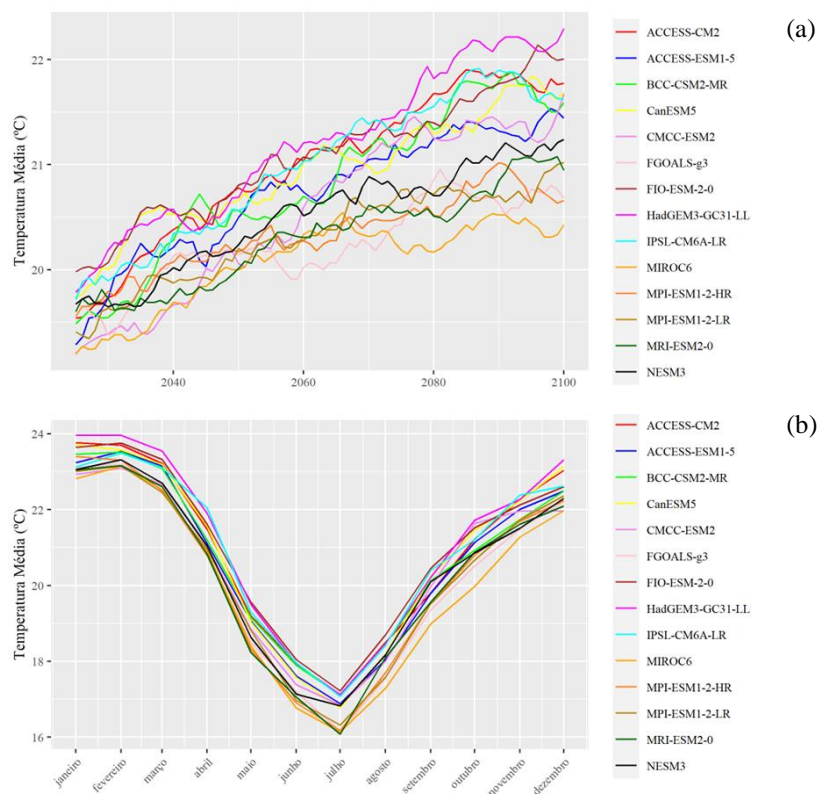


Figura 58 – Temperatura média projetada em Santa Branca no cenário SSP5-8,5 (continua)



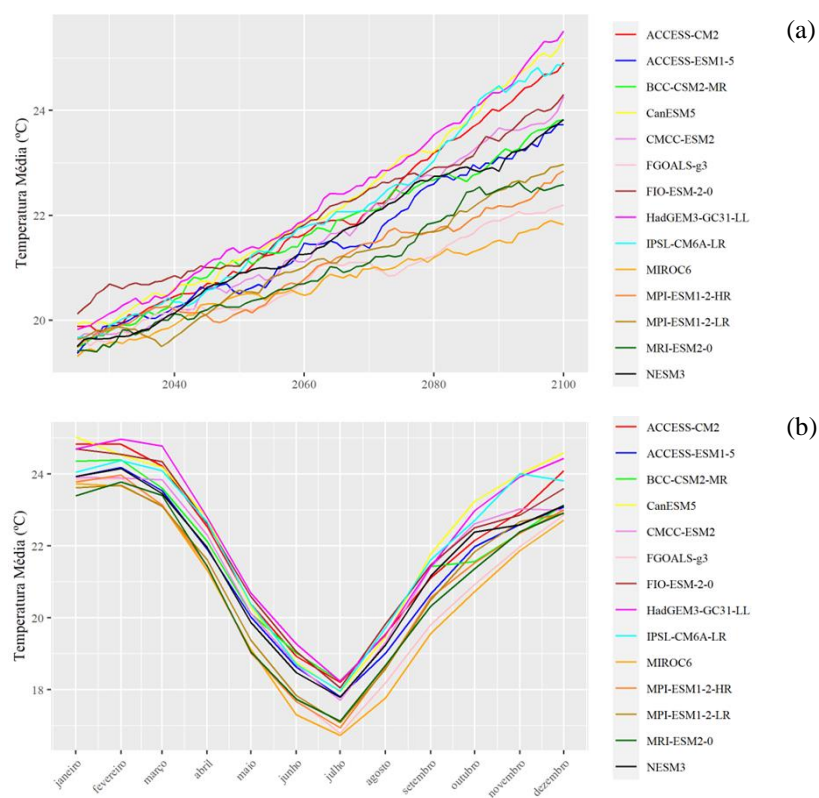
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 59 – Temperatura média projetada em Jaguari no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 60 – Temperatura média projetada em Jaguari no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 61 – Temperatura média projetada em Funil no cenário SSP2-4,5 (continua)

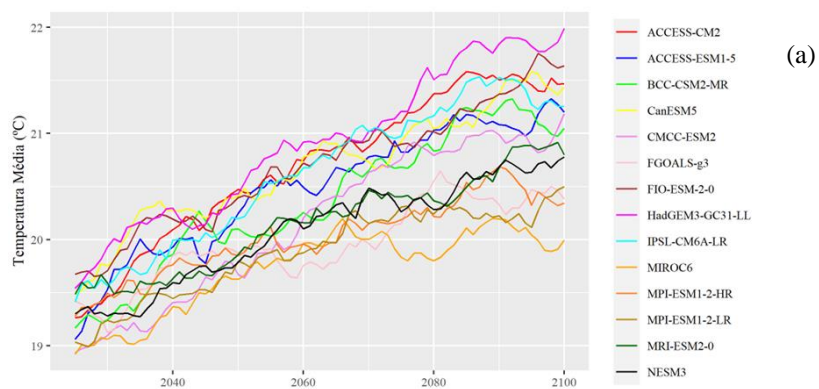
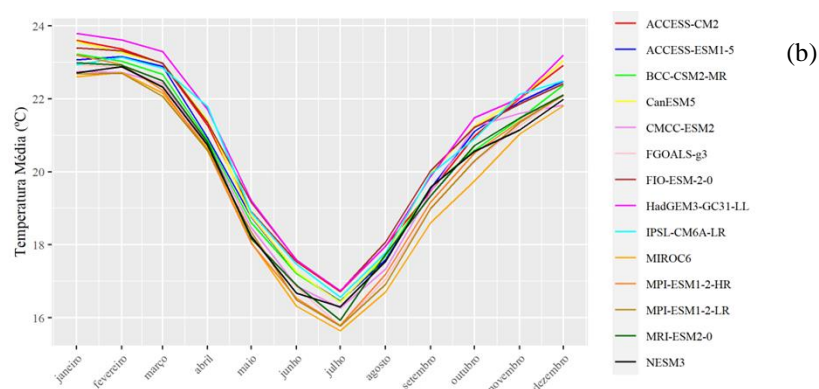
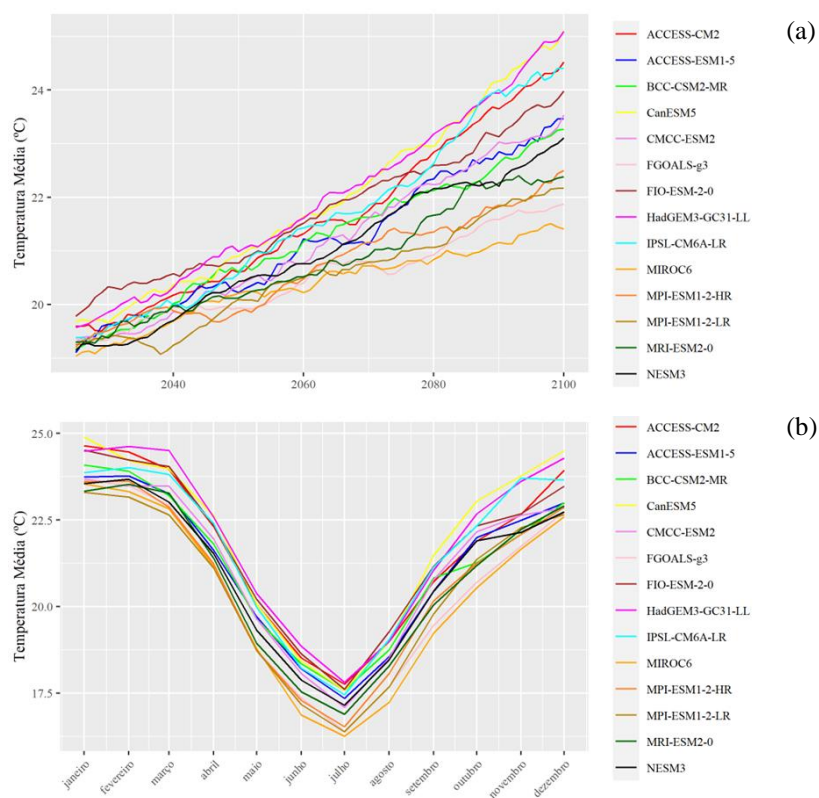


Figura 61 – Temperatura média projetada em Funil no cenário SSP2-4,5 (continua)



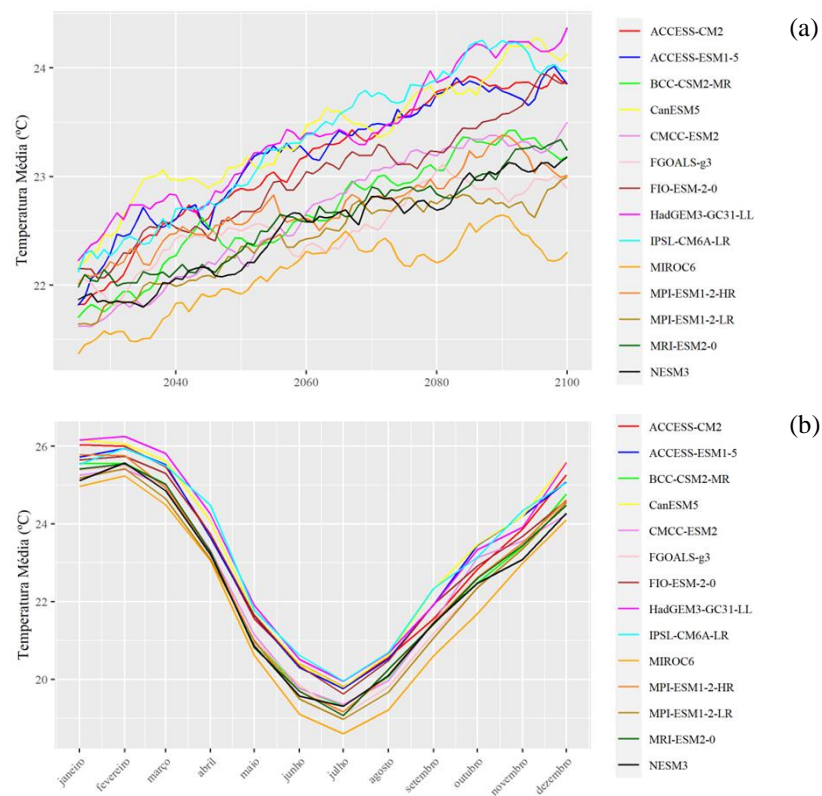
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 62 – Temperatura média projetada em Funil no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 63 – Temperatura média projetada em Santana no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 64 – Temperatura média projetada em Santana no cenário SSP5-8,5 (continua)

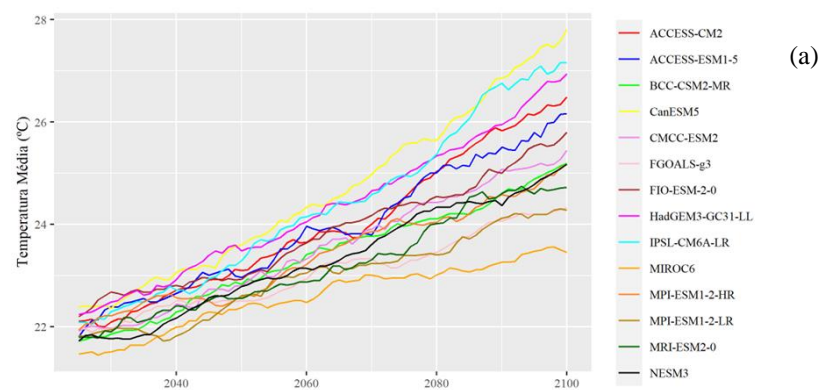
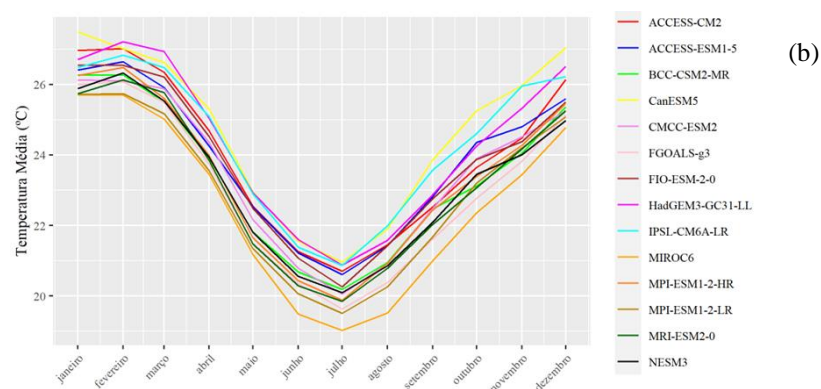
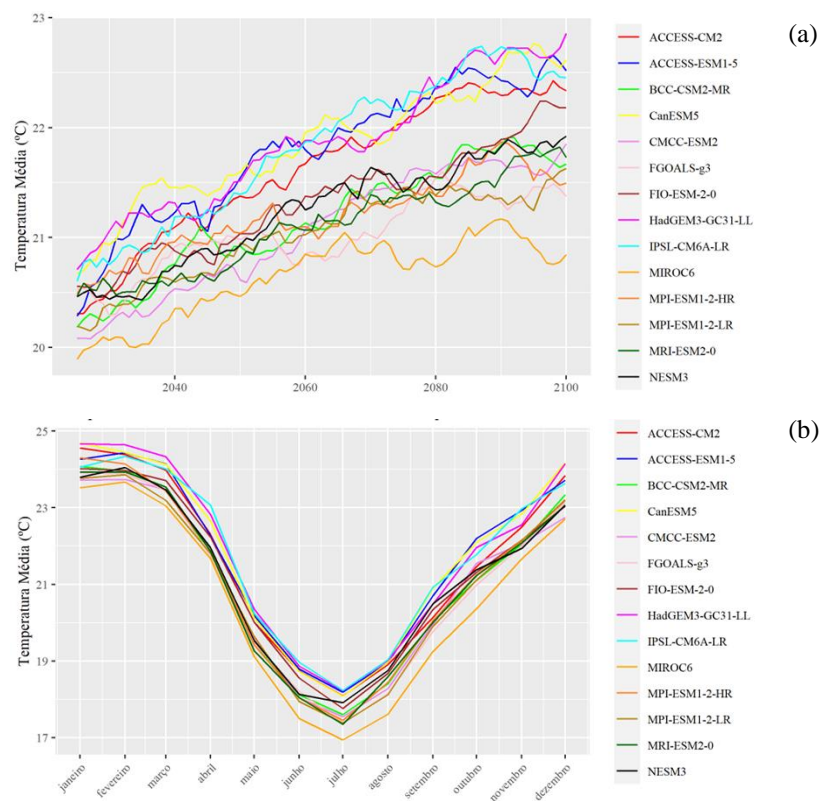


Figura 64 – Temperatura média projetada em Santana no cenário SSP5-8,5 (continua)



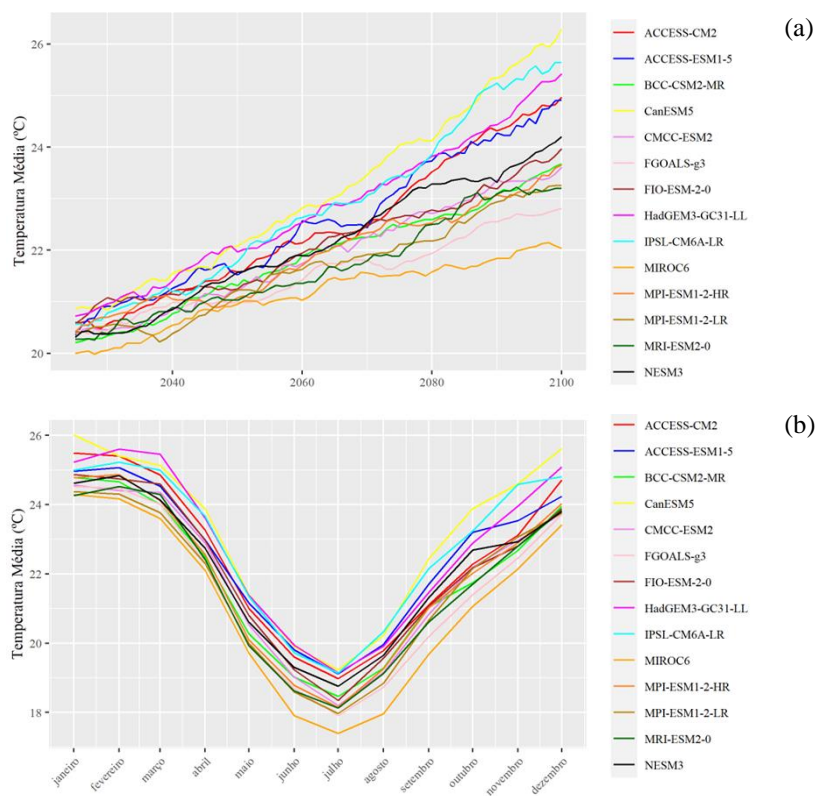
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 65 – Temperatura média projetada em Tócos no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 66 – Temperatura média projetada em Tócos no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 67 – Temperatura média projetada em Santa Cecília no cenário SSP2-4,5 (continua)

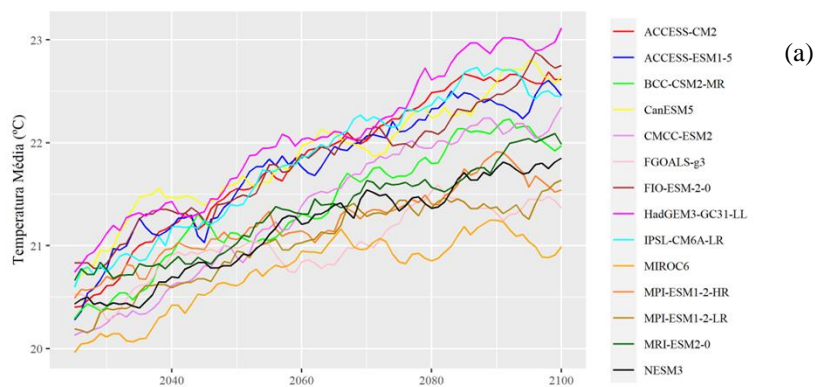
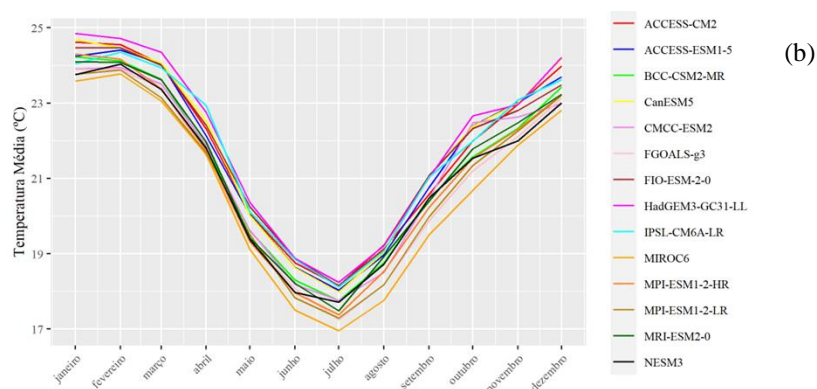
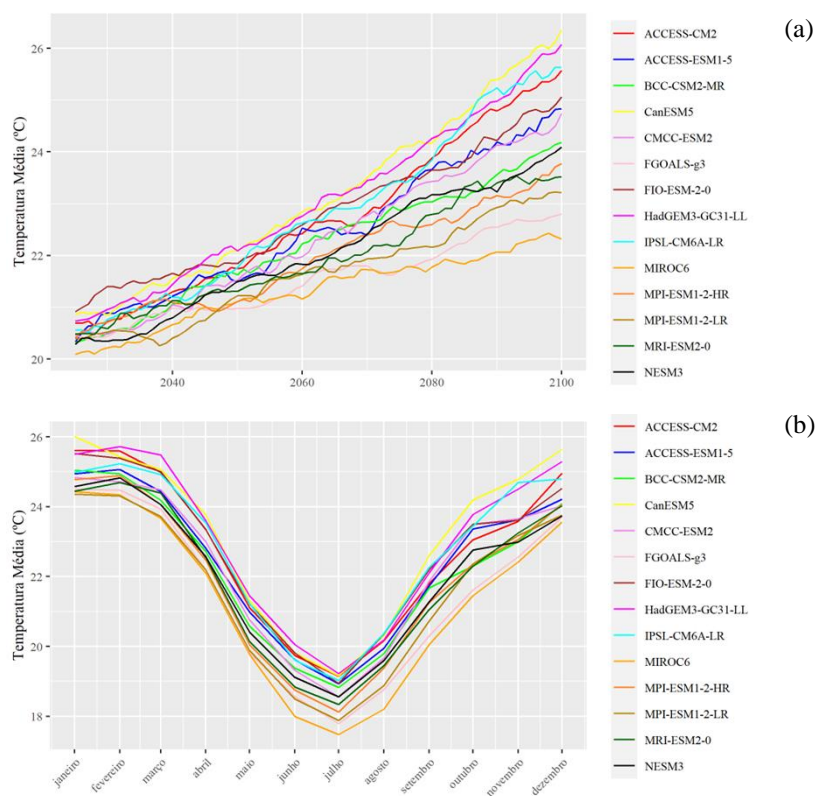


Figura 67 – Temperatura média projetada em Santa Cecília no cenário SSP2-4,5 (continua)



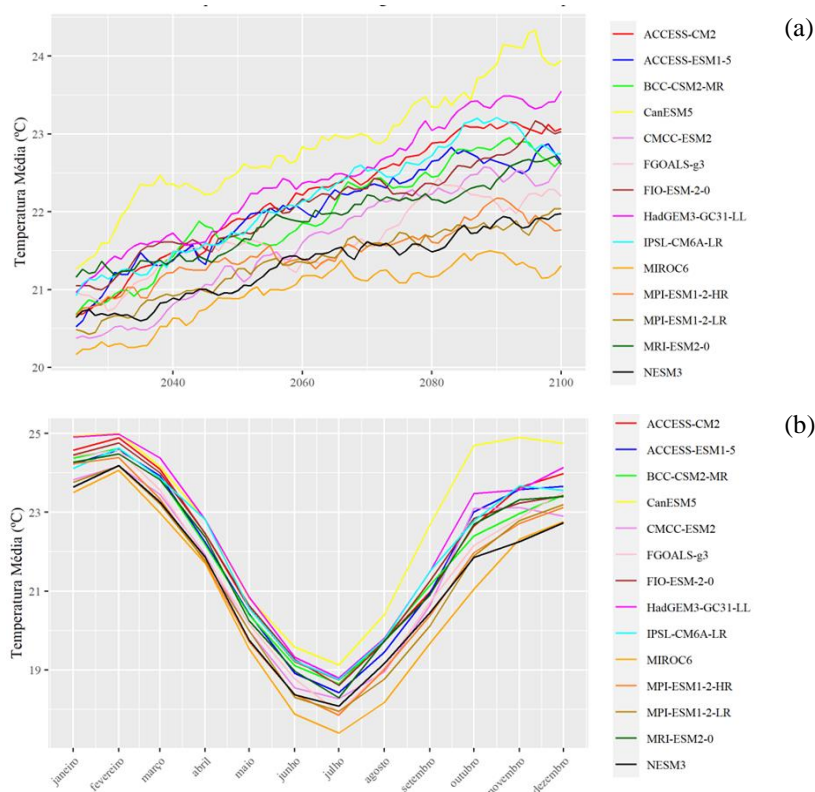
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 68 – Temperatura média projetada em Santa Cecília no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 69 – Temperatura média projetada em Sobragi no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 70 – Temperatura média projetada em Sobragi no cenário SSP5-8,5 (continua)

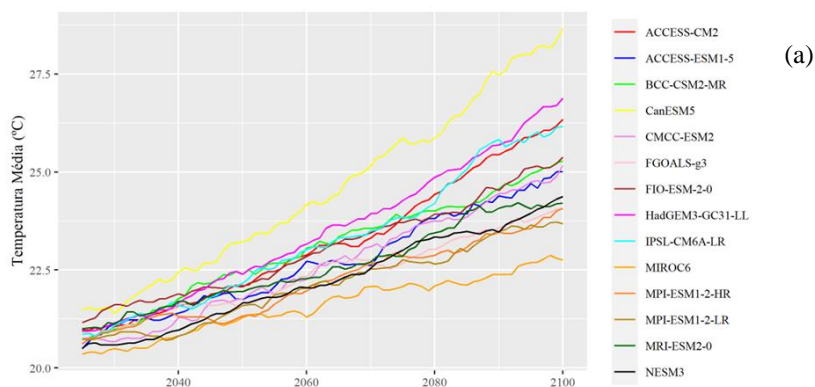
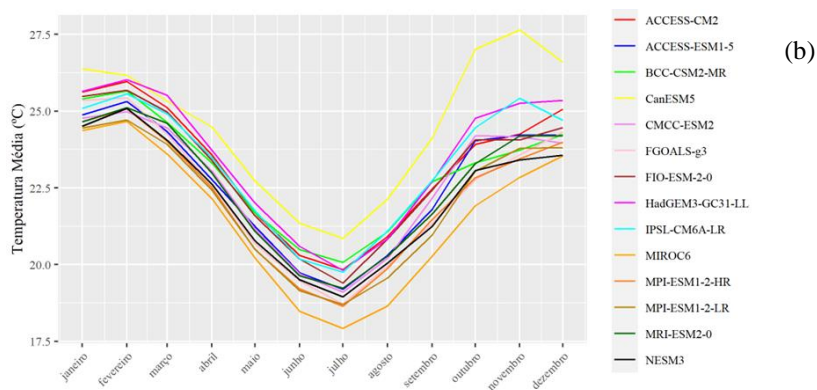
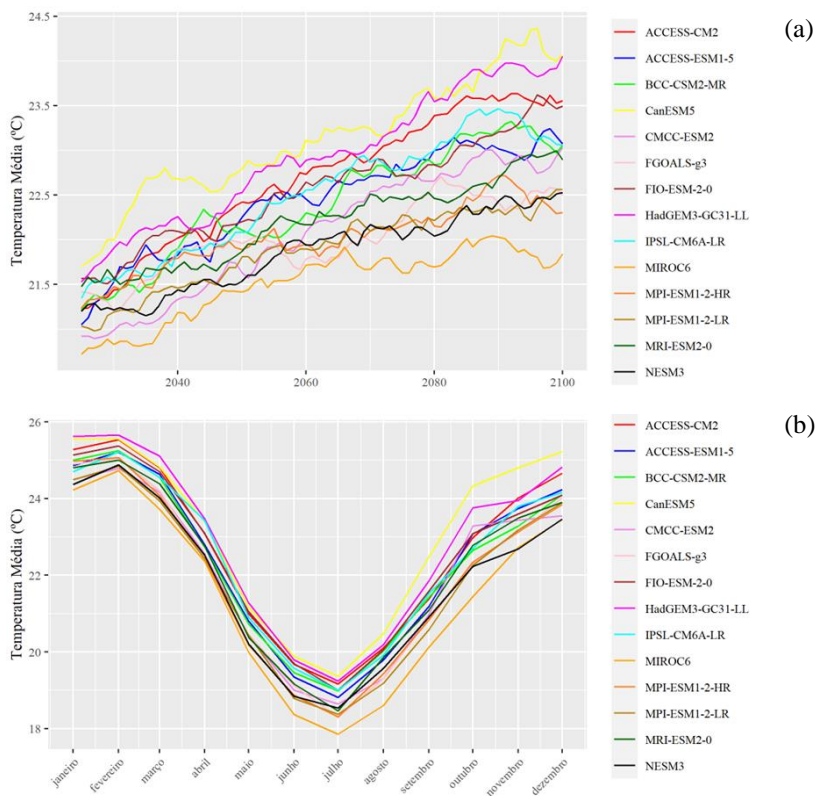


Figura 70 – Temperatura média projetada em Sobragi no cenário SSP5-8,5 (continua)



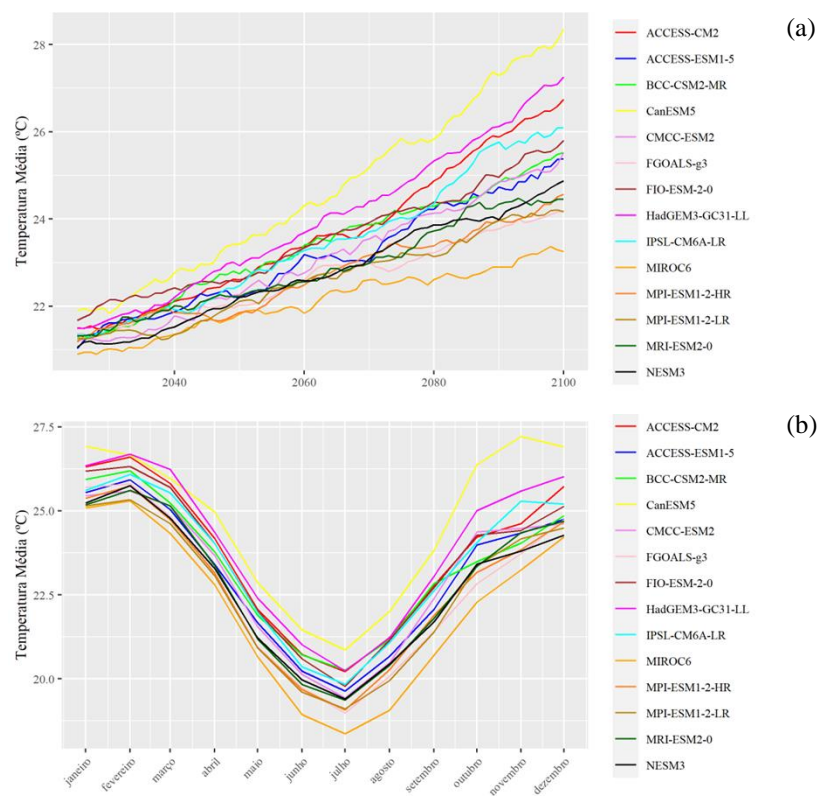
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 71 – Temperatura média projetada em Anta no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 72 – Temperatura média projetada em Anta no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 73 – Temperatura média projetada em Ilha dos Pombos no cenário SSP2-4,5 (continua)

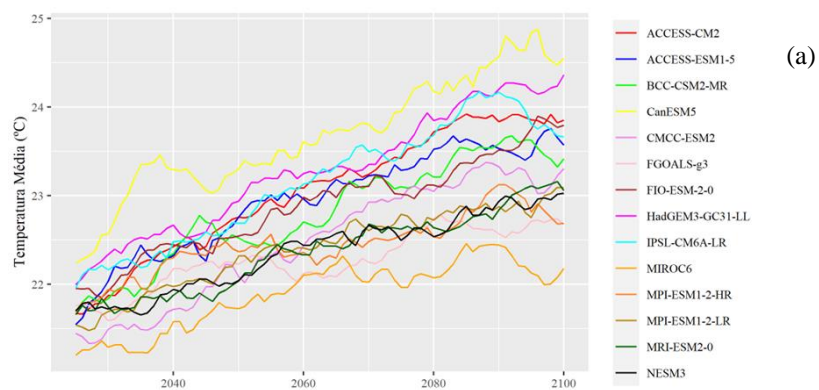
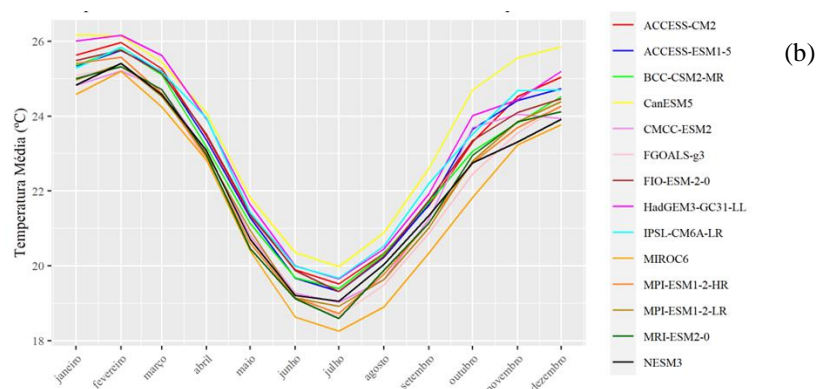
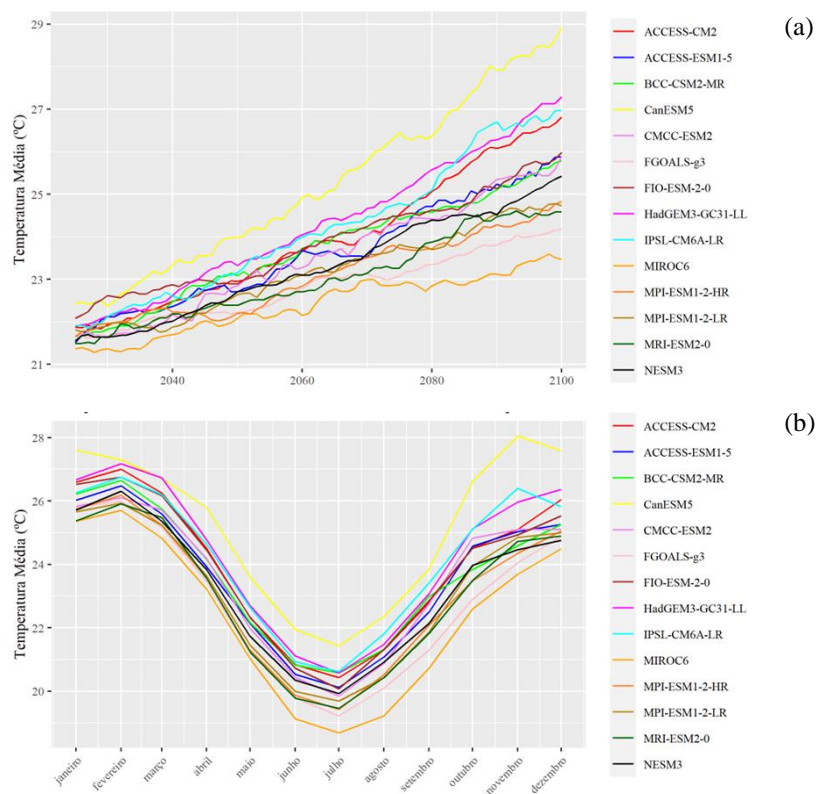


Figura 73 – Temperatura média projetada em Ilha dos Pombos no cenário SSP2-4,5 (continua)



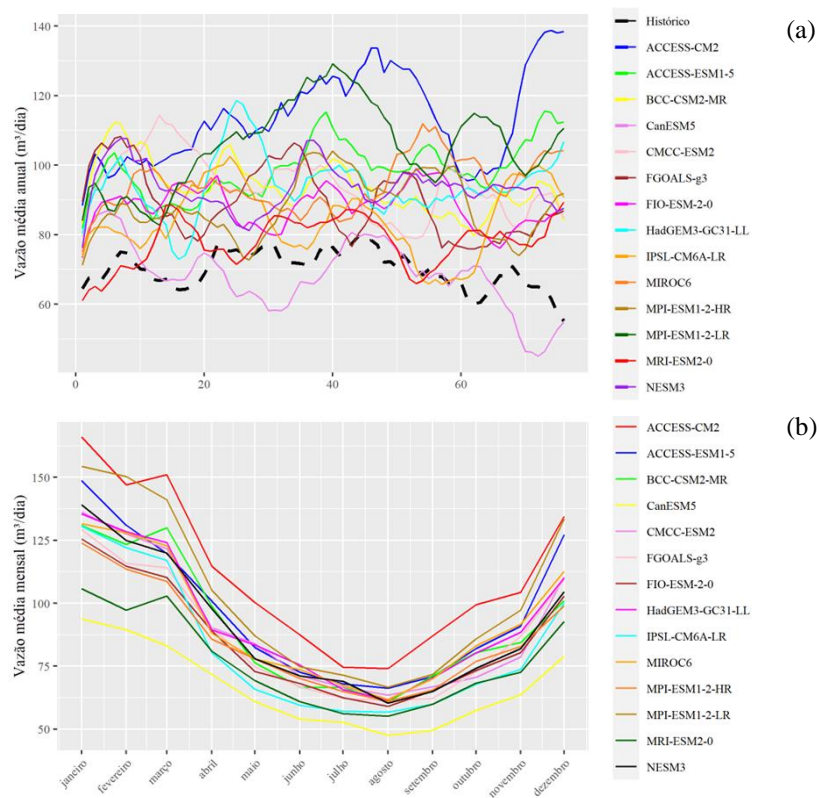
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 74 – Temperatura média projetada em Ilha dos Pombos no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e (b) sazonalidade.

Figura 75 – Vazão incremental afluyente em Paraibuna no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 76 – Vazão incremental afluyente em Paraibuna no cenário SSP5-8,5 (continua)

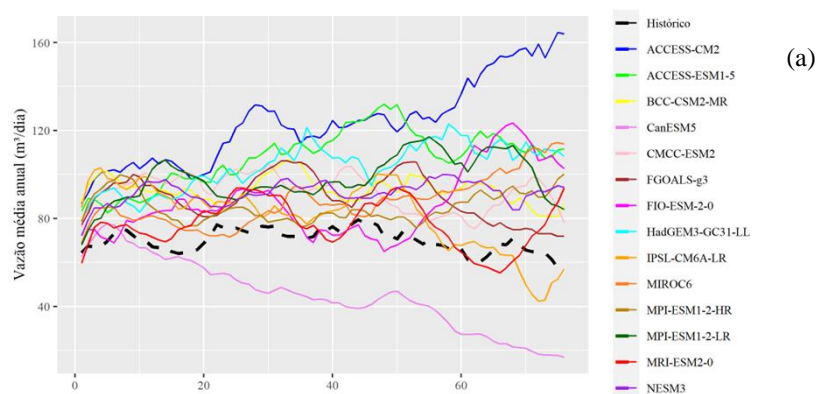
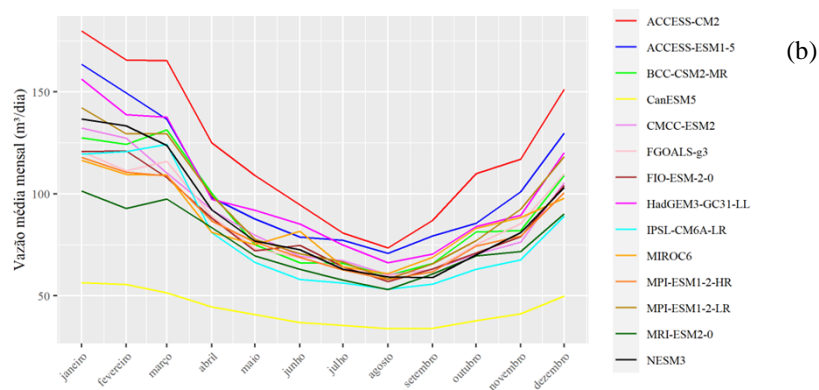
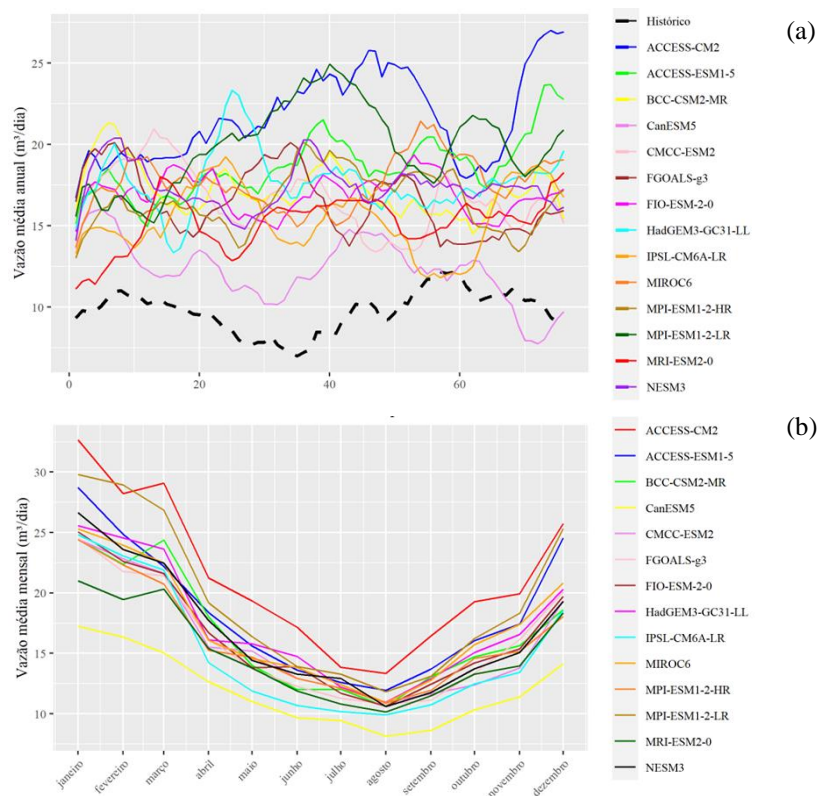


Figura 76 – Vazão incremental afluyente em Paraibuna no cenário SSP5-8,5 (continua)



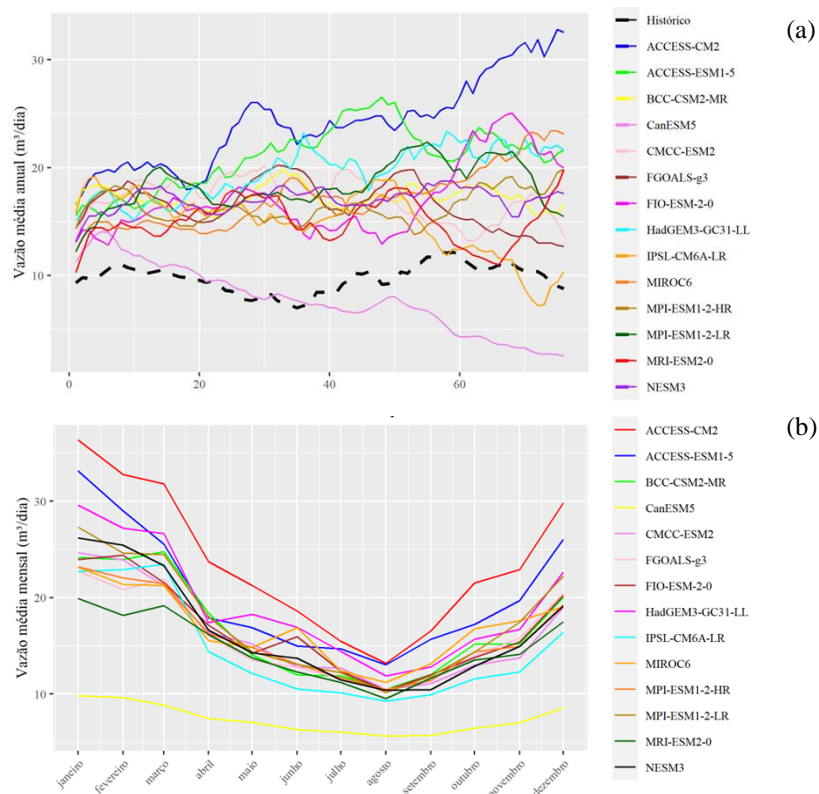
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 77 – Vazão incremental afluyente em Santa Branca no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 78 – Vazão incremental afluyente em Santa Branca no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 79 – Vazão incremental afluyente em Jaguari no cenário SSP2-4,5 (continua)

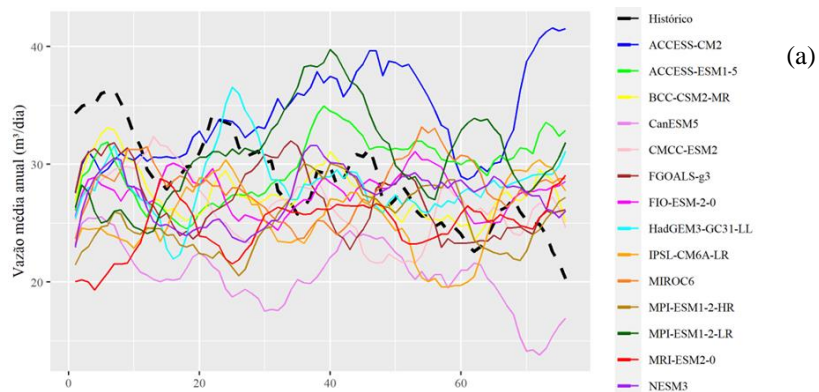
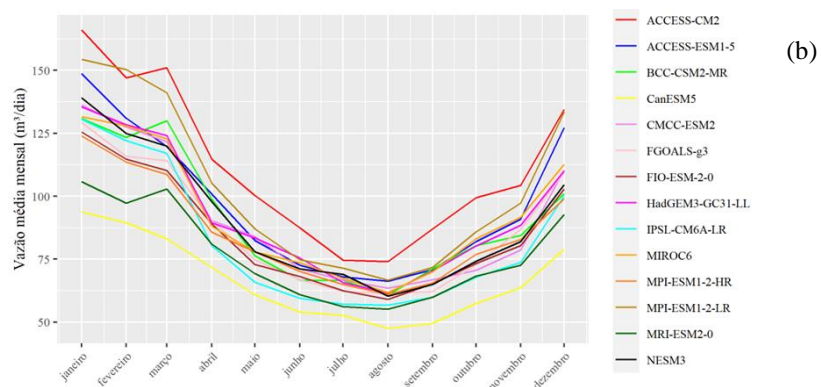
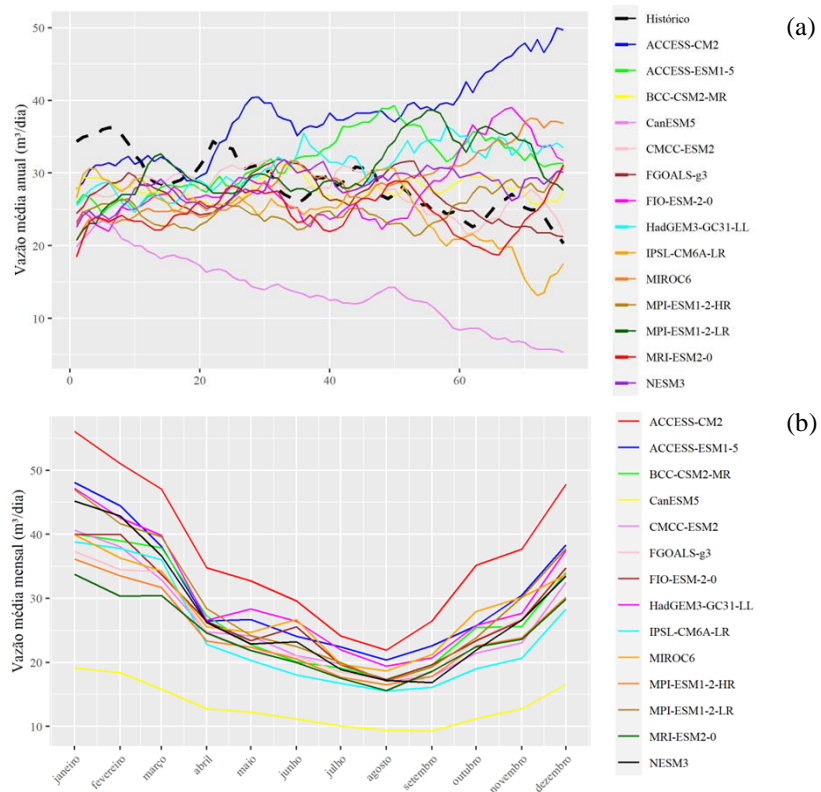


Figura 79 – Vazão incremental afluyente em Jaguari no cenário SSP2-4,5 (continua)



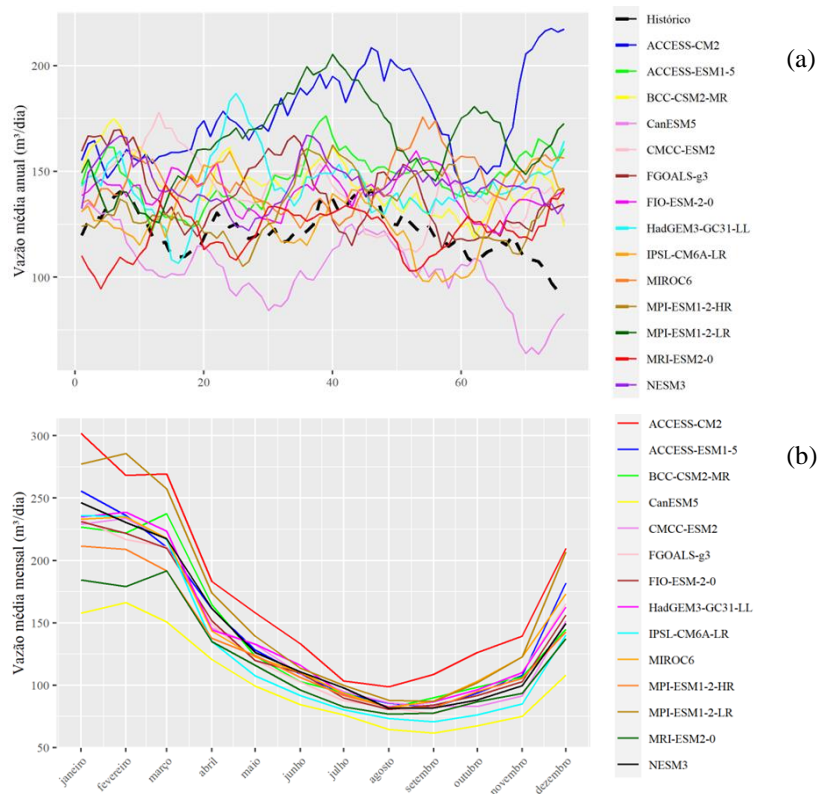
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 80 – Vazão incremental afluyente em Jaguari no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 81 – Vazão incremental afluyente em Funil no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 82 – Vazão incremental afluyente em Funil no cenário SSP5-8,5 (continua)

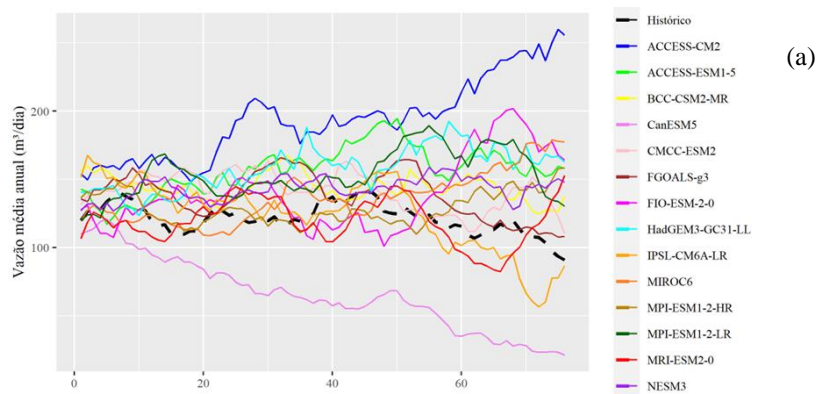
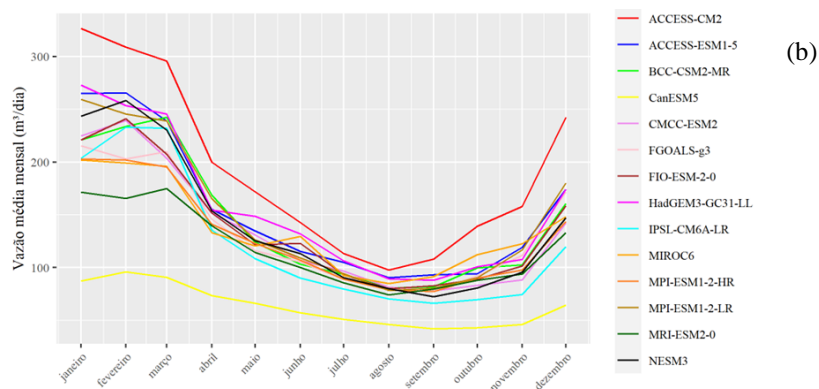
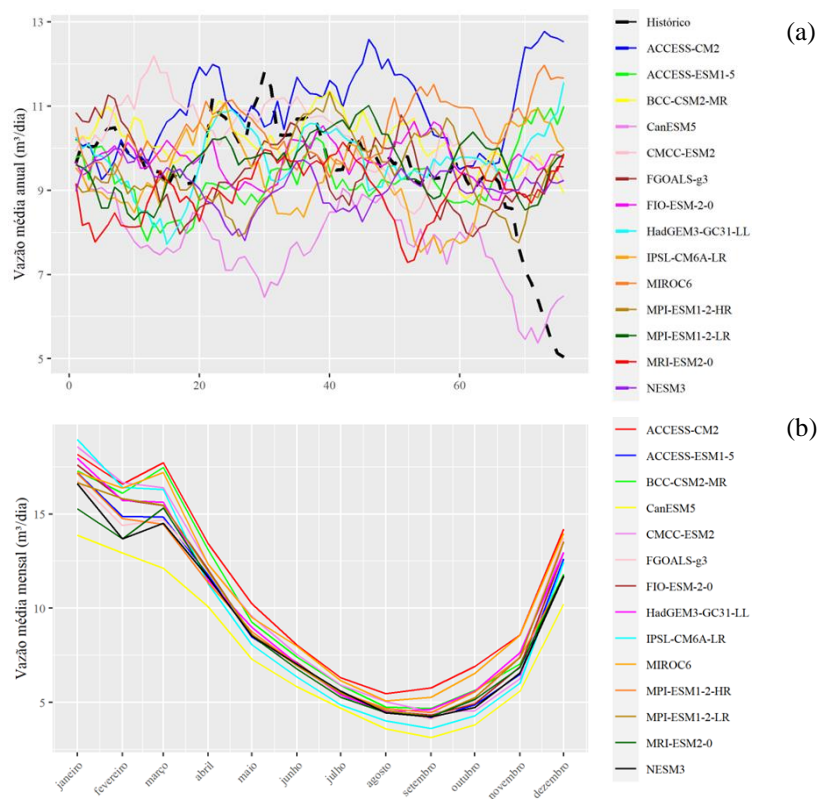


Figura 82 – Vazão incremental afluyente em Funil no cenário SSP5-8,5 (continua)



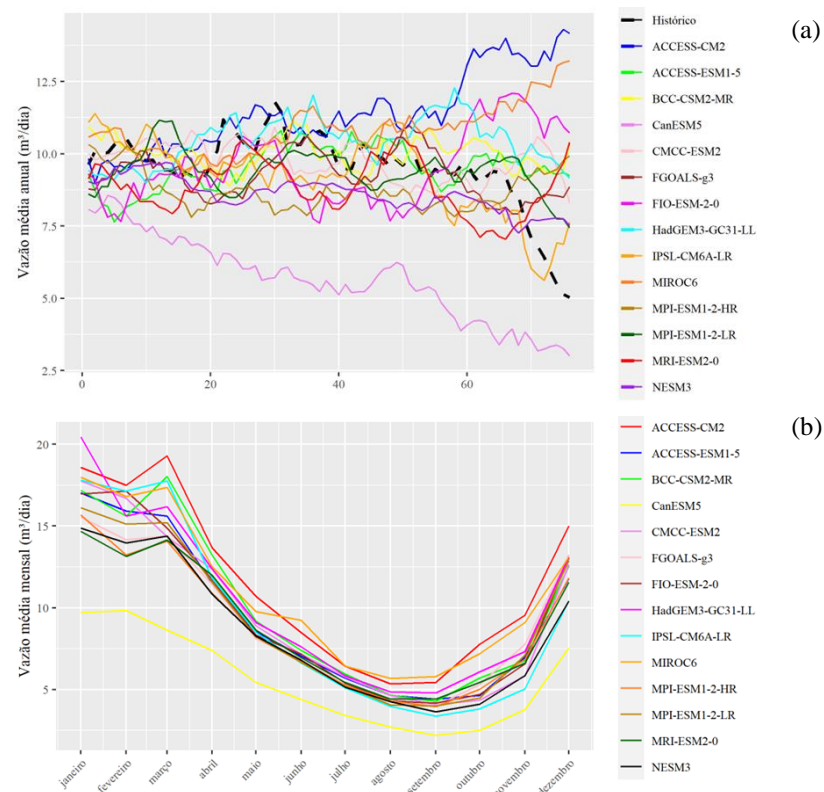
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 83 – Vazão incremental afluyente em Santana no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 84 – Vazão incremental afluyente em Santana no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 85 – Vazão incremental afluyente em Tócos no cenário SSP2-4,5 (continua)

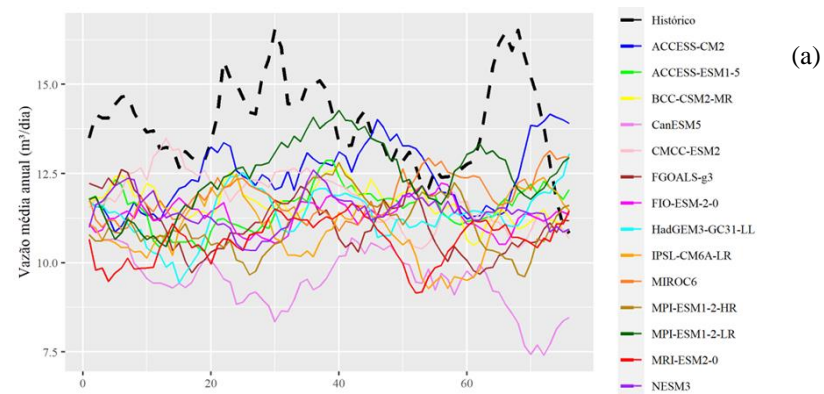
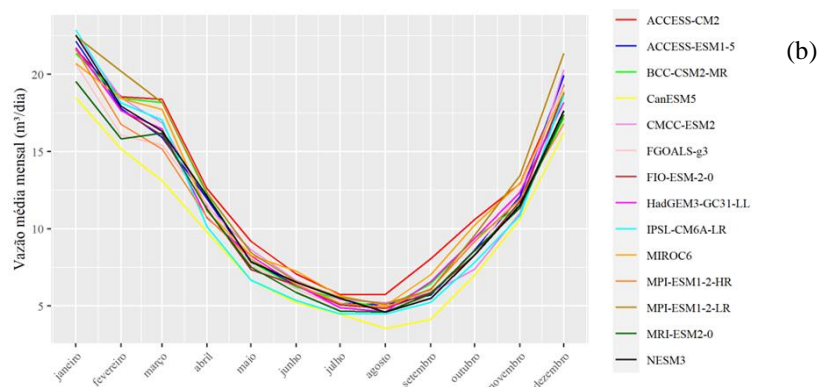
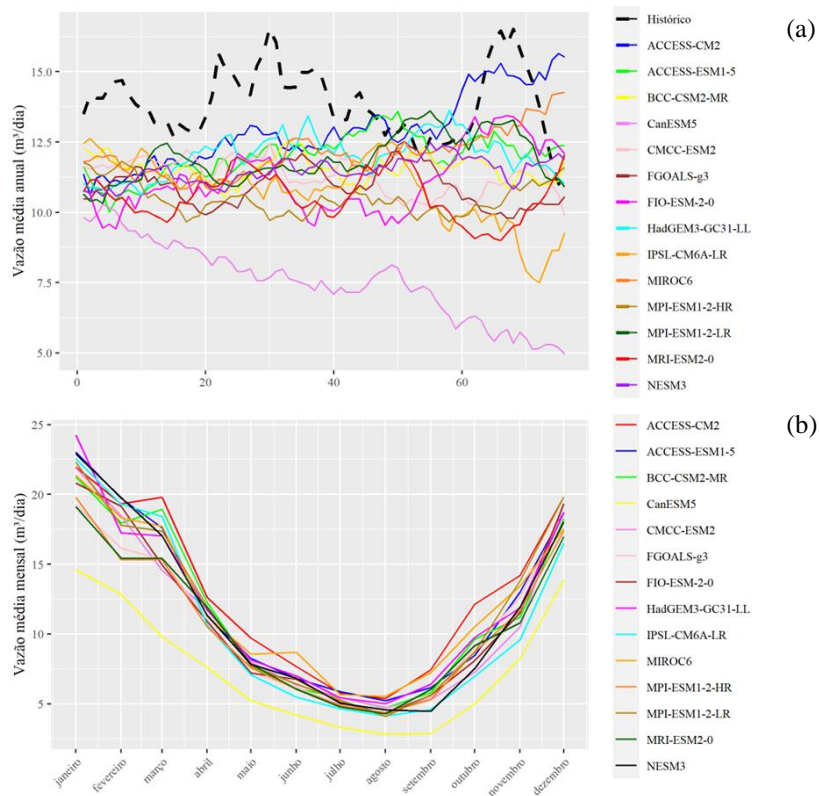


Figura 85 – Vazão incremental afluyente em Tócos no cenário SSP2-4,5 (continua)



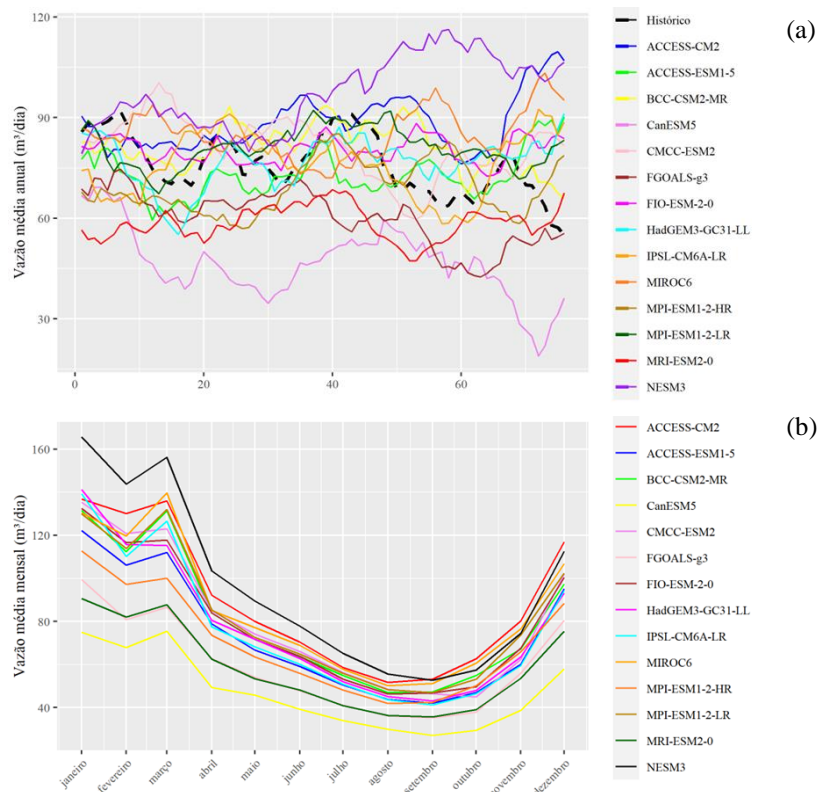
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 86 – Vazão incremental afluyente em Tócos no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 87 – Vazão incremental afluyente em Sobragi no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 88 – Vazão incremental afluyente em Sobragi no cenário SSP5-8,5 (continua)

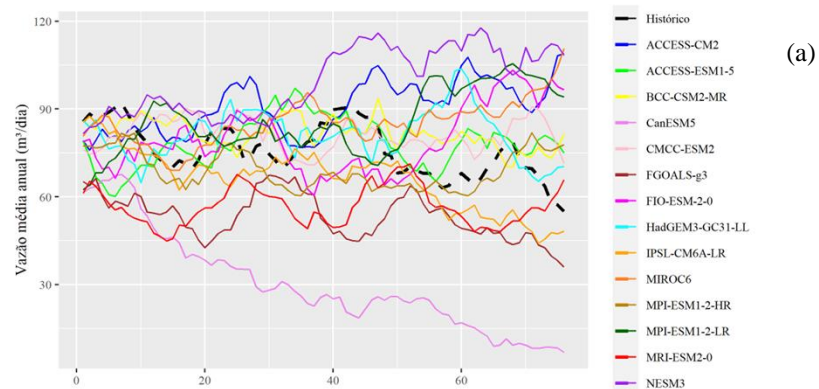
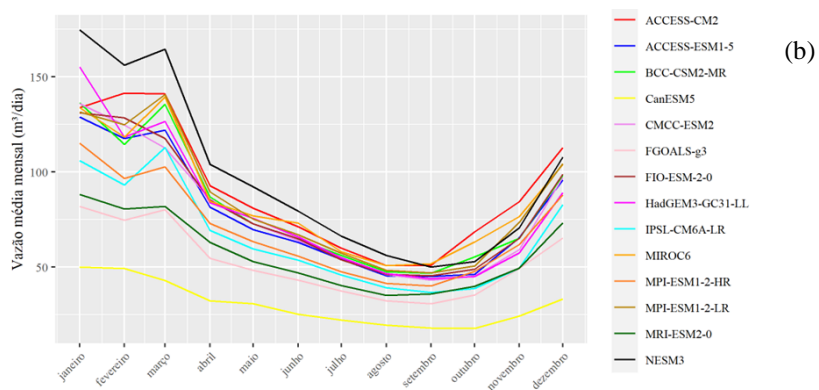
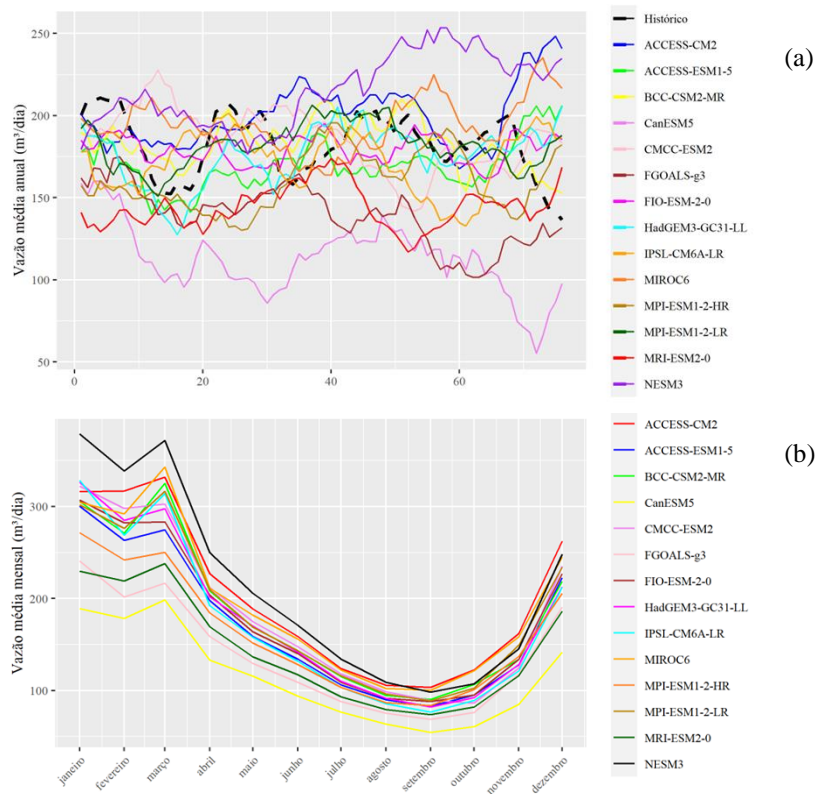


Figura 88 – Vazão incremental afluyente em Sobragi no cenário SSP5-8,5 (continua)



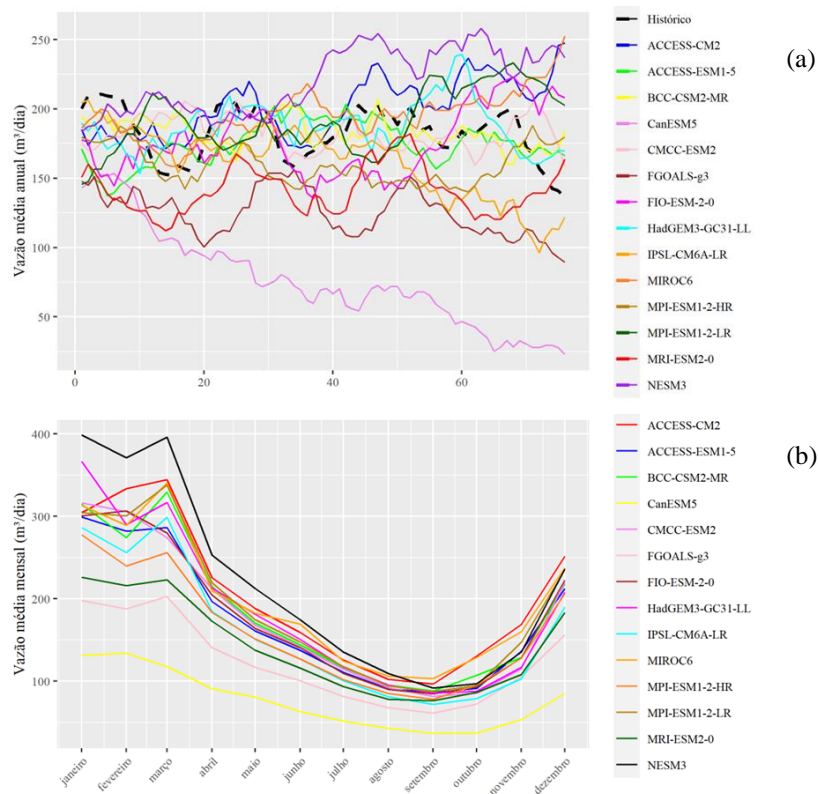
Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 89 – Vazão incremental afluyente em Anta no cenário SSP2-4,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 90 – Vazão incremental afluyente em Anta no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

Figura 91 – Vazão incremental afluyente em Ilha dos Pombos no cenário SSP2-4,5 (continua)

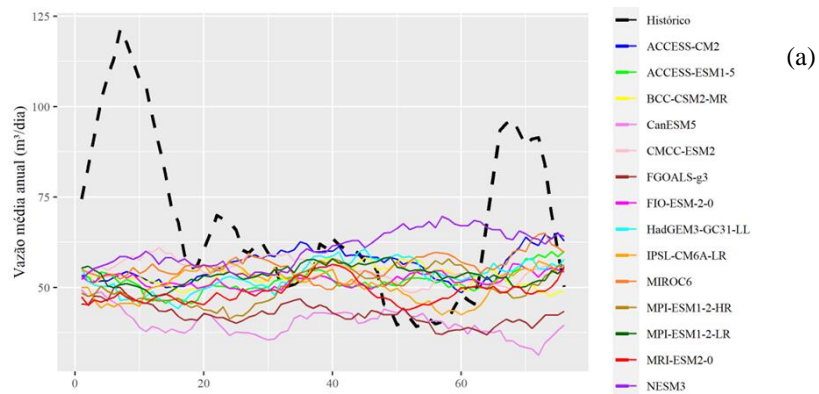
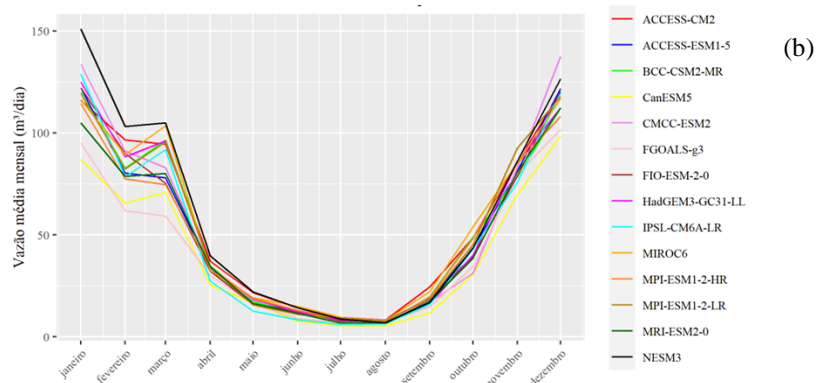
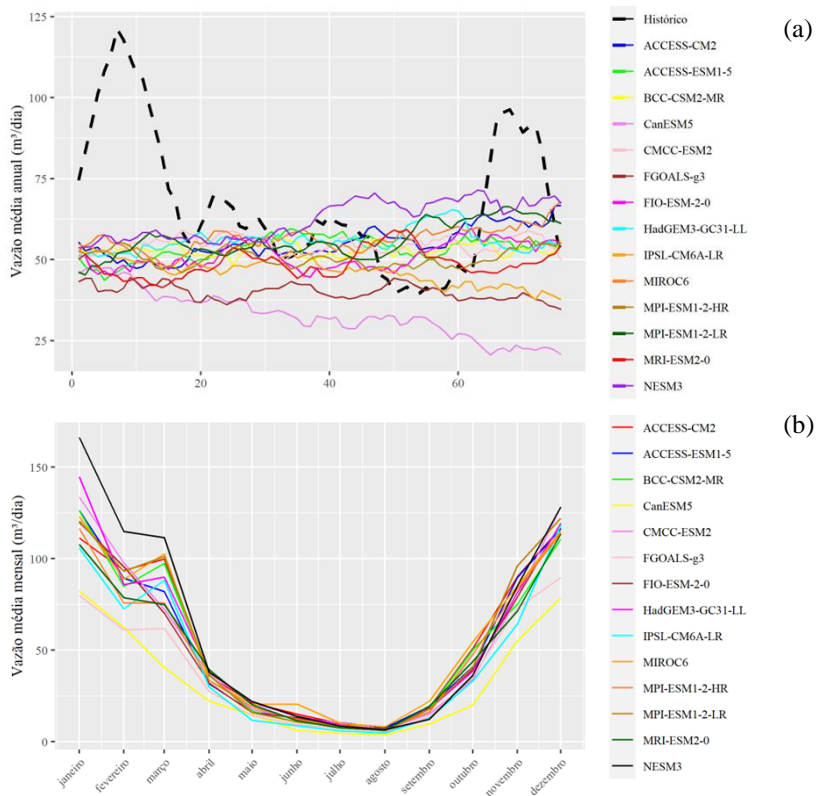


Figura 91 – Vazão incremental afluyente em Ilha dos Pombos no cenário SSP2-4,5 (continua)



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

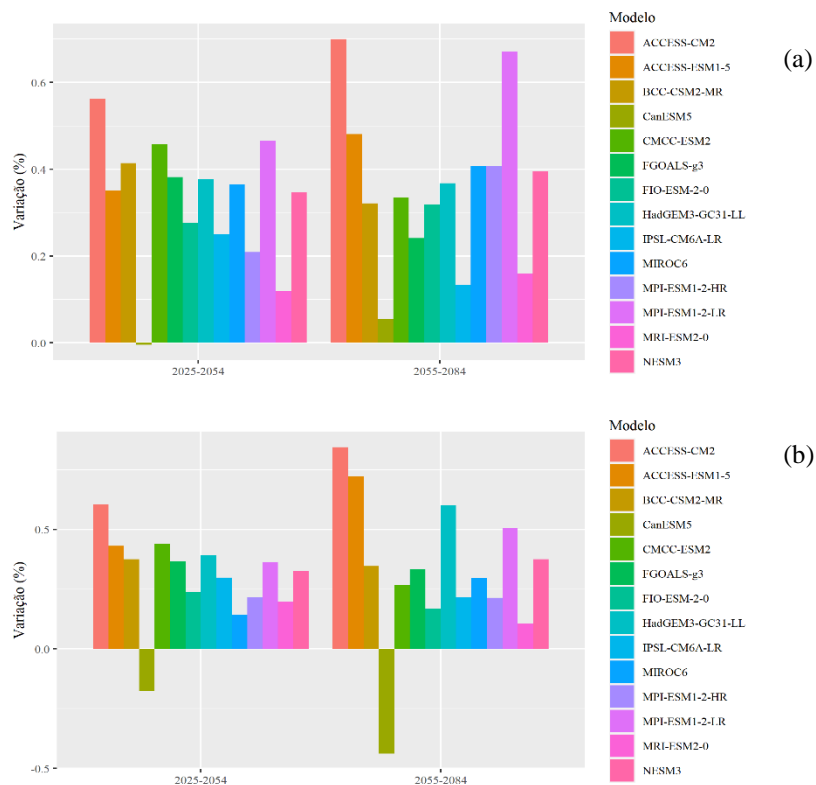
Figura 92 – Vazão incremental afluyente em Ilha dos Pombos no cenário SSP5-8,5



Legenda: Período de 2015-2100 (a) média móvel de 10 anos e vazão histórica de 1935-2015 e (b) sazonalidade.

APÊNDICE D – Anomalia percentual das vazões naturais afluentes

Figura 93 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Parai-
buna



Legenda: Análise em relação à média histórica nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 94 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Santa
Branca (continua)

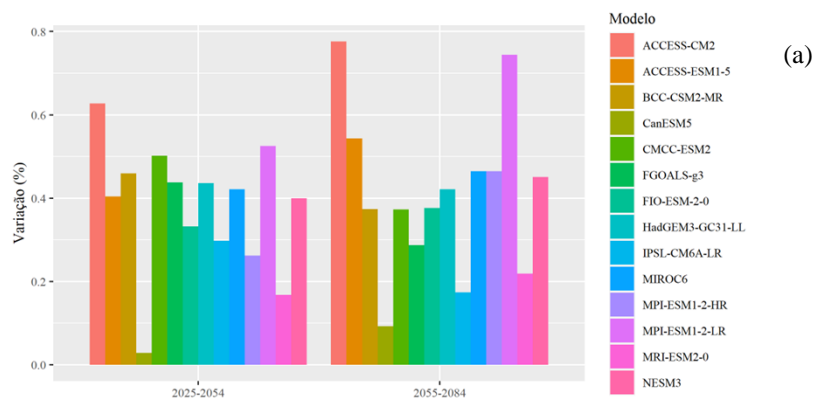
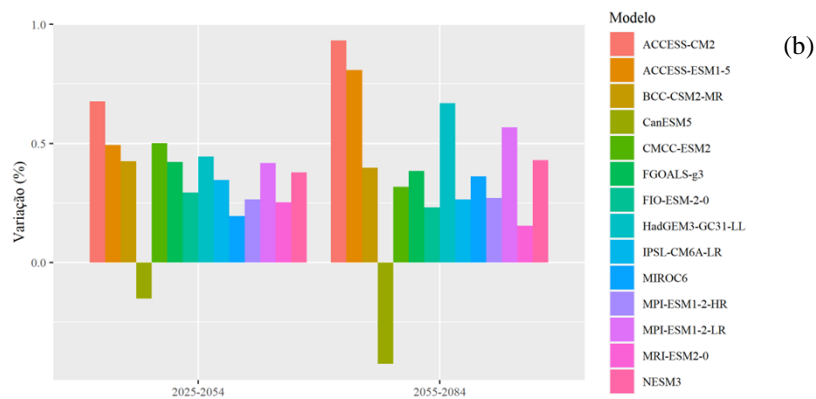
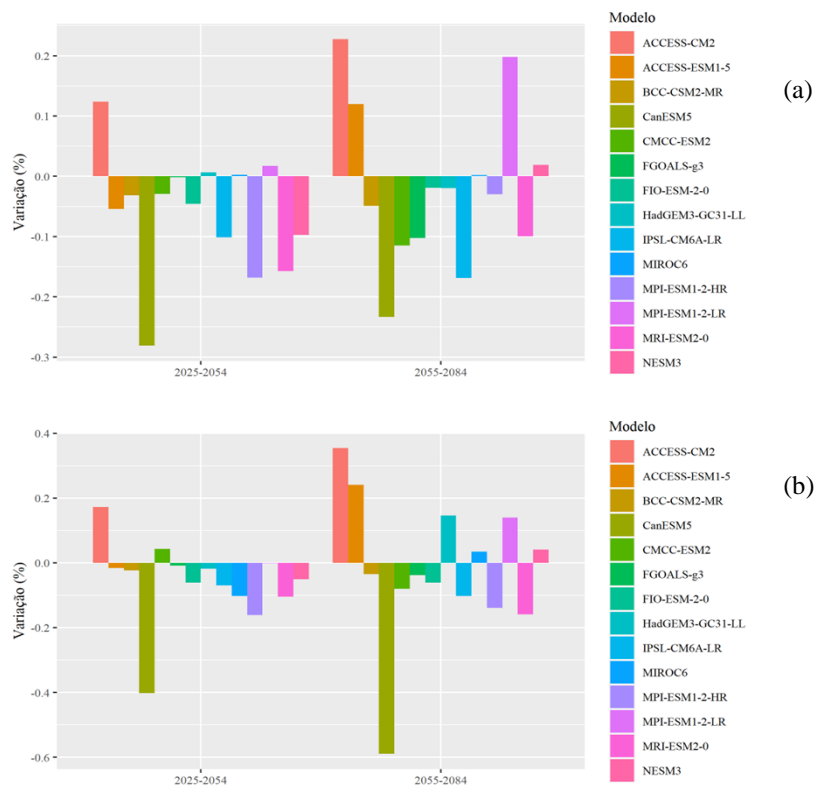


Figura 94 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Santa Branca (continua)



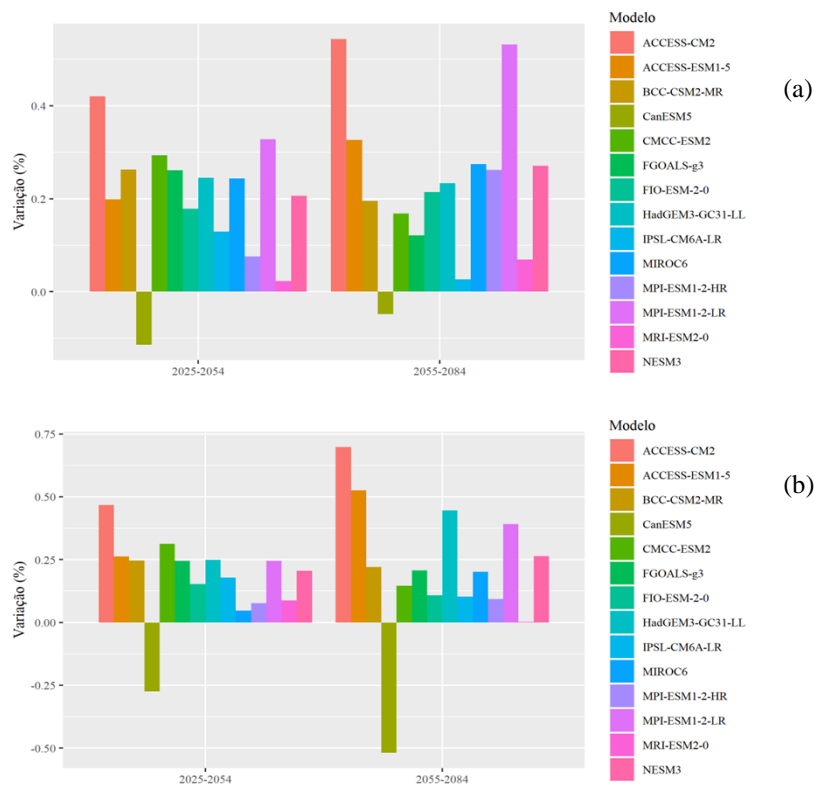
Legenda: Análise em relação à média histórica nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 95 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Jaguarí



Legenda: Análise em relação à média histórica nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 96 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Funil



Legenda: Análise em relação à média histórica nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 97 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Santana (continua)

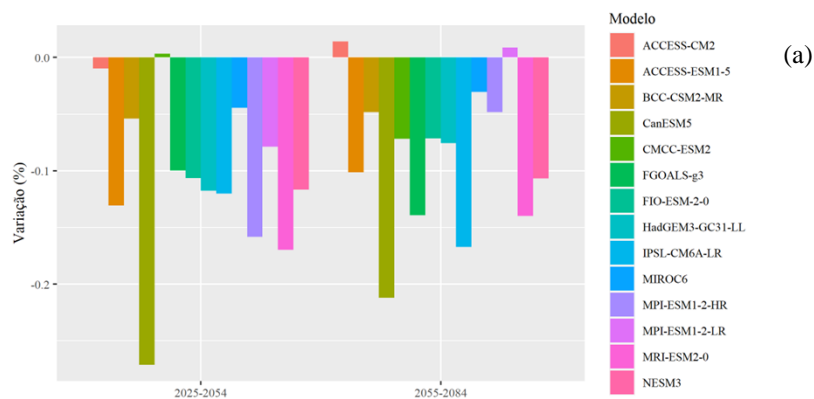
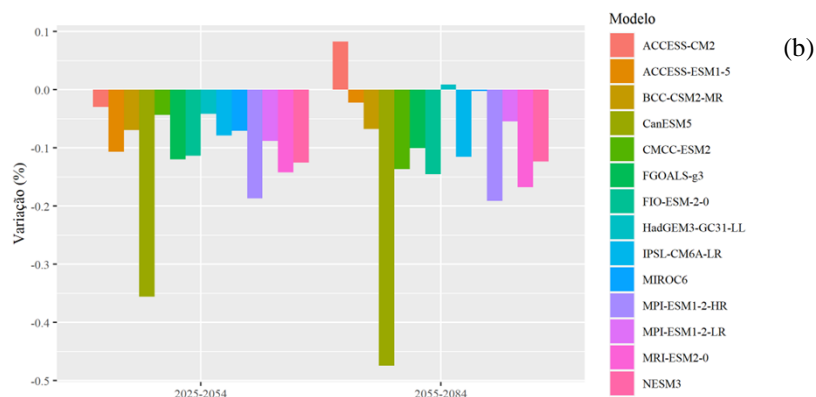
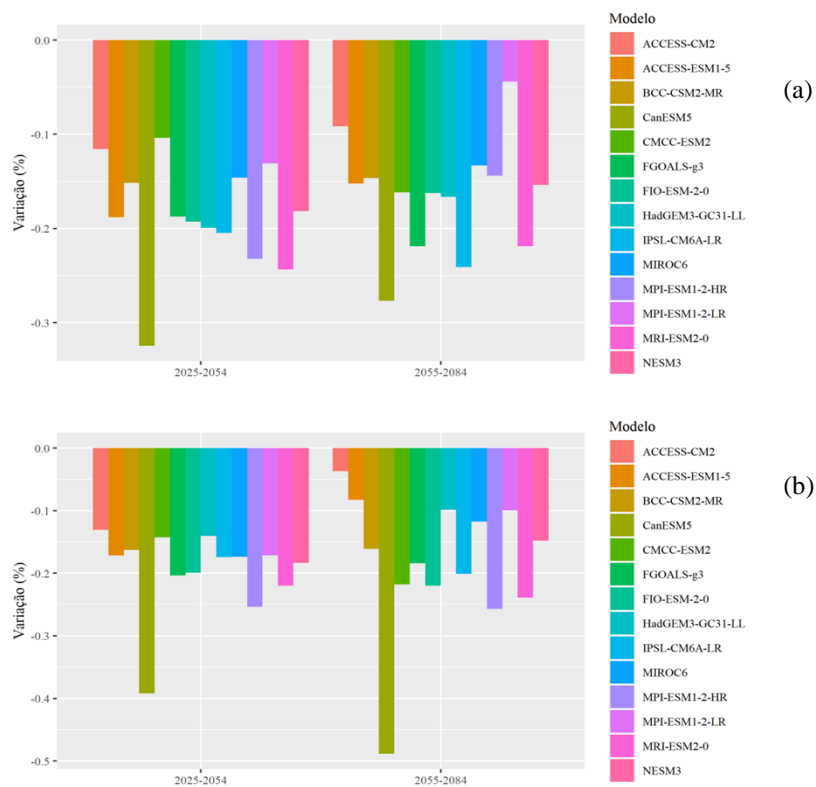


Figura 97 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Santana (continua)



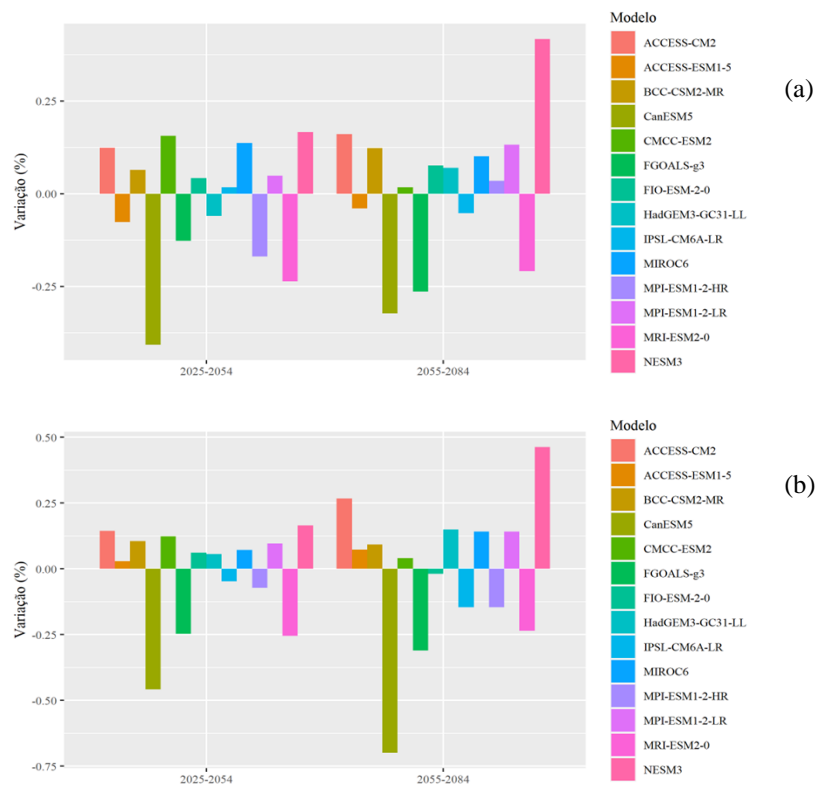
Legenda: Análise em relação à média histórica nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 98 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Tócos



Legenda: Análise em relação à média histórica nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 99 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Sobragi



Legenda: Análise em relação à média histórica nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 100 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Anta (continua)

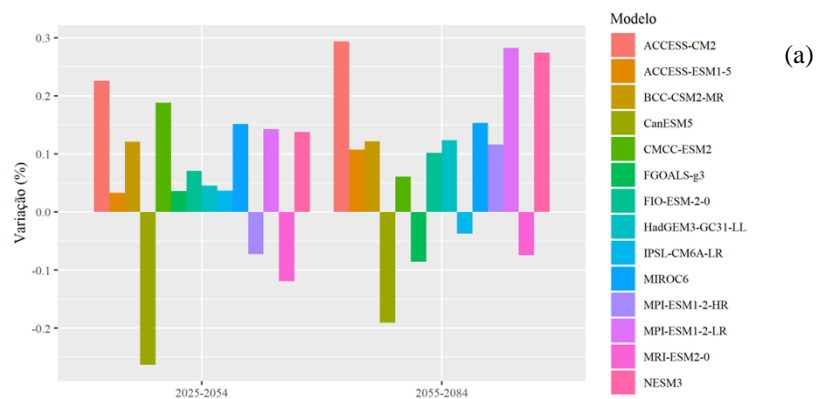
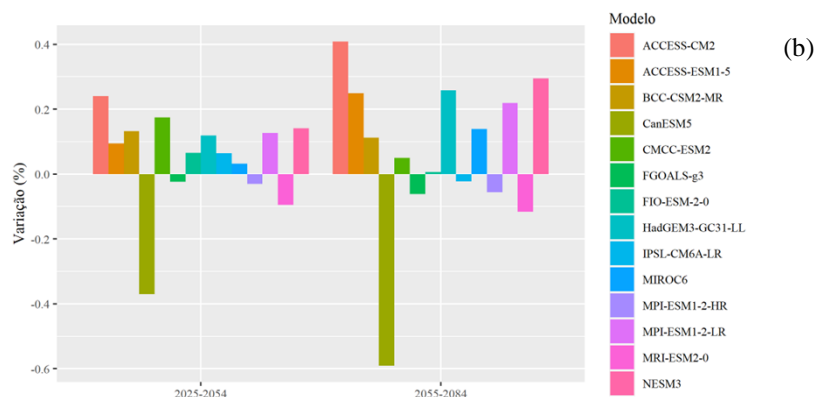
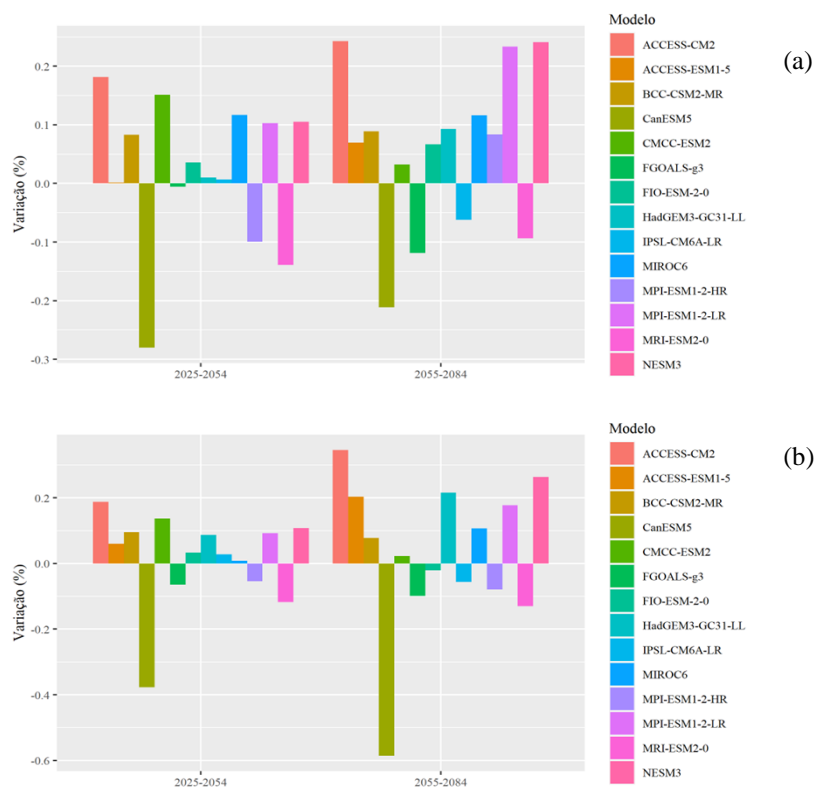


Figura 100 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Anta (continua)



Legenda: Análise em relação à média histórica nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 101 – Anomalia percentual média das vazões anuais em Ilha dos Pombos



Legenda: Análise em relação à média histórica nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

APÊNDICE E – Avaliação das secas em Santa Cecília

FIO-ESM-2-0 (melhor avaliação)

Figura 102 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI3, modelo FIO-ESM-2-0 (continua)

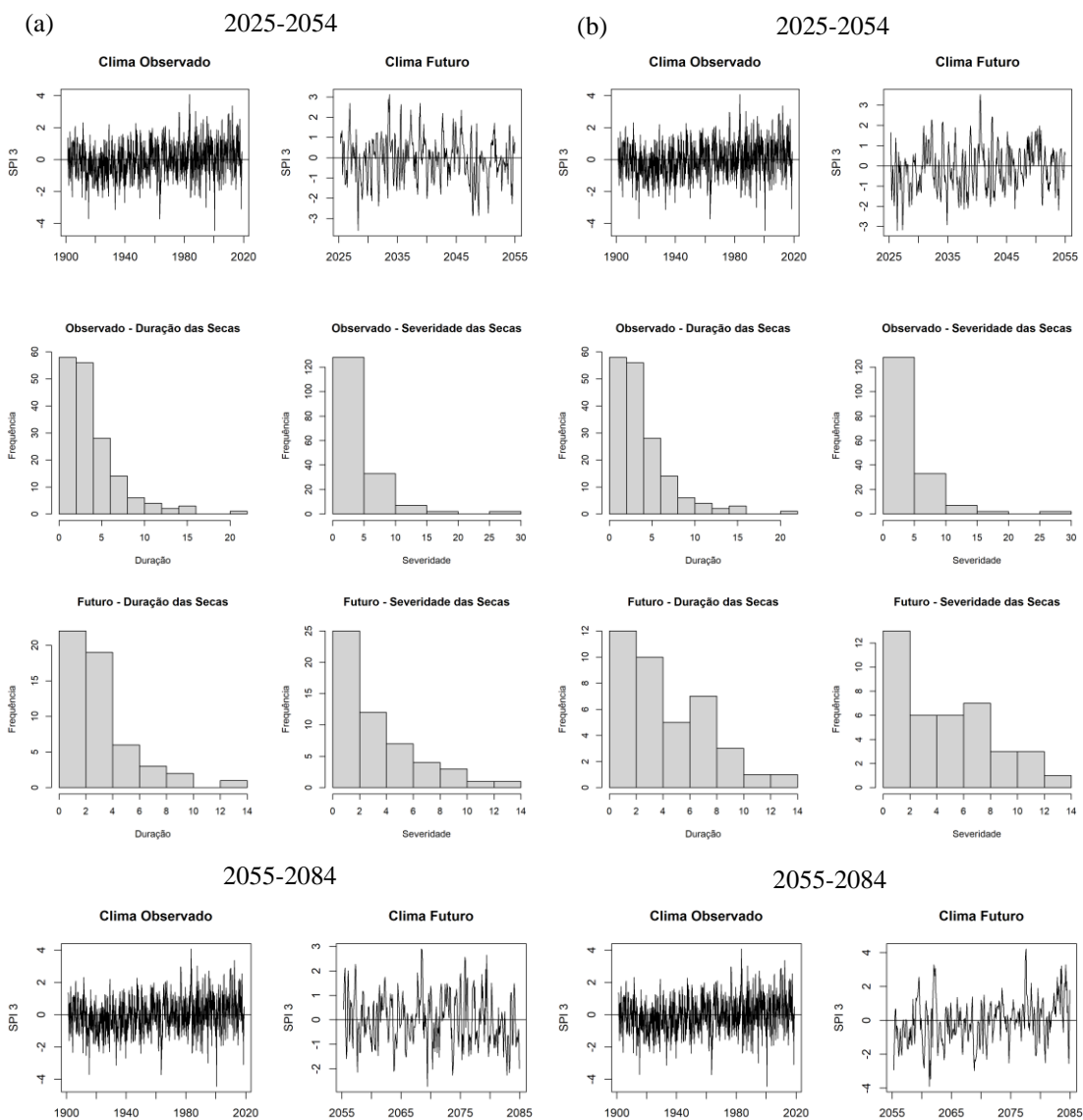
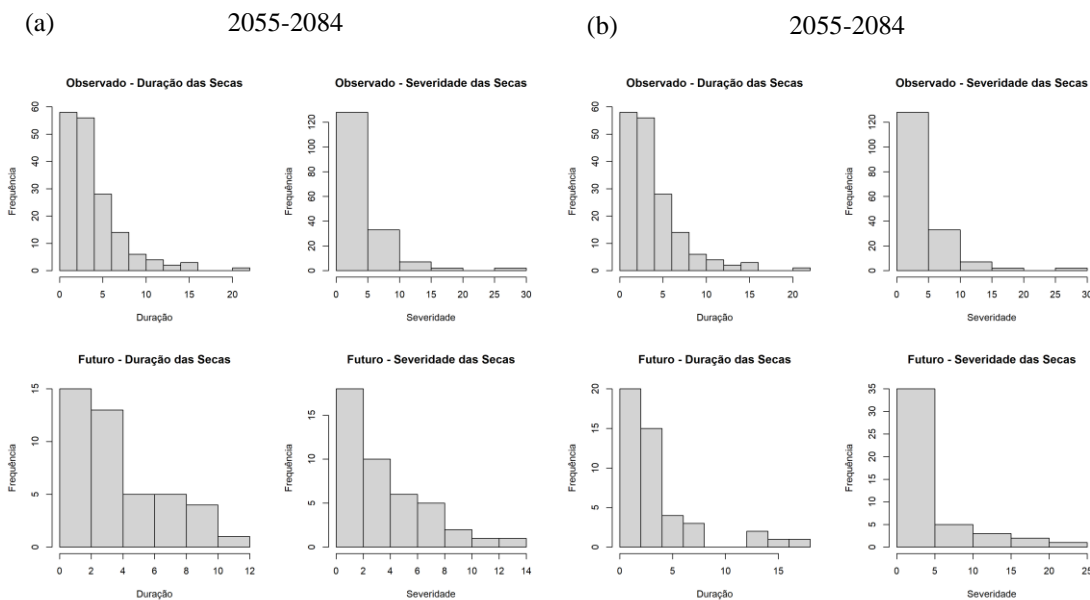


Figura 102 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI3, modelo FIO-ESM-2-0 (continua)



Nota: Análise considera modelo FIO-ESM-2-0 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.

Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 103 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI6, modelo FIO-ESM-2-0 (continua)

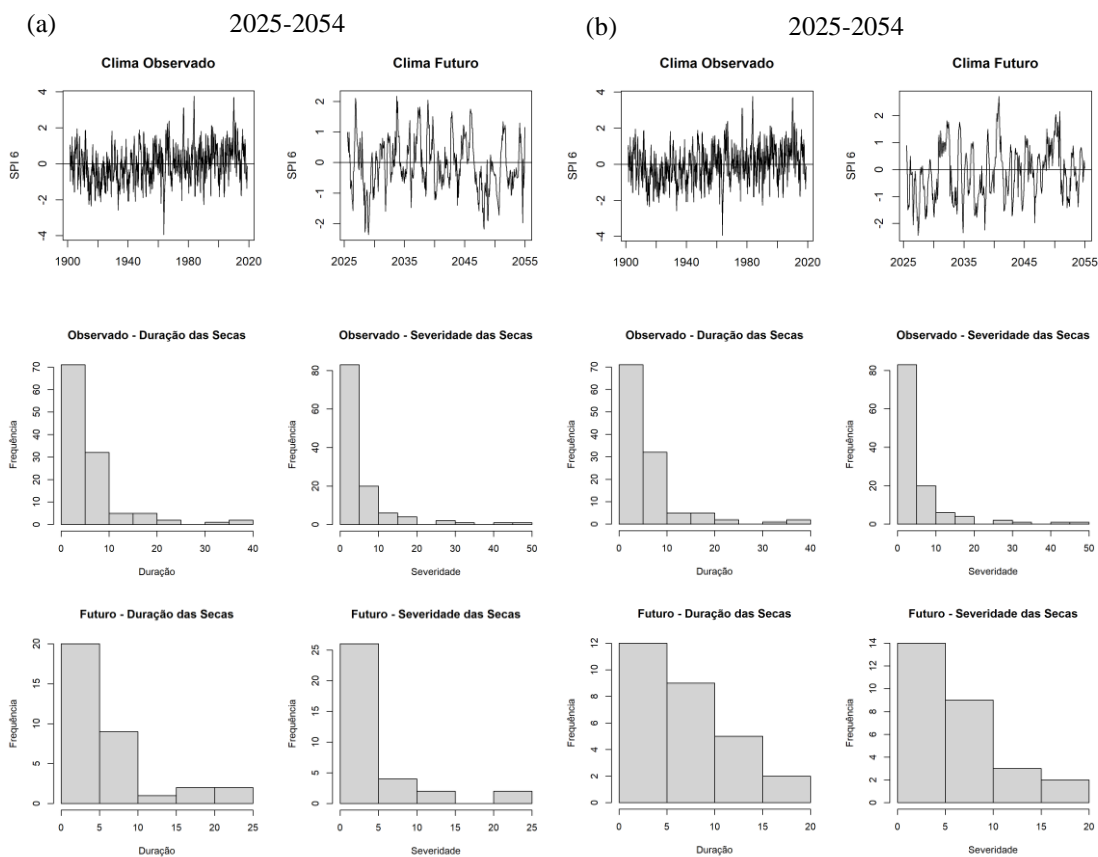
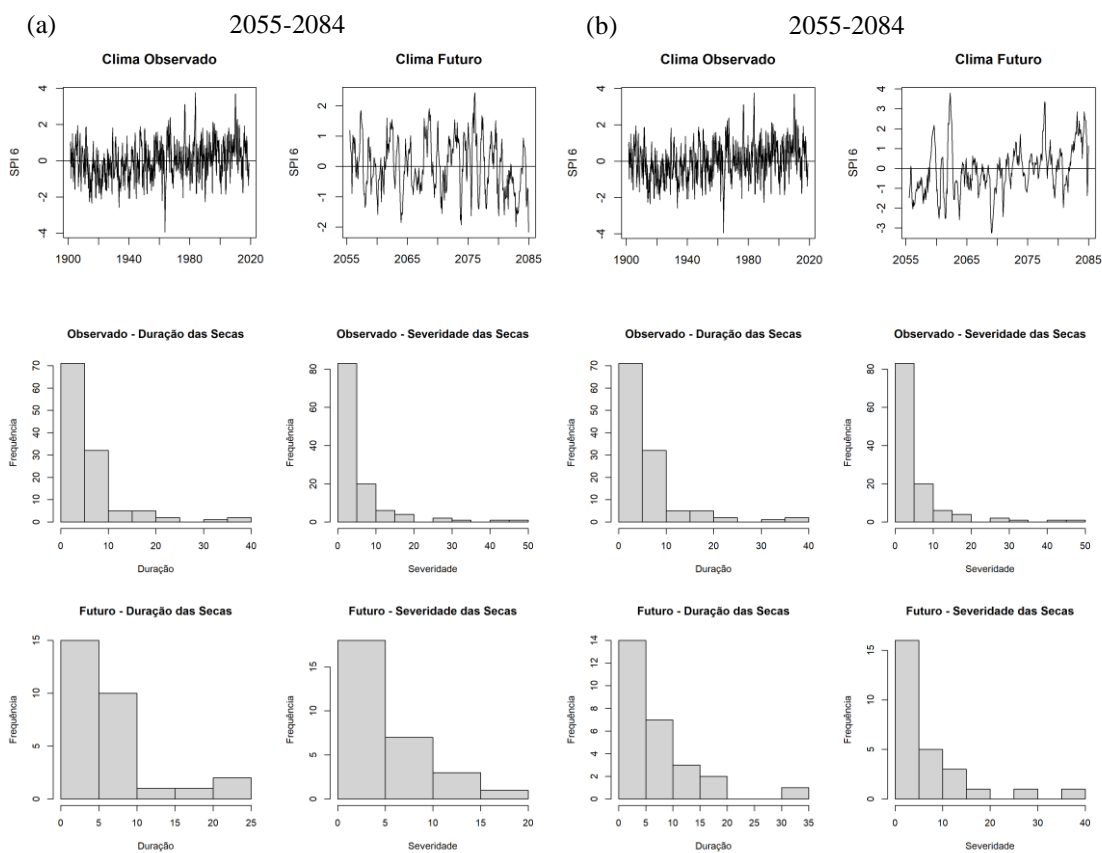


Figura 103 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI6, modelo FIO-ESM-2-0 (continua)



Nota: Análise considera modelo FIO-ESM-2-0 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.

Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 104 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI12, modelo FIO-ESM-2-0 (continua)

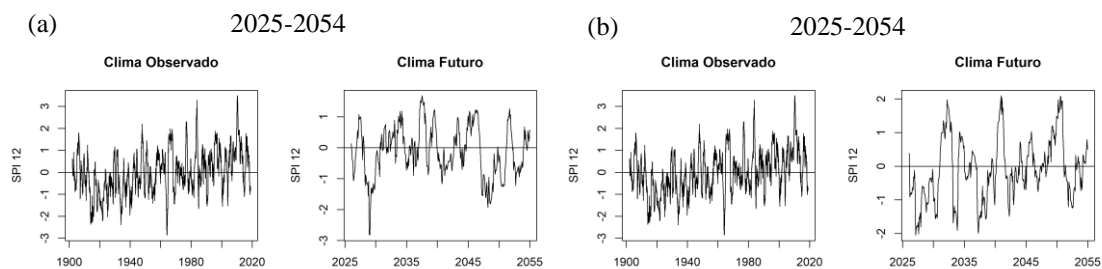
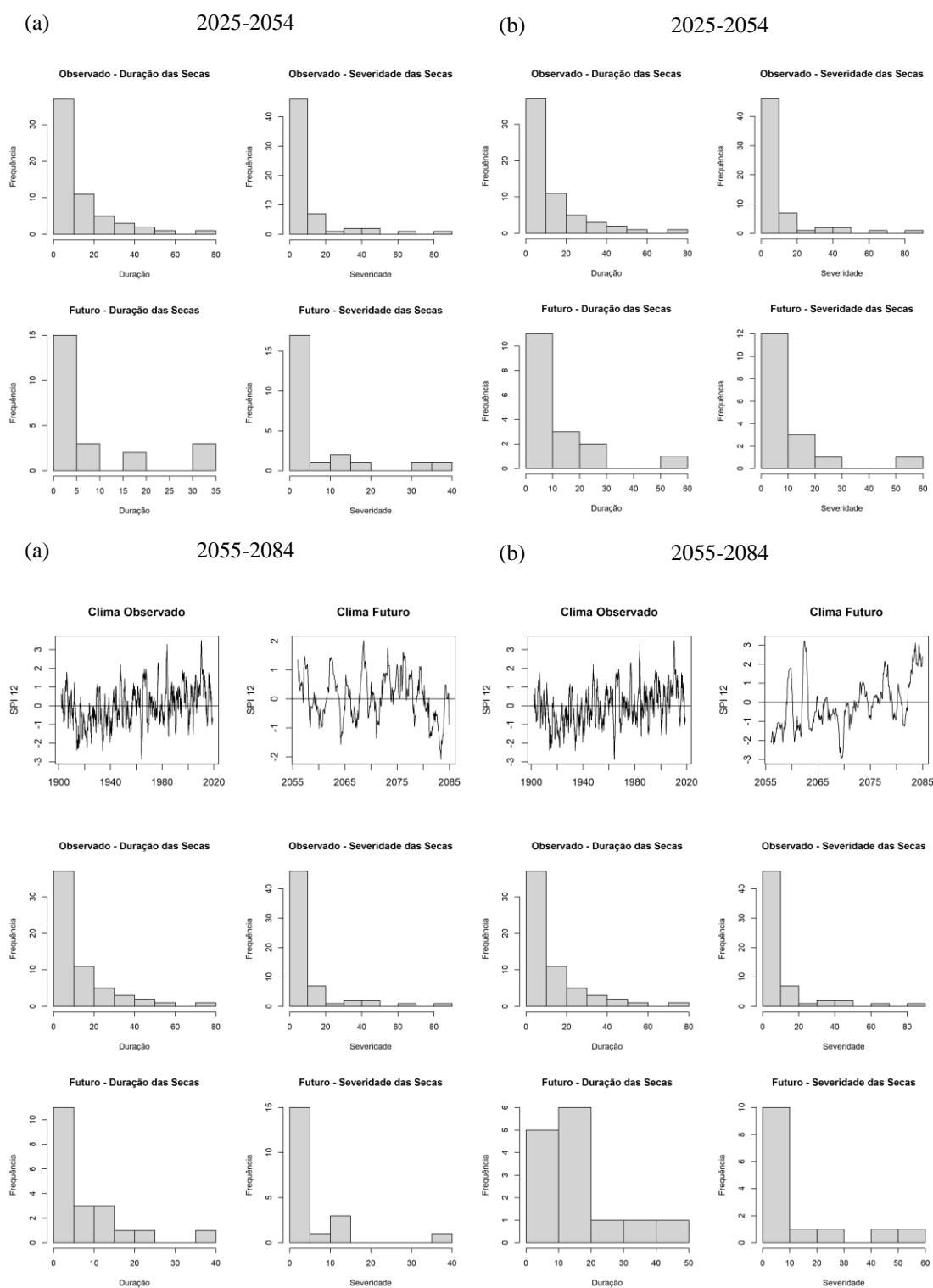


Figura 104 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI12, modelo FIO-ESM-2-0 (continua)



Nota: Análise considera modelo FIO-ESM-2-0 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.

Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

HadGEM3-GC31-LL (avaliação mediana)

Figura 105 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI3, modelo HadGEM3-GC31-LL (continua)

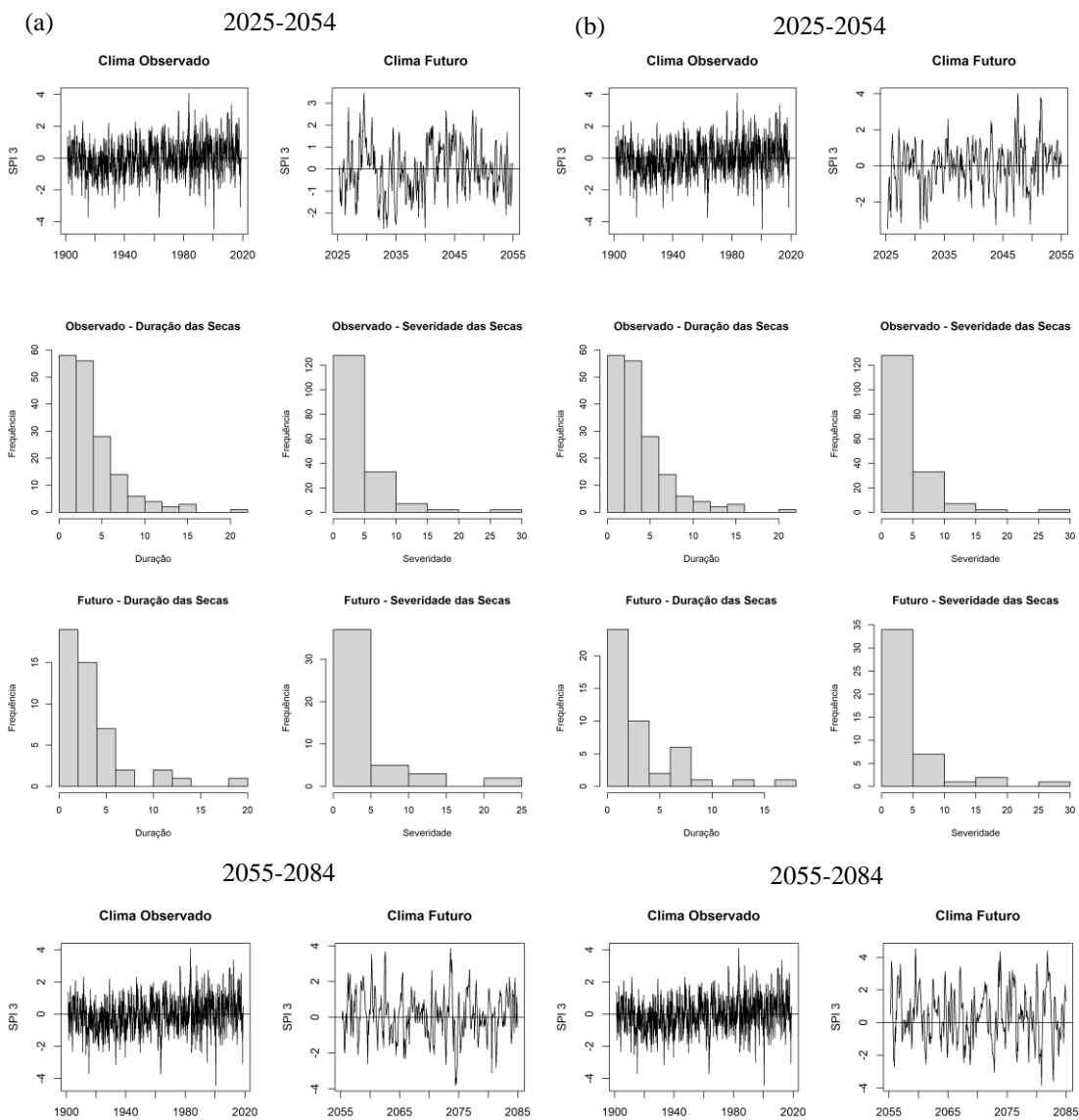
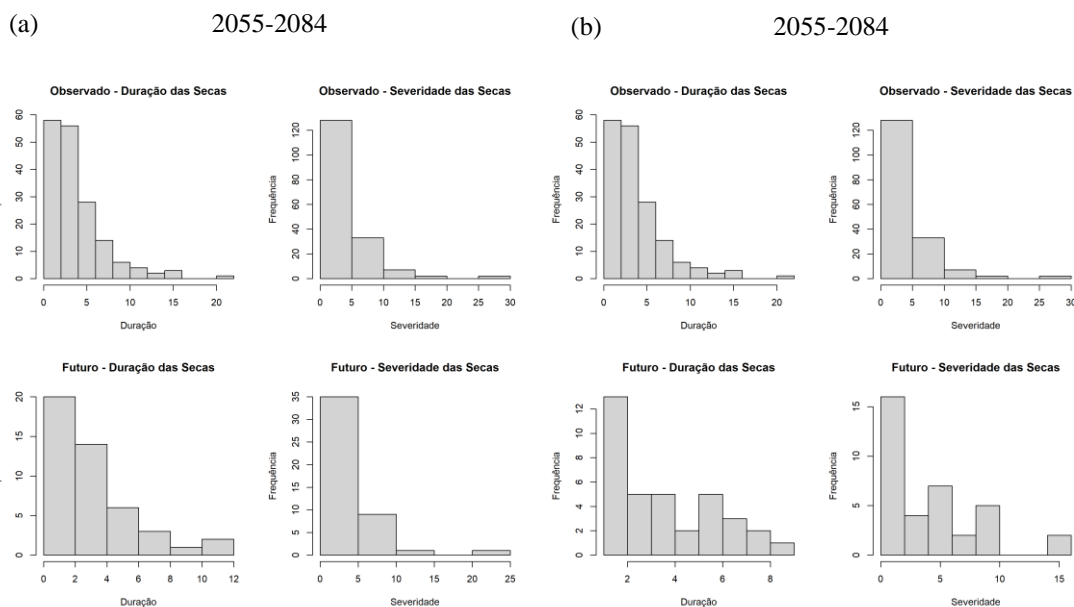


Figura 105 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI3, modelo HadGEM3-GC31-LL (continua)



Nota: Análise considera modelo HadGEM3-GC31-LL para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.
 Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 106 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI6, modelo HadGEM3-GC31-LL (continua)

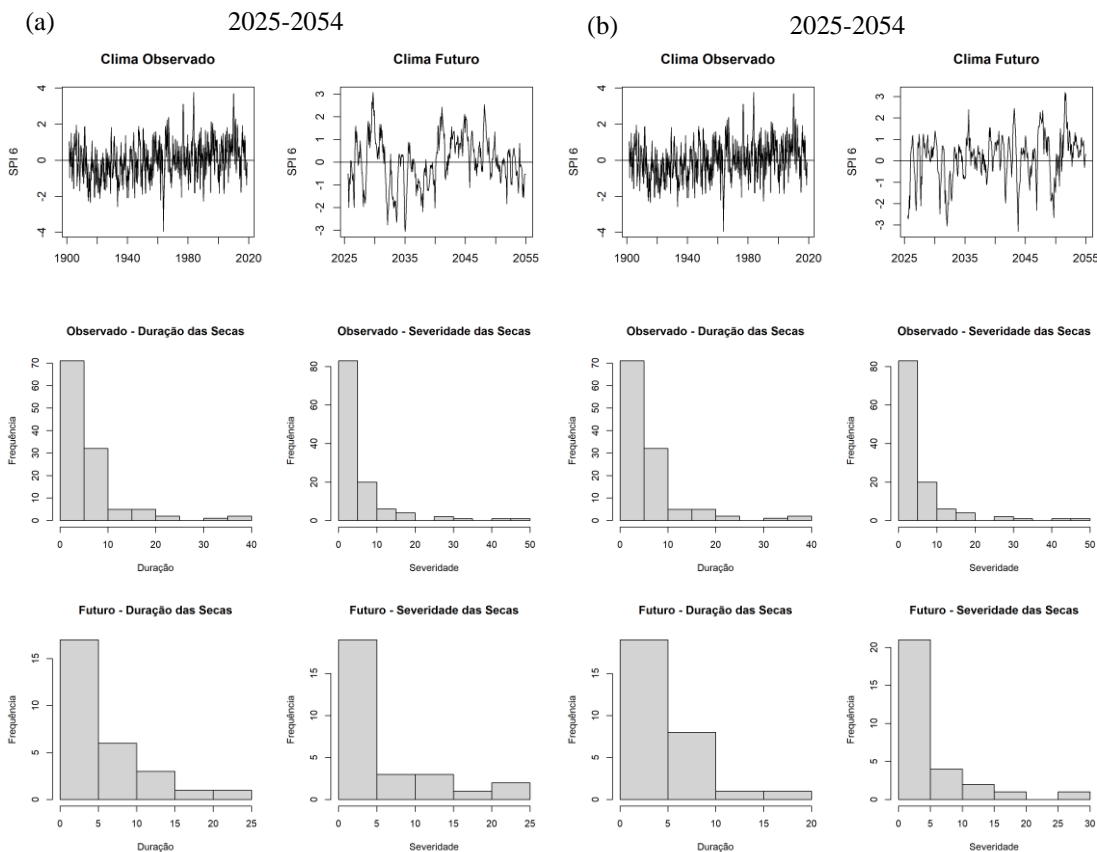
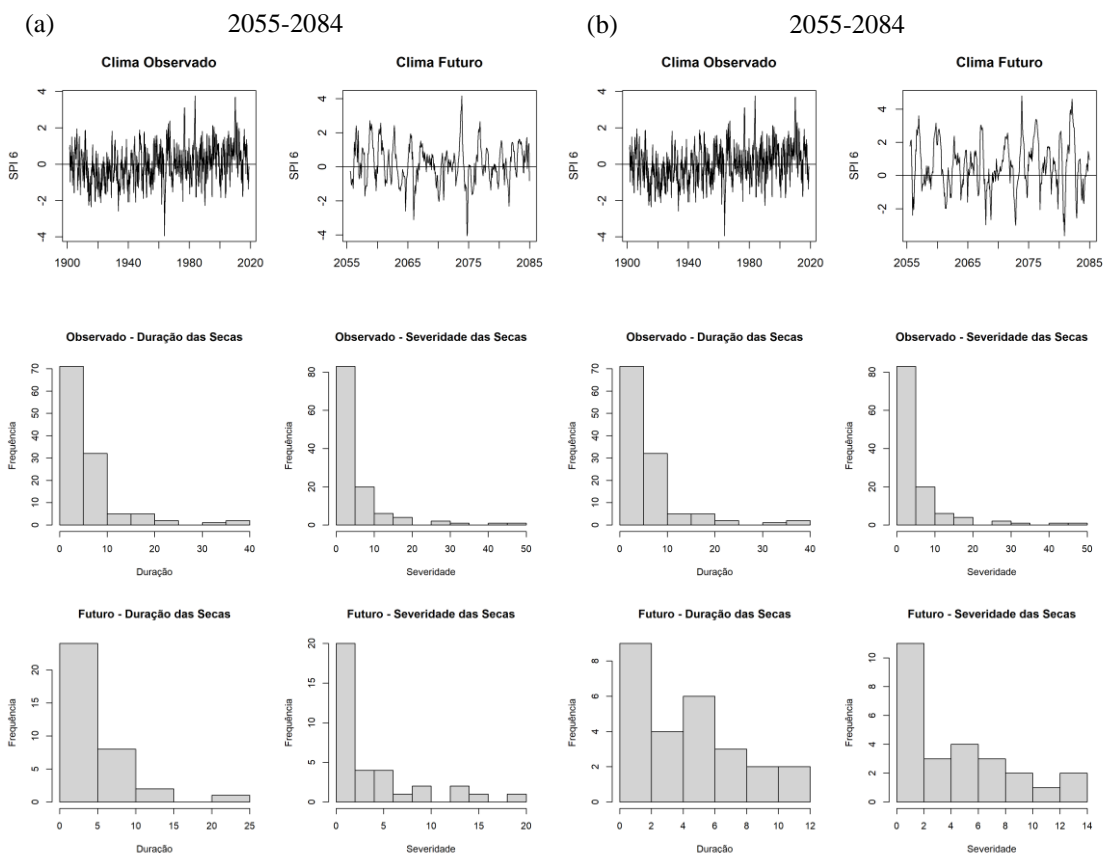


Figura 106 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI6, modelo HadGEM3-GC31-LL (continua)



Nota: Análise considera modelo HadGEM3-GC31-LL para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.
 Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 107 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI12, modelo HadGEM3-GC31-LL (continua)

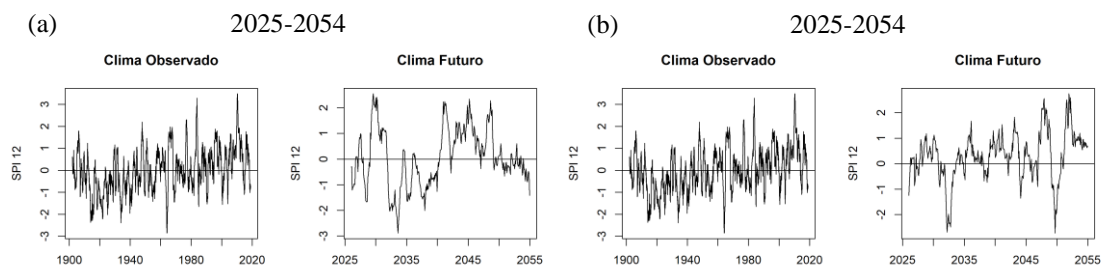
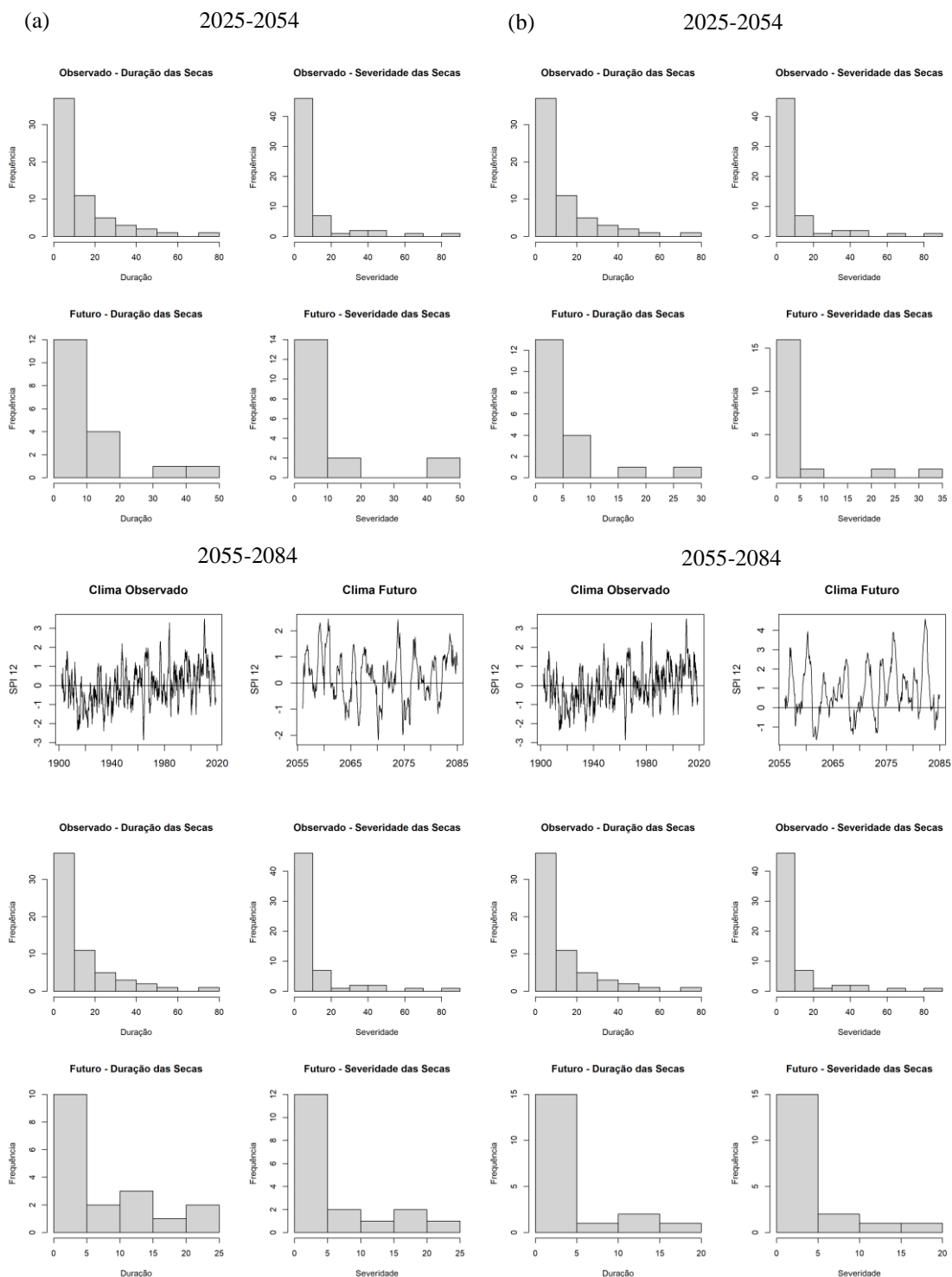


Figura 107 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI12, modelo HadGEM3-GC31-LL (continua)



Nota: Análise considera modelo HadGEM3-GC31-LL para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.
 Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

MIROC6 (pior avaliação)

Figura 108 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI3, modelo MIROC6 (continua)

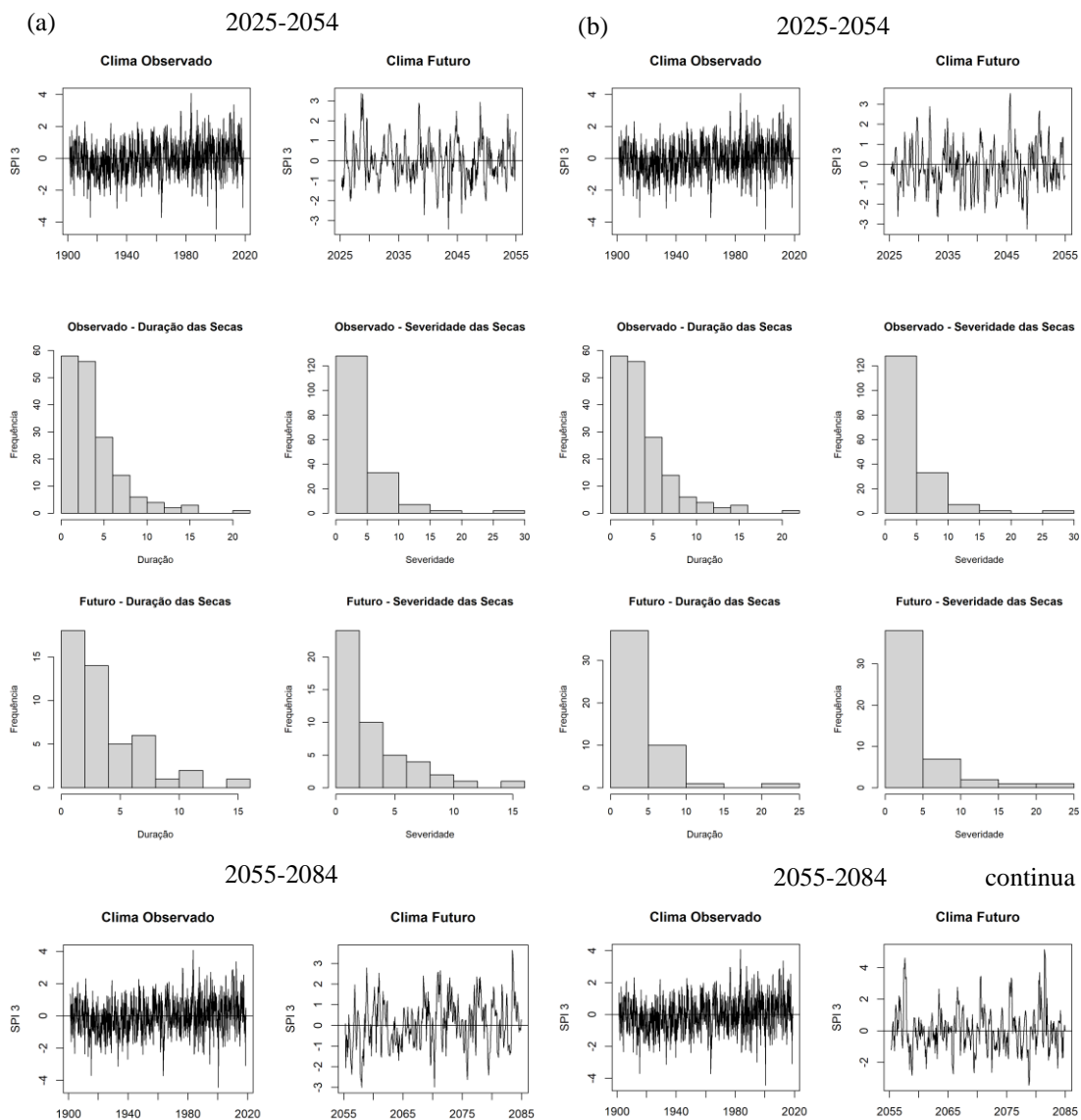
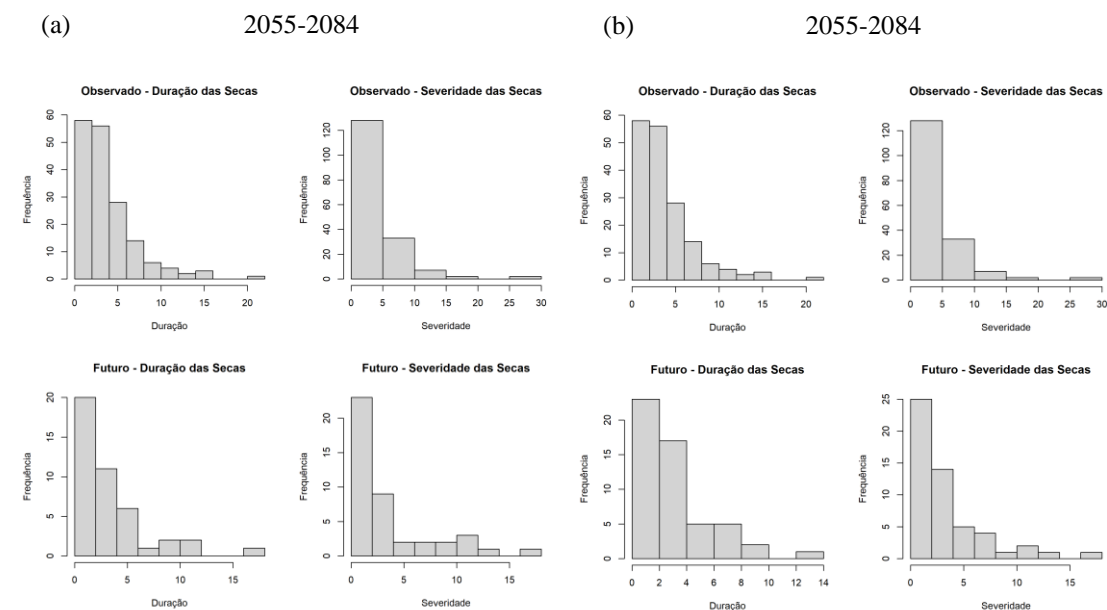


Figura 108 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI3, modelo MIROC6 (continua)



Nota: Análise considera modelo MIROC6 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.

Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 109 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI6, modelo MIROC6 (continua)

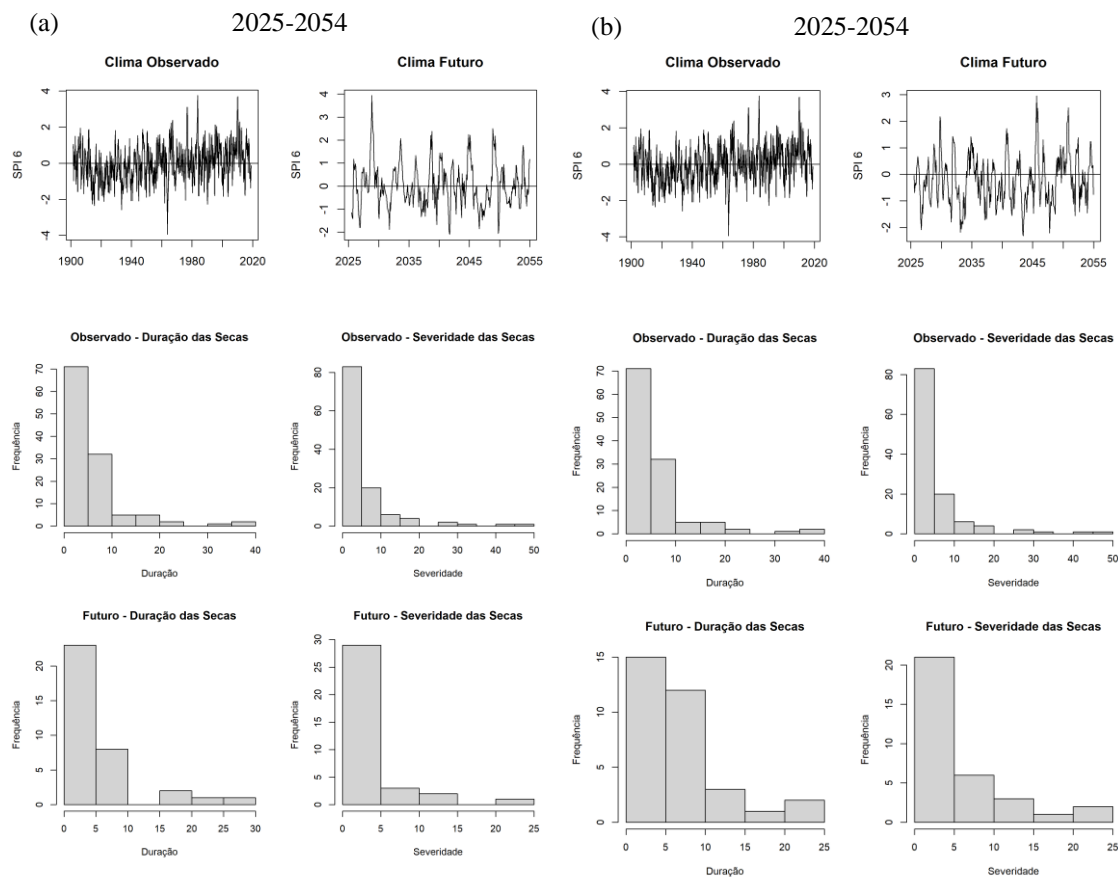
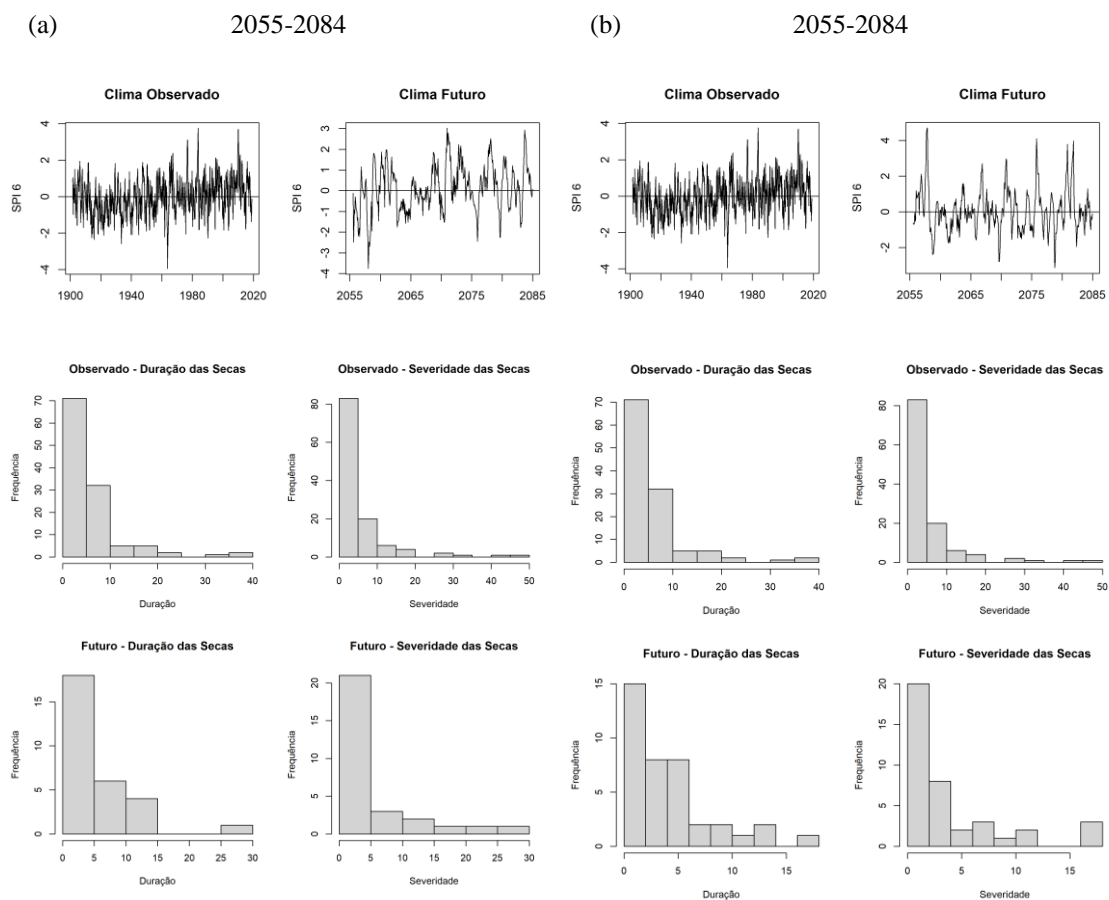


Figura 109 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI6, modelo MIROC6 (continua)



Nota: Análise considera modelo MIROC6 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.

Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 110 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI12, modelo MIROC6 (continua)

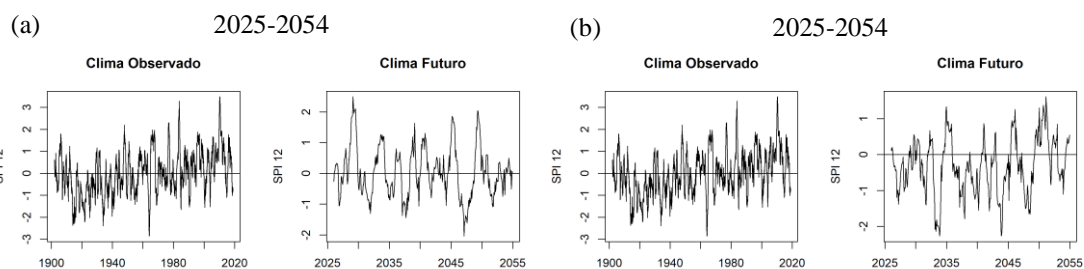
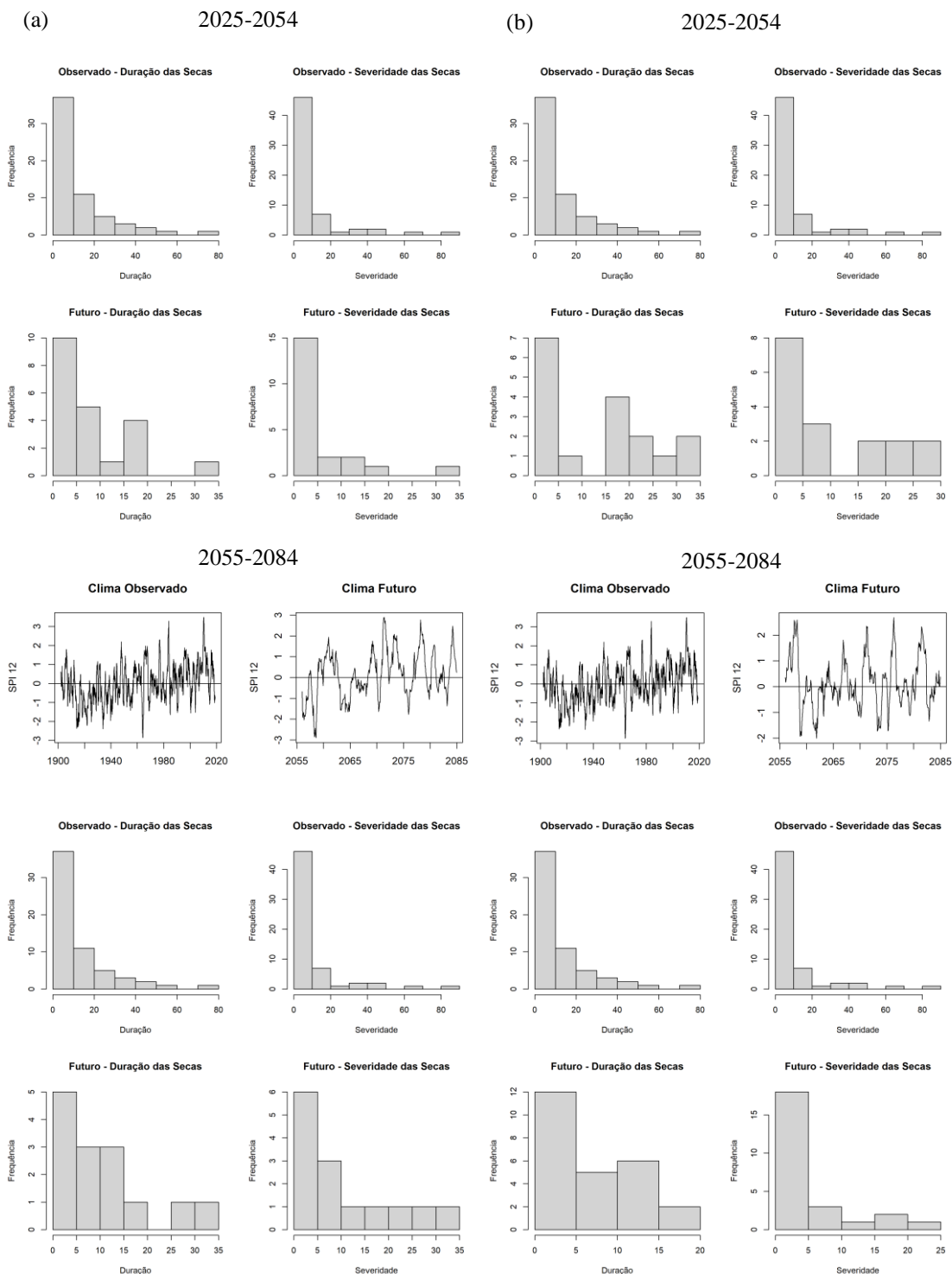


Figura 110 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI12, modelo MIROC6 (continua)



Nota: Análise considera modelo MIROC6 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.

Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

ACCESS-CM2 (extremo de chuva)

Figura 111 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI3, modelo ACCESS-CM2 (continua)

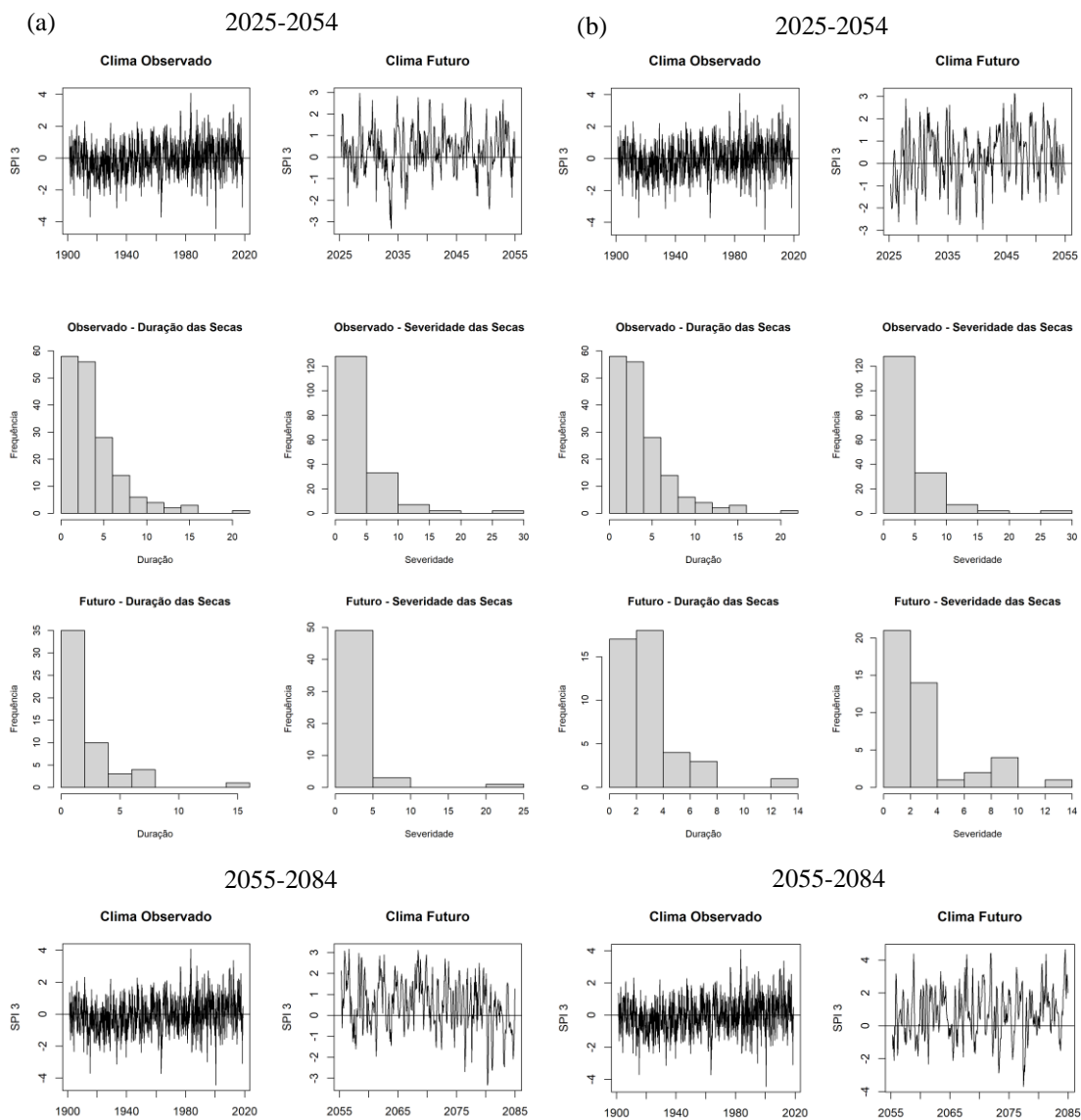
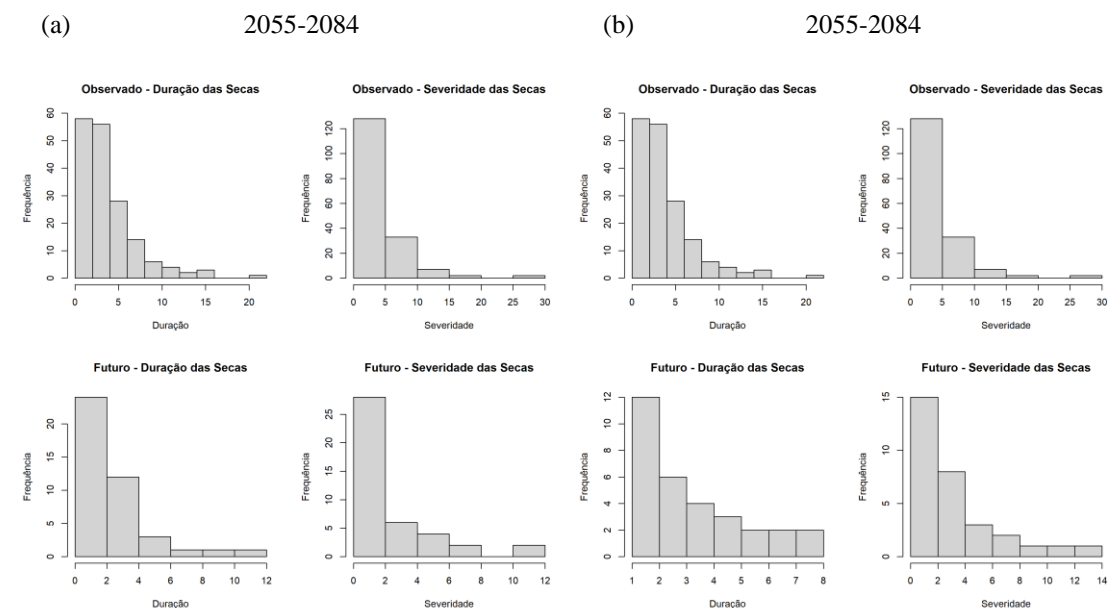


Figura 111 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI3, modelo ACCESS-CM2 (continua)



Nota: Análise considera modelo ACCESS-CM2 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.
 Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 112 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI6, modelo ACCESS-CM2 (continua)

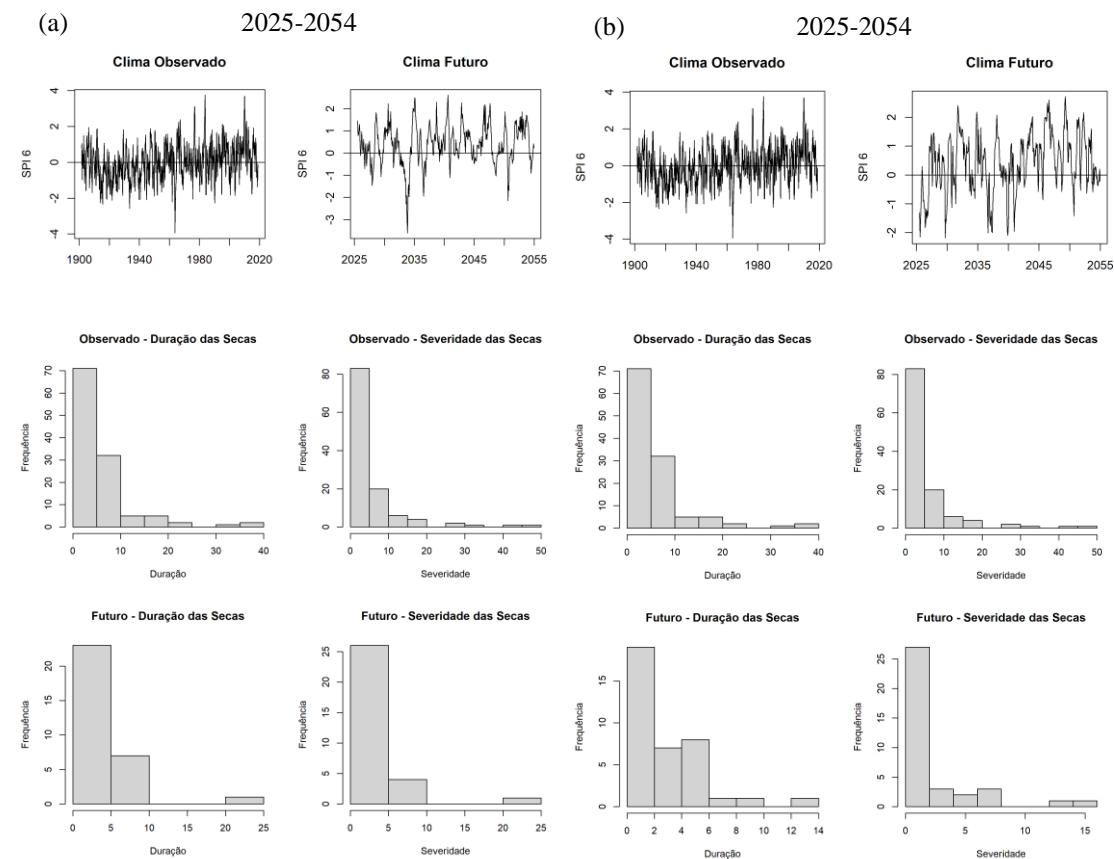
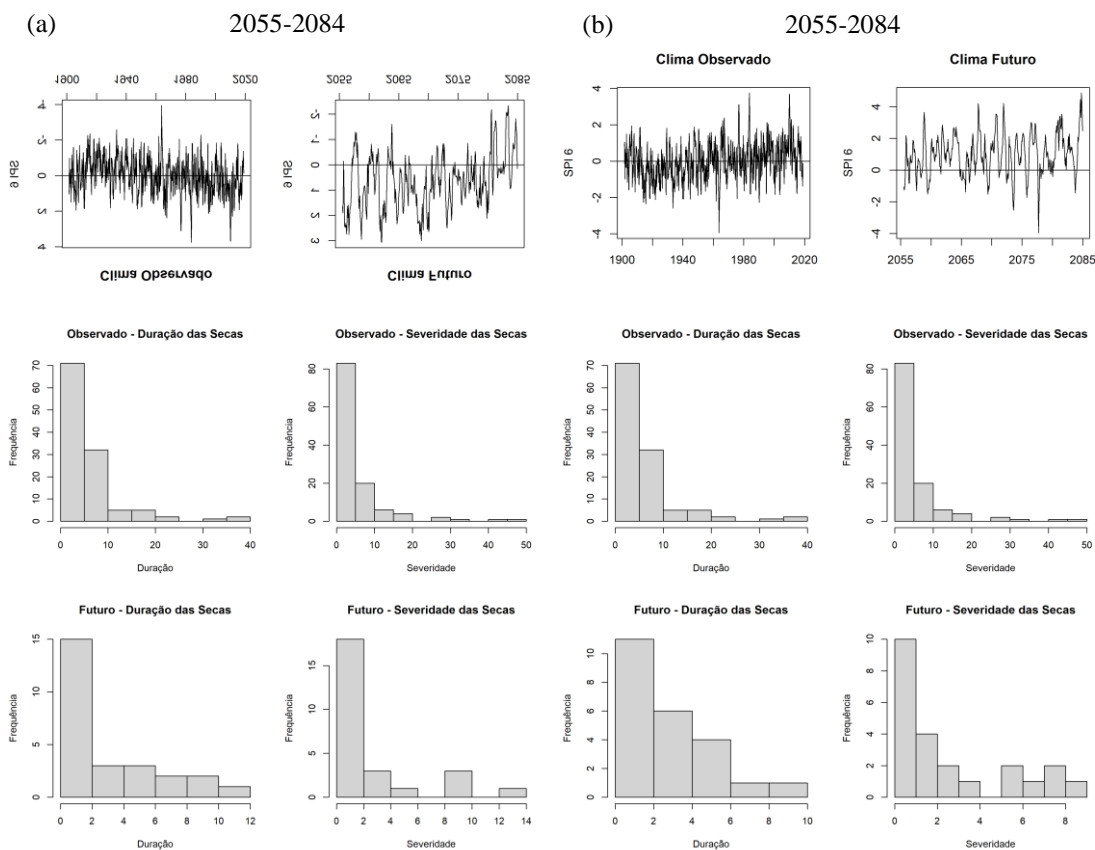


Figura 112 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI6, modelo ACCESS-CM2 (continua)



Nota: Análise considera modelo ACCESS-CM2 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.
 Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 113 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI12, modelo ACCESS-CM2 (continua)

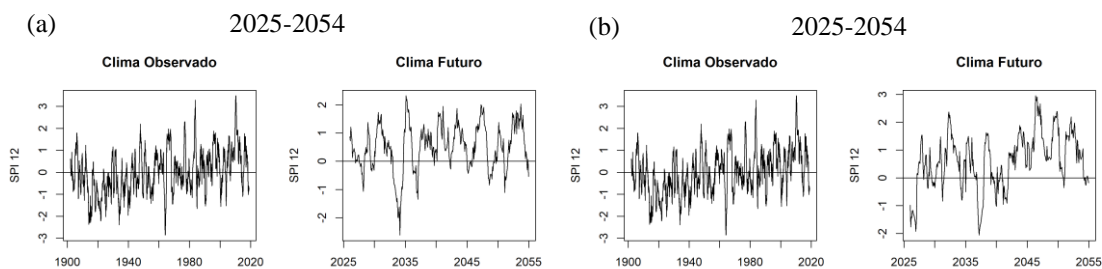
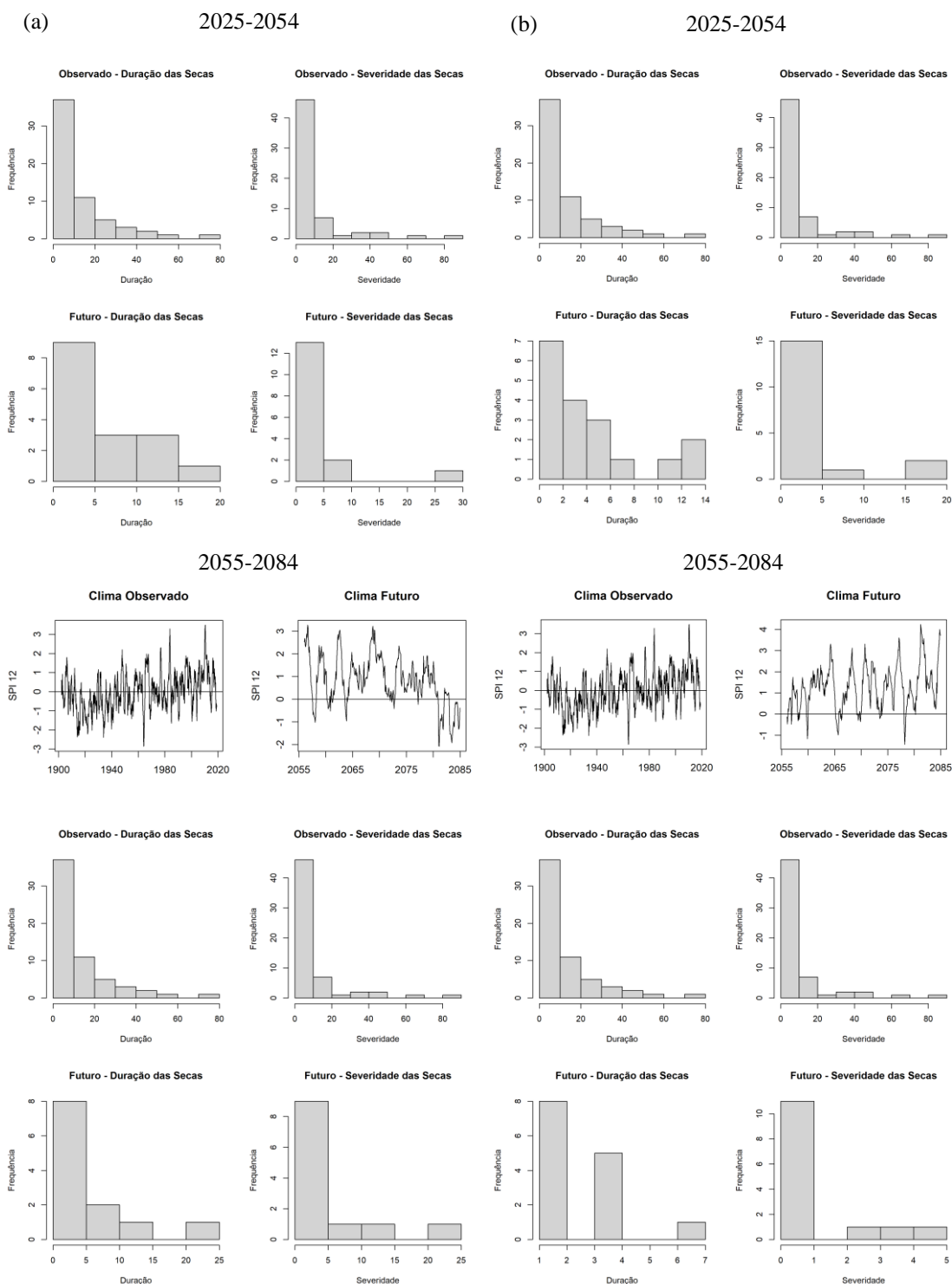


Figura 113 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI12, modelo ACCESS-CM2 (continua)



Nota: Análise considera modelo ACCESS-CM2 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.

Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

CanESM5 (extremo de seca)

Figura 114 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI3, modelo CanESM5 (continua)

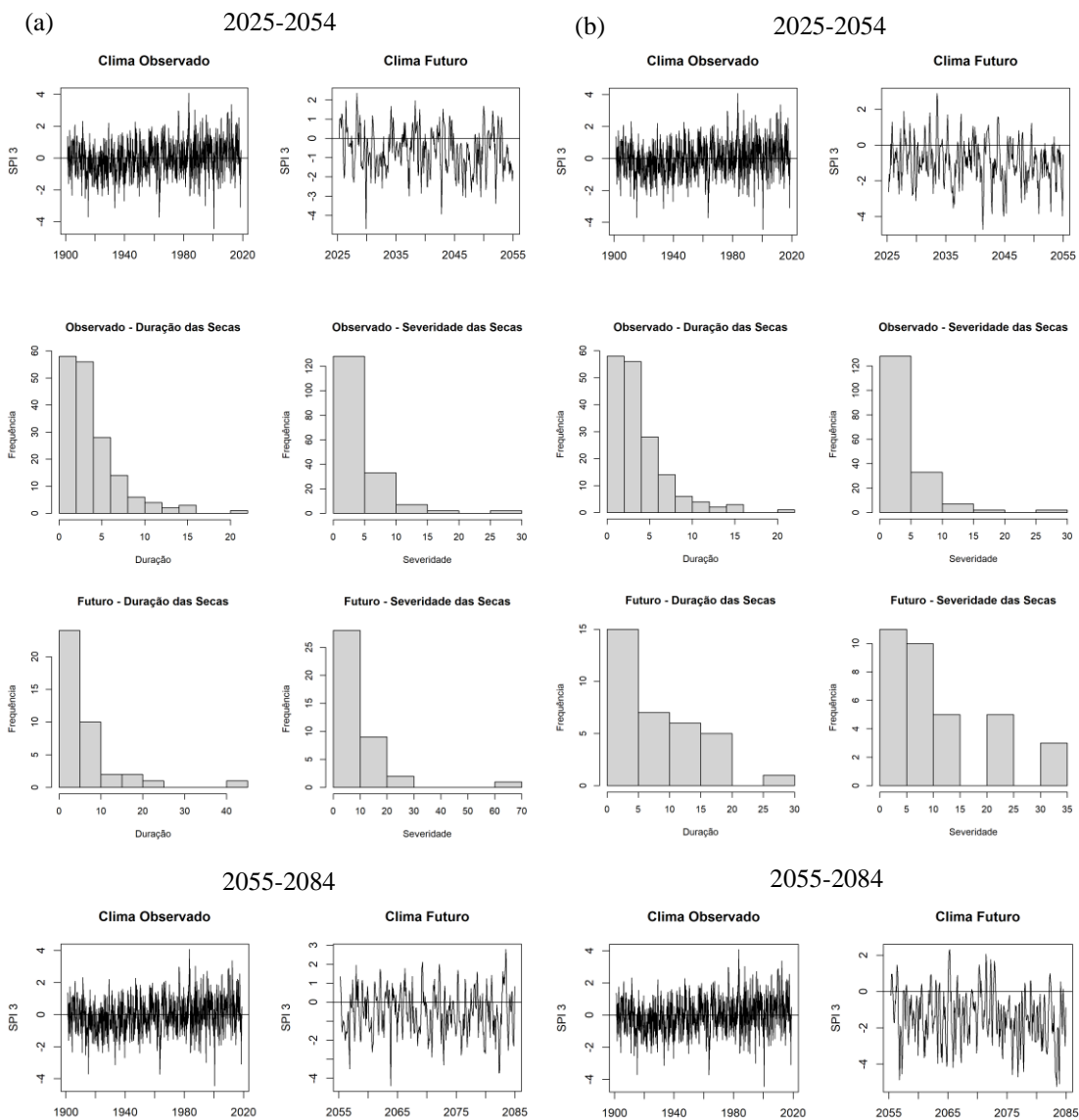
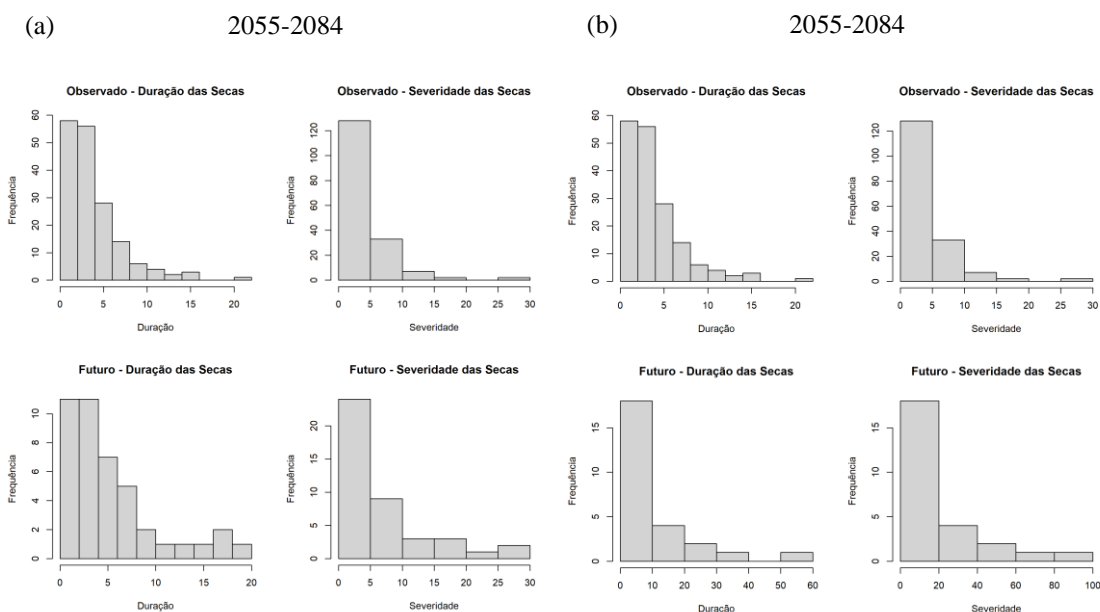


Figura 114 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI3, modelo CanESM5 (continua)



Nota: Análise considera modelo CanESM5 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.

Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 115 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI6, modelo CanESM5 (continua)

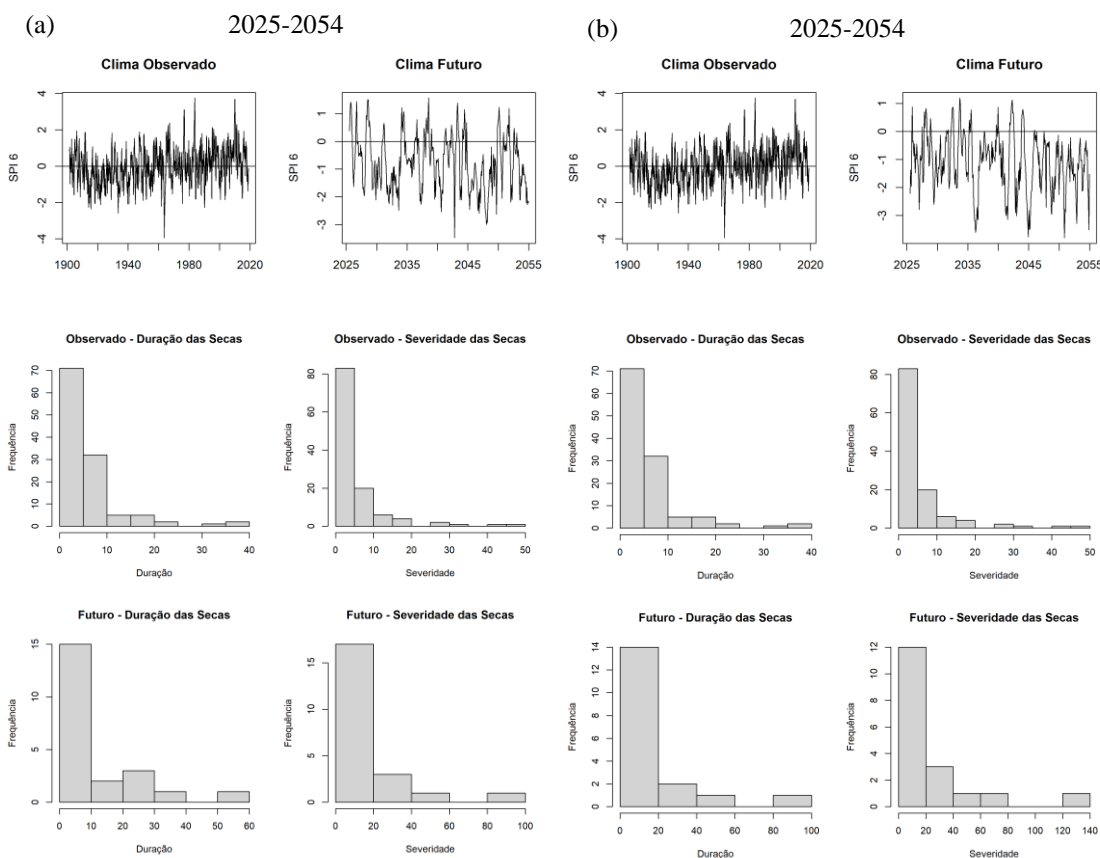
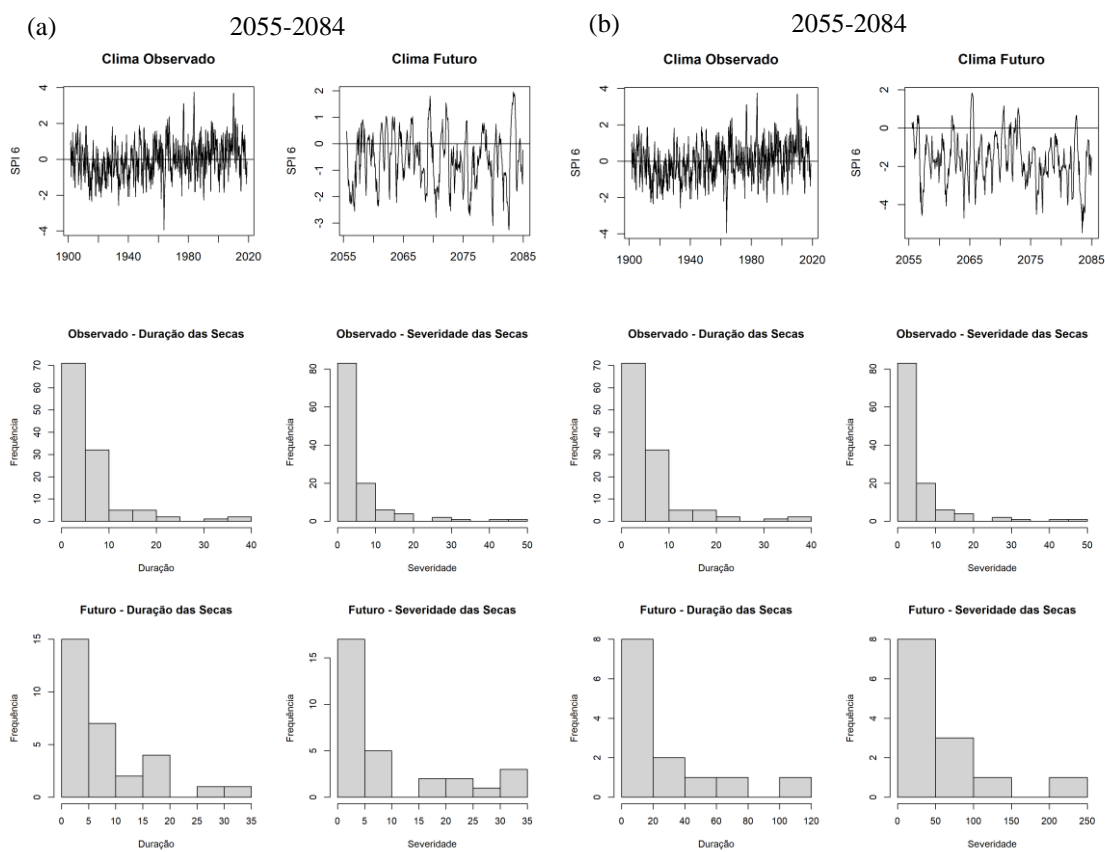


Figura 115 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI6, modelo CanESM5 (continua)



Nota: Análise considera modelo CanESM5 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.

Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.

Figura 116 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI12, modelo CanESM5 (continua)

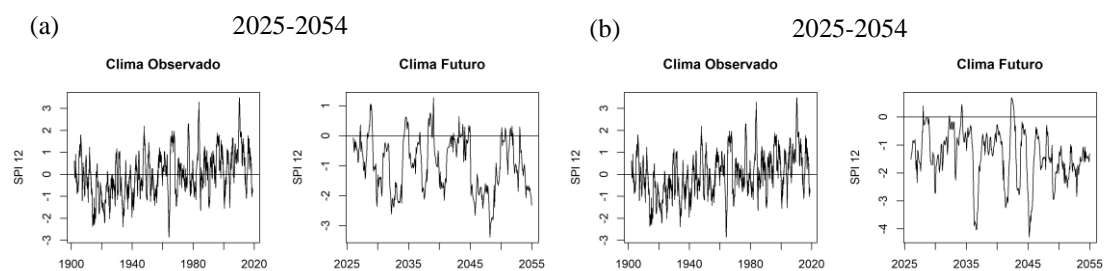
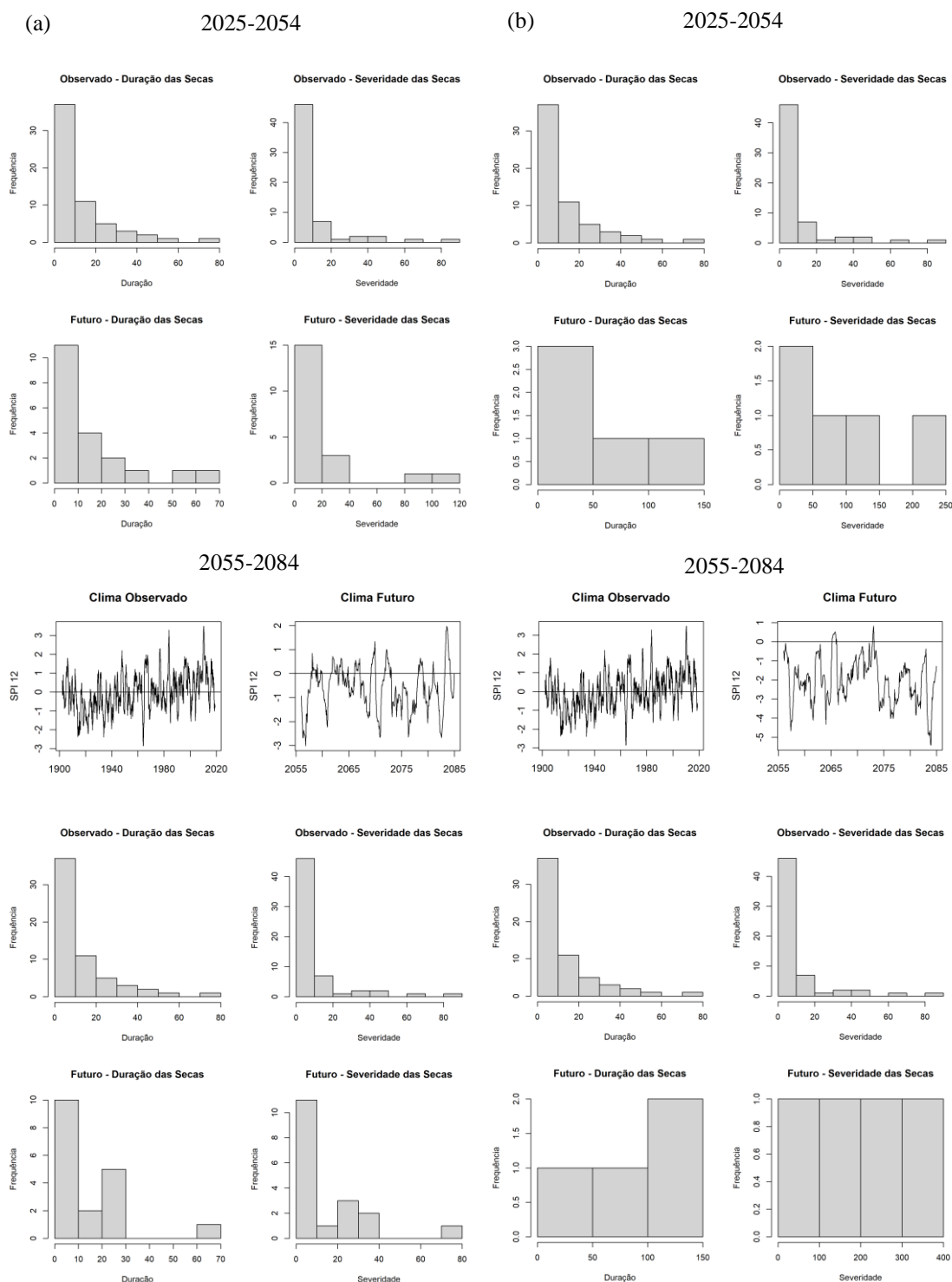


Figura 116 – Avaliação das secas em Santa Cecília com SPI12, modelo CanESM5 (continua)



Nota: Análise considera modelo CanESM5 para dois períodos 2025-2054 e 2055-2084 em relação à precipitação histórica de 1901-2018.

Legenda: nos cenários (a) SSP2-4,5 e (b) SSP5-8,5.