



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

FILIPPE OTÁVIO PASSOS

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE ENERGÉTICA
DOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS DO
SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL FRENTE ÀS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS E NOS PADRÕES DE
USOS CONSUNTIVOS DA ÁGUA**

13 de março de 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

FILIPPE OTÁVIO PASSOS

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE ENERGÉTICA
DOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS DO
SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL FRENTE ÀS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AOS PADRÕES DE
USOS CONSUNTIVOS DA ÁGUA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência/Economia do Setor Eletroenergético.

Orientador: Prof. Dr. José Wanderley Marangon Lima.

Coorientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva.

Itajubá, 13 de março de 2026

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTA TESE
A MINHA MÃE, ELIANE
A MEU PAI, LÚCIO
A MINHA ESPOSA, VÂNIA
E AO MEU FILHO, MATTEO.

AGRADECIMENTO

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus, que me deu forças durante essa etapa tão desafiadora em minha vida, pela proteção aos meus familiares me proporcionando tranquilidade para que eu pudesse estar focado nesse trabalho. Agradeço ao professor José Wanderley Marangon Lima, pela oportunidade que me foi dada e pela orientação durante esses anos no doutorado do programa de pós-graduação em engenharia elétrica na Universidade Federal de Itajubá (Unifei), contribuindo imensamente para o meu crescimento acadêmico. Agradeço ao professor Benedito Cláudio da Silva por todas as oportunidades que me proporcionou ao longo dos últimos anos, sendo o doutorado uma consequência de uma dessas oportunidades, por toda a paciência, atenção e orientação. Ao CNPq, cujo apoio financeiro foi fundamental para o meu sustento e ao de minha família em Itajubá durante esses importantes anos de minha formação. A minha família, principalmente a minha esposa Vania e ao meu filho Matteo que me ajudaram nos momentos mais difíceis e desafiadores do processo, aos meu pai, Lúcio e a minha mãe Eliane, a quem atribuo todo o meu sucesso acadêmico, pois me apoiou e suportou desde os primeiros anos de estudo, mesmo quando eu nem imaginava que poderia chegar tão longe. Agradeço também aos bolsistas Pedro Henrique, Rafael, Sarah e Victor que me auxiliaram no desenvolvimento do trabalho e a colega de pesquisa e doutoranda do programa, Marina de Almeida Barbosa, pelo fornecimento dos scripts de manipulação das variáveis climáticas e apoio na utilização destes.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	5
2.1. Hipótese	5
2.2. Objetivo Geral	5
2.3. Objetivos Específicos	5
3. REFERENCIAL TEÓRICO	7
3.1. O Setor Elétrico Brasileiro e suas características	7
3.2. Principais Definições dos Modelos Hidrológicos e Aplicações do MGB.....	10
3.3. Mudanças Climáticas e as Relações com os Setores da Sociedade.....	17
3.4. Usos Consuntivos da Água no Brasil	22
3.4.1. Evapotranspiração, agricultura irrigada e mudanças climáticas.....	26
3.5. Definições e Cálculo da Energia Natural Afluente	29
4. METODOLOGIA	31
4.1. Descrição geral da metodologia	31
4.2. Projeções dos Usos Consuntivos da Água.....	33
4.3. Dados e softwares utilizados	40
4.4. Desenvolvimentos no MGB	45
4.5. Projeções climáticas CMIP6 e NEX-GDDP:	46
4.6. Descrição da área de estudo.....	50
5. RESULTADOS	51
5.1. Pré-processamento do MGB.....	51
5.2. Calibração do MGB para as 27 bacias hidrográficas	57
5.3. Verificação de ajuste das simulações com o MGB alimentado pelos modelos climáticos do NEX-GDDP.....	72
5.4. Projeções climáticas do NEX-GDDP	76
5.5. Projeções de usos consuntivos da água para os aproveitamentos hidrelétricos	85
5.6. Projeção de Vazões com Incorporação de Mudanças Climáticas e Usos Consuntivos da Água	101
5.7. Projeção da Energia Natural Afluente dos Aproveitamentos Hidrelétricos .	129
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Panorama da matriz elétrica brasileira (BEN, 2024).	7
Figura 2 Demanda energética dividida por setor da sociedade (BEN, 2024).....	8
Figura 3 Divisão em subsistemas do SIN (ONS, 2025).	9
Figura 4 Estrutura do modelo MGB (Collischonn et al., 2020).	11
Figura 5 Níveis de discretização da bacia hidrográfica (Adaptado de Collischonn et al., 2020).....	12
Figura 6 Fluxograma de aplicação do MGB em relação aos dados de entrada e as etapas de geoprocessamento no Qgis (Adaptado de Collischonn, 2001).	13
Figura 7 Efeito das mudanças climáticas na geração hidrelétrica global (Wasti et al., 2021).....	19
Figura 8 Esquema geral dos estudos de impactos de mudanças climáticas na geração hidrelétrica (Lucena, 2010).....	22
Figura 9 Retiradas de água por região do Brasil para o ano de 2017 para o abastecimento humano (ANA, 2019).	23
Figura 10 Retiradas de água do setor industrial por região do Brasil para o ano de 2017 (ANA, 2019).....	23
Figura 11 Retiradas de água do setor irrigação por região do Brasil para o ano de 2017 (ANA, 2019).....	24
Figura 12 Retiradas de água no Brasil no ano de 2019 (ANA, 2019).	25
Figura 13 Evolução da retirada de água no Brasil (ANA, 2019).	25
Figura 14 Fluxograma da metodologia de trabalho com o resumo das principais etapas realizadas.	31
Figura 15 Projeção brasileira de crescimento populacional. Fonte: IBGE (2018).	35
Figura 16 Etapas para a projeção do consumo de água pela taxa de variação histórica por setor.	37
Figura 17 Correção das projeções de consumo de água para incorporar o efeito das mudanças climáticas.	38
Figura 18 Estações pluviométricas (ANA, 2023).....	40
Figura 19 Estações climáticas do INMET encontradas no território nacional (INMET, 2025).....	41
Figura 20 Modelo Digital de Elevação da América do Sul (CGIAR-CSI, 2025).	42
Figura 21 Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica da América do Sul (Fan et al., 2015).....	43
Figura 22 Distribuição das bacias hidrográficas e aproveitamentos hidrelétricos avaliados.	51
Figura 25 Delimitação da bacia de drenagem e sub-bacias da bacia do rio Uruguai.	55

Figura 26 Valores iniciais adotados nos parâmetros calibráveis (Silva, 2007).	58
Figura 27 Valores obtidas após a calibração para a sub-bacia respectiva a UHE Tucuruí.	58
Figura 28 Resumo das estatísticas de calibração obtidas para as 27 bacias hidrográficas avaliadas.	59
Figura 29 Resultados da estatística Nash Sutcliffe (NS) para todos os aproveitamentos hidrelétricos.	60
Figura 33 Destaques das estatísticas da bacia hidrográfica do rio Madeira.	65
Figura 34 Destaques das estatísticas da bacia hidrográfica do rio Paraná.....	66
Figura 37 Hidrogramas de vazões observadas x simuladas da UHE Aimorés (Bacia do rio Doce).	69
Figura 39 Hidrogramas de vazões observadas x simuladas da UHE Itaipú (BH do rio Paraná).	70
Figura 40 Hidrogramas de vazões observadas x simuladas da UHE Sobradinho (BH São Francisco).	70
Figura 41 Hidrogramas de vazões observadas x simuladas da UHE Garibaldi (BH do rio Uruguai).	70
Figura 42 Climatologia de vazões das Usinas Hidrelétricas: Sá Carvalho (Doce), Promissão (Paraná), Três Marias (São Francisco).....	73
Figura 44 Projeções das variações médias anuais da temperatura e da evapotranspiração para as bacias dos rios Doce e Madeira.	78
Figura 46 Anomalia de precipitação da bacia do rio Doce.....	81
Figura 47 Anomalia de precipitação da bacia do rio Madeira.....	82
Figura 50 Evolução do consumo total de água por sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Doce.....	85
Figura 51 Evolução do consumo total de água por sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Madeira.....	86
Figura 52 Evolução do consumo total de água por sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Paraná.	86
Figura 53 Evolução do consumo total de água por sub-bacia da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	87
Figura 55 Evolução da projeção dos consumos de água para os anos de a) 2021, b) 2050, c) 2080 e d) 2100.	90
Figura 58 Projeções anuais de usos consuntivos da água por setor e projeção do total anual da UHE Itaipu (Paraná).....	93
Figura 59 Projeções anuais de usos consuntivos da água por setor e projeção do total anual da UHE Sobradinho (São Francisco).	94
Figura 60 Projeções anuais de usos consuntivos da água por setor e projeção do total anual da UHE Passo São João (Uruguai).	95

Figura 61 Valores de Fcc obtidos a partir da temperatura média e da evapotranspiração para os cenários SSP2-4.5 e SSP2-4.5 para a bacia do rio Doce.....	98
Figura 62 Valores de Fcc obtidos a partir da temperatura média e da evapotranspiração para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para a bacia do rio Paraná.	98
Figura 63 projeções de vazões de usos consuntivos das bacias dos rios Doce e Paraná com efeito de mudanças climáticas.	100
Figura 64 Vazões médias mensais da UHE Mascarenhas na BH Doce, cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.	103
Figura 65 Vazões médias mensais da UHE Jirau na BH Madeira, cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.	106
Figura 66 Vazões médias mensais da UHE Itaipu na BH Paraná, cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.	109
Figura 67 Vazões médias mensais da UHE Moxotó na BH São Francisco, cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.	111
Figura 68 Vazões médias mensais da UHE Foz do Capecó na BH Uruguai, cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.	113
Figura 69 Curvas de permanência da UHE Sá Carvalho na bacia do rio Doce para os períodos futuros e cenários.	115
Figura 70 Curvas de permanência da UHE Santo Antônio na bacia do rio Madeira para os períodos futuros e cenários.	118
Figura 71 Curvas de permanência da UHE Chavantes na bacia do rio Paraná para os períodos futuros e cenários.	121
Figura 72 Curvas de permanência da UHE Sobradinho na bacia do rio São Francisco para os períodos futuros e cenários.	124
Figura 73 Curvas de permanência da UHE São José na bacia do rio Uruguai para os períodos futuros e cenários.	127
Figura 74 Variações médias da ENA por aproveitamento hidrelétrico para o modelo ACCESS.	133
Figura 75 Variações médias da ENA por aproveitamento hidrelétrico para o modelo CanESM.	134
Figura 76 Variações médias da ENA por aproveitamento hidrelétrico para o modelo INM.	135
Figura 77 Variações médias da ENA por aproveitamento hidrelétrico para o modelo IPSL.	136
Figura 78 Variações médias da ENA por aproveitamento hidrelétrico para o modelo MPI.	137
Figura 79 Variação média da ENA por bacia hidrográfica para o modelo ACCESS. .	140
Figura 81 Variação média da ENA por bacia hidrográfica para o modelo INM.....	141
Figura 82 Variação média da ENA por bacia hidrográfica para o modelo IPSL.	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Estatísticas de eficiência do modelo MGB (Silva, 2007).	13
Tabela 2 Valores de referência dos coeficientes estatísticos NS, NSLog e ΔV (Moriasi et al., 2012).	14
Tabela 3 modelos do NEX-GDDP e as variáveis climáticas disponibilizadas (Thrasher et al., 2022).	21
Tabela 4 URH determinadas para a América do Sul (Fan et al., 2015).	42
Tabela 5 Valores típicos de Albedo de cobertura vegetais (Collischonn, 2001).	43
Tabela 6 Valores de IAF de coberturas vegetais da literatura (Collischonn, 2001).	44
Tabela 7 Altura da vegetação para diferentes tipos de cobertura vegetal (Collischonn, 2001).	44
Tabela 8 Valores de RS para diversos tipos de vegetação em condição de boa disponibilidade de água no solo (Collischonn, 2001).	44
Tabela 9 Parâmetros calibráveis do modelo MGB (Collischonn et al., 2020).	45
Tabela 10 Parâmetros calibráveis do modelo MGB (Collischonn et al., 2020).	45
Tabela 11 Área de drenagem e número de minibacias determinados no pré-processamento do MGB.	55
Tabela 12 Resumo das variações da QMLT das vazões médias UHE Mascarenhas. ..	103
Tabela 13 Resumo das variações da QMLT das vazões médias UHE Jirau.	106
Tabela 14 Resumo das variações da QMLT das vazões médias da UHE Itaipu.	109
Tabela 15 Resumo das variações da QMLT das vazões médias UHE Moxotó.	111
Tabela 16 Resumo das variações da QMLT das vazões médias da UHE Foz do Chapecó.	113
Tabela 17 Variação percentual das vazões extremas da UHE Sá Carvalho.	116
Tabela 18 Variação percentual das vazões extremas da UHE Santo Antônio.	119
Tabela 19 Variação percentual das vazões extremas da UHE Chavantes.	122
Tabela 20 Variação percentual das vazões extremas da UHE Sobradinho.	125
Tabela 21 Variação percentual das vazões extremas da UHE São José.	128
Tabela 22 Valores do fator de produtibilidade dos aproveitamentos hidrelétricos.	130

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

APP - Áreas de Preservação Permanente

AR1 - Primeiro Ciclo de Avaliação

AR2 - Segundo Ciclo de Avaliação

AR4 - Quarto Ciclo de Avaliação

AR5 - Quinto Ciclo de Avaliação

AR6 - Sexto Relatório de Avaliação

BH – Bacia Hidrográfica

CDO - Climate Data Operators

CEMADEN – Centro de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais

Cepel - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CMIP - Coupled Model Intercomparison Project

CNAE - Classificação Nacional de Atividades Econômicas

CPTEC – Centro de Previsões de Tempo e Clima

CRAE - Complementary Relationship Areal Evapotranspiration

CRLE - Complementary Relationship Lake Evaporation

CSI - Consortium for Spatial Information

DNAEE – Departamento Nacional de Água e Esgoto

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ENA - Energia Natural Afluenta

ET - Evapotranspiração

Eto - Evapotranspiração de Referência

Etp - Evapotranspiração Potencial

Fortran - Formula Translation System

GCM - Modelos Climáticos Globais

GDDP - Global Daily Downscaled Projections

GEE - Gases de Efeito Estufa

HES - Suavização Exponencial de Holt

IAF - Índice de Área Foliar

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas

MC - Mudanças Climáticas

MDE – Modelo Digital de Elevação

MGB-IPH - Modelo de Grande Bacias

NetCDF – Network Common Data Form

NEX - NASA Earth Exchange

OMM - Organização Meteorológica Mundial

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

RCM - Modelos Climáticos Regionais

RCP - Representative Concentration Pathways

RS - Resistência Superficial

SEB – Setor Elétrico Brasileiro

SES - Suavização Exponencial Simples

SIG Sistema de Informações Geográfica

SIN - Sistema Interligado Nacional

SIN - Sistema Interligado Nacional

SIN Sistema Interligado Nacional

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SSP - Shared Socio-Economic Pathways (Caminhos Socioeconômicos Partilhados)

TAR - Terceiro Ciclo de Avaliação

UHE – Usina Hidrelétrica

URH - Unidades de Resposta Hidrológica

UTE - Usina Termelétrica

RESUMO

As mudanças climáticas (MC) oriundas de processos naturais têm sido potencializadas pelas ações antrópicas, principalmente pelo maior aporte de gases de efeito estufa (GEE). Essas mudanças têm afetado diversos setores da sociedade, tais como o meio ambiente, os recursos hídricos, a geração de energia elétrica, entre outros. Os últimos relatórios de avaliação do clima do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) apontam para o futuro com reduções na precipitação em algumas regiões do Brasil, aumento na frequência e intensidade de eventos extremos como secas e inundações, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, e aumento da temperatura no globo como um todo. Esses fatores associados a mudanças nos padrões de consumo de água, que também são influenciados pelo clima, podem impactar ainda mais o setor elétrico brasileiro (SEB), devido à dependência da geração hidráulica. Este trabalho avalia os impactos das mudanças climáticas e das demandas hídricas nas vazões das principais bacias hidrográficas e aproveitamentos hidrelétricos e avalia os efeitos na geração de energia elétrica. Para isso, utiliza-se o modelo hidrológico MGB-IPH para a simulação do cenário histórico, definido para o período de 1970 a 2014 e para projeções de cenários futuros, definido para o período de 2015 a 2100, sob a influência das mudanças do clima, utilizando projeções de cinco modelos climáticos oriundos do projeto *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections/ Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (NEX-GDDP/CMIP6) de dois cenários de emissão, a saber, o *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) e das projeções dos usos consuntivos da água fornecidas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A avaliação energética aqui proposta é realizada com base na Energia Natural Afluente (ENA), pois essa variável é diretamente relacionada às vazões dos aproveitamentos hidrelétricos. Os resultados mostram que os cinco modelos climáticos concordam em apontar para as reduções das vazões no cenário futuro dos principais aproveitamentos hidrelétricos, porém os modelos discordam quanto à amplitude das reduções. As projeções de ENA com o modelo Can-ESM5 indicam as maiores reduções, na ordem de até 100%, na bacia do rio Paraguaçu. As projeções da ENA com o modelo INM apontaram para variações positivas, chegando a acréscimos próximos de 10%. Nos demais modelos climáticos, as reduções na ENA variam próximas a 20% em média. Os resultados mais importantes desse trabalho são as indicações de como as mudanças climáticas e o consumo da água poderão impactar a geração hidrelétrica e tornar o setor ainda mais vulnerável. Com isso, os resultados obtidos nesse trabalho podem servir de base para que os órgãos competentes possam se preparar e agir, para que o país não venha a sofrer com as consequências na geração hidrelétrica no futuro.

ABSTRACT

Climate change (CC), resulting from natural processes, has been intensified by anthropogenic activities, mainly due to the increased emission of greenhouse gases (GHGs). These changes have affected several sectors of society, including the environment, water resources, and electricity generation, among others. The latest climate assessment reports published by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) indicate future reductions in precipitation in some regions of Brazil, an increase in the frequency and intensity of extreme events such as droughts and floods—particularly in the North and Northeast regions—and a rise in global average temperatures. These factors, combined with changes in water consumption patterns, which are also influenced by climate conditions, may further impact the Brazilian Electric Sector (BES) due to its strong dependence on hydropower generation. This study assesses the impacts of climate change and water demands on streamflows in the main river basins and hydropower plants in Brazil, as well as their effects on electricity generation. For this purpose, the MGB-IPH hydrological model was applied to simulate the historical period (1970–2014) and future scenarios (2015–2100) under climate change conditions. The simulations were driven by projections from five climate models from the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections/Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (NEX-GDDP/CMIP6) dataset, considering two greenhouse gas emission scenarios, namely the Shared Socioeconomic Pathways (SSP2-4.5 and SSP5-8.5), as well as projections of consumptive water uses provided by the Brazilian National Water and Basic Sanitation Agency (ANA). The energy assessment proposed in this study is based on Natural Inflow Energy (NIE), since this variable is directly related to streamflows at hydropower plants. The results show that all five climate models consistently project reductions in streamflows for the future scenarios at the major hydropower plants evaluated. However, the models differ regarding the magnitude of these reductions. The NIE projections obtained with the CanESM5 model indicate the largest decreases, reaching reductions of up to 100% in the Paraguaçu River Basin. In contrast, the projections generated by the INM model indicate positive variations, with increases approaching 10%. For the remaining climate models, reductions in NIE average around 20%. The most significant findings of this study highlight how climate change and increasing water consumption may affect hydropower generation and further increase the vulnerability of the sector. Therefore, the results presented here can provide valuable information to support planning and decision-making by responsible agencies, enabling the implementation of measures to mitigate future impacts on hydropower generation and enhance the resilience of the Brazilian electricity sector.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica constitui um dos pilares fundamentais do desenvolvimento econômico e social contemporâneo, sendo indispensável para o funcionamento das atividades produtivas, dos serviços essenciais e das atividades cotidianas da população.

Desde aplicações de baixa demanda energética, como a iluminação residencial e pública, até processos industriais complexos e sistemas de transporte, a disponibilidade de energia influencia diretamente os níveis de produtividade, competitividade econômica e qualidade de vida. Nesse contexto, a expansão da demanda energética observada nas últimas décadas tem imposto desafios crescentes aos sistemas de geração e distribuição de energia em todo o mundo.

No Brasil, a matriz elétrica apresenta características singulares quando comparada à de outros países, destacando-se pela elevada participação das fontes renováveis e, especialmente, da geração hidrelétrica.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2024), os empreendimentos hidrelétricos representam aproximadamente metade da capacidade instalada de geração elétrica em operação no país.

Essa característica confere vantagens importantes em termos de emissões reduzidas de gases de efeito estufa e custos operacionais relativamente baixos. Entretanto, também torna o sistema elétrico nacional fortemente dependente da disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas que alimentam os reservatórios das usinas.

A dependência da geração hidrelétrica torna evidente a estreita relação existente entre os setores de recursos hídricos e energia. A produção de eletricidade em usinas hidrelétricas depende diretamente das vazões afluentes aos reservatórios, as quais são condicionadas por fatores climáticos, hidrológicos e antrópicos. Dessa forma, alterações na disponibilidade hídrica podem impactar significativamente a capacidade de geração de energia, influenciando a segurança energética e a estabilidade do sistema elétrico brasileiro.

Paralelamente ao crescimento da demanda energética, observa-se um aumento contínuo das demandas hídricas decorrente do crescimento populacional, da expansão das atividades agrícolas, do desenvolvimento industrial e econômico e da ampliação dos sistemas de abastecimento urbano.

A água é um recurso essencial para diversos usos consuntivos, incluindo irrigação, abastecimento humano, dessedentação animal, atividades industriais e mineração.

Consequentemente, a crescente competição entre os diferentes usuários intensifica a pressão sobre os recursos hídricos disponíveis e pode reduzir a disponibilidade de água para a geração hidrelétrica.

Além dos impactos associados ao aumento das demandas hídricas, as mudanças climáticas representam um fator adicional de preocupação para o planejamento energético. O aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa tem provocado alterações nos padrões climáticos globais, influenciando variáveis como precipitação, temperatura, evapotranspiração e ocorrência de eventos extremos. Tais alterações podem modificar significativamente o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, afetando a disponibilidade hídrica e os regimes de vazão responsáveis pela geração de energia elétrica.

A vulnerabilidade do setor elétrico brasileiro às condições hidrológicas já foi evidenciada em diferentes momentos da história recente. A crise energética de 2001 demonstrou como períodos prolongados de escassez hídrica podem comprometer os níveis de armazenamento dos reservatórios e limitar a capacidade de geração do sistema hidrelétrico nacional.

Como consequência, medidas de racionamento foram implementadas para garantir o equilíbrio entre oferta e demanda de energia. Mais recentemente, a crise hídrica observada entre 2020 e 2021 voltou a evidenciar a dependência do setor elétrico brasileiro das condições climáticas e hidrológicas, exigindo maior despacho de usinas termelétricas e elevando os custos de geração.

As consequências das crises energéticas transcendem os impactos sobre o setor elétrico. A necessidade de utilização intensiva de fontes termelétricas implica aumento dos custos operacionais, elevação das tarifas de energia elétrica e crescimento das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a redução da confiabilidade do sistema energético pode afetar o desempenho econômico de diversos setores produtivos, comprometendo investimentos, geração de empregos e competitividade econômica.

Nesse contexto, a segurança energética tem se consolidado como tema estratégico nas agendas de desenvolvimento sustentável. Diversos estudos apontam que sistemas energéticos excessivamente dependentes de uma única fonte de geração tendem a apresentar maior vulnerabilidade a perturbações climáticas, econômicas e geopolíticas. Dessa forma, compreender os fatores que influenciam a disponibilidade hídrica e a geração hidrelétrica torna-se essencial para o planejamento energético de longo prazo.

A avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos tem recebido crescente atenção da comunidade científica. Projeções elaboradas pelo IPCC indicam que alterações nos regimes de precipitação e temperatura poderão modificar significativamente a disponibilidade hídrica em diversas regiões do planeta ao longo do século XXI. No Brasil, tais alterações podem resultar em mudanças na magnitude, frequência e duração de eventos extremos, incluindo secas prolongadas e cheias intensas.

Entretanto, embora as mudanças climáticas sejam amplamente reconhecidas como importantes condicionantes da disponibilidade hídrica futura, elas não representam o único fator responsável pelas transformações observadas nos sistemas hídricos. As mudanças no uso e ocupação do solo, associadas à expansão urbana, agrícola e industrial, também exercem influência significativa sobre os processos hidrológicos. Da mesma forma, o aumento dos usos consuntivos da água pode modificar a disponibilidade hídrica efetivamente disponível para diferentes setores usuários.

Diante desse cenário, torna-se necessária a utilização de ferramentas capazes de representar adequadamente os processos hidrológicos e suas interações com fatores climáticos e antrópicos.

Os modelos hidrológicos distribuídos destacam-se como instrumentos fundamentais para a compreensão do comportamento das bacias hidrográficas e para a avaliação de cenários futuros de disponibilidade hídrica. Entre esses modelos, o Modelo de Grandes Bacias (MGB) apresenta ampla aplicação em estudos desenvolvidos no território brasileiro, sendo reconhecido por sua capacidade de representar processos hidrológicos em grandes escalas espaciais.

Neste trabalho, as simulações hidrológicas são realizadas por meio do Modelo de Grandes Bacias (MGB), permitindo a avaliação dos impactos de diferentes cenários climáticos sobre as vazões afluentes aos aproveitamentos hidrelétricos. As projeções climáticas são obtidas a partir dos modelos globais de circulação atmosférica do projeto CMIP6, utilizados pelo Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (AR6), com dados provenientes do conjunto NEX-GDDP, que disponibiliza séries climáticas submetidas a procedimentos de downscaling estatístico.

Adicionalmente, as projeções de demandas hídricas são fundamentadas nas informações disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do Manual de Usos Consuntivos da Água. A incorporação dessas projeções permite avaliar não apenas os impactos das mudanças climáticas sobre a

disponibilidade hídrica, mas também os efeitos decorrentes do crescimento das demandas de água pelos diferentes setores usuários ao longo do século XXI.

Apesar dos avanços observados na literatura científica relacionada aos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos e à avaliação da geração hidrelétrica, ainda são relativamente escassos os estudos que integram essas análises com projeções futuras de usos consuntivos da água. Em muitos casos, as avaliações energéticas consideram exclusivamente alterações climáticas ou apenas aspectos relacionados à expansão da demanda energética, desconsiderando a crescente competição entre os diferentes usuários dos recursos hídricos.

Essa lacuna é particularmente relevante no contexto brasileiro, uma vez que a disponibilidade efetiva de água para geração hidrelétrica depende não apenas das condições naturais de vazão, mas também das retiradas realizadas pelos demais setores usuários. Dessa forma, análises que não incorporam os usos consuntivos podem subestimar os impactos futuros sobre a produção de energia e sobre a segurança energética nacional.

A principal contribuição desta pesquisa consiste justamente na integração entre mudanças climáticas, disponibilidade hídrica, usos consuntivos da água e geração hidrelétrica em uma mesma estrutura metodológica de análise. Ao considerar simultaneamente as projeções climáticas futuras e a evolução das demandas hídricas, o estudo busca representar de forma mais realista os desafios que poderão ser enfrentados pelo setor elétrico brasileiro nas próximas décadas.

Além de contribuir para o avanço do conhecimento científico na interface entre recursos hídricos e energia, os resultados obtidos poderão subsidiar o planejamento energético de longo prazo. A identificação de possíveis reduções na disponibilidade hídrica e de seus impactos sobre a geração hidrelétrica permitirá o desenvolvimento de estratégias voltadas ao aumento da resiliência do setor elétrico brasileiro.

Por fim, a pesquisa contribui para preencher uma importante lacuna existente na literatura nacional ao incorporar, de forma conjunta, variáveis climáticas futuras e projeções de usos consuntivos da água em análises energéticas. Essa abordagem integrada amplia a compreensão dos fatores que condicionam a geração hidrelétrica e fornece uma base mais robusta para a tomada de decisão em um cenário marcado por crescentes incertezas climáticas, pressões sobre os recursos hídricos e necessidade de fortalecimento da segurança energética.

2. OBJETIVOS

2.1. Hipótese

Parte-se da hipótese de que as mudanças no clima global, caracterizadas principalmente pela redução da precipitação em determinadas regiões do Brasil, com destaque para as regiões Nordeste e Norte, e pelo aumento da temperatura média do ar, tendem a alterar os regimes hidrológicos e os padrões de disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas. Essas mudanças climáticas, associadas ao crescimento e à intensificação dos usos consuntivos da água, podem reduzir a disponibilidade de água para a geração hidrelétrica, afetando o desempenho das principais usinas do país. Como consequência, tais processos podem aumentar o risco de redução da geração de energia elétrica e comprometer, no longo prazo, a capacidade do sistema elétrico brasileiro de atender, de forma segura, às demandas energéticas futuras.

2.2. Objetivo Geral

Avaliar, de forma integrada, os impactos das mudanças climáticas sobre a geração de energia hidrelétrica das principais usinas do SIN. Considerando diferentes cenários climáticos futuros associados a alterações nos usos consuntivos da água, com o objetivo de compreender os efeitos dessas mudanças na disponibilidade hídrica e no desempenho energético do sistema hidrelétrico brasileiro.

2.3. Objetivos Específicos

Ajustar e calibrar o modelo hidrológico MGB para as bacias hidrográficas que contêm aproveitamentos hidrelétricos selecionados, utilizando séries históricas observadas, de modo a representar adequadamente as vazões naturais afluentes.

Desenvolver cenários futuros de mudanças climáticas a partir das projeções de variáveis realizadas no projeto NEX-GDDP/CMIP6 (precipitação, temperatura, umidade relativa, radiação e velocidade do vento), assegurando sua consistência e adequação às simulações hidrológicas realizadas com o MGB.

Desenvolver cenários futuros de alterações no consumo de água nas bacias hidrográficas estudadas, com base nas informações fornecidas por ANA (2009), incorporando aos diferentes setores de usos consuntivos condições associadas às mudanças climáticas.

Simular, por meio do modelo hidrológico ajustado, o efeito combinado dos cenários climáticos e dos usos consuntivos da água, avaliando seus impactos nas vazões afluentes aos aproveitamentos hidrelétricos.

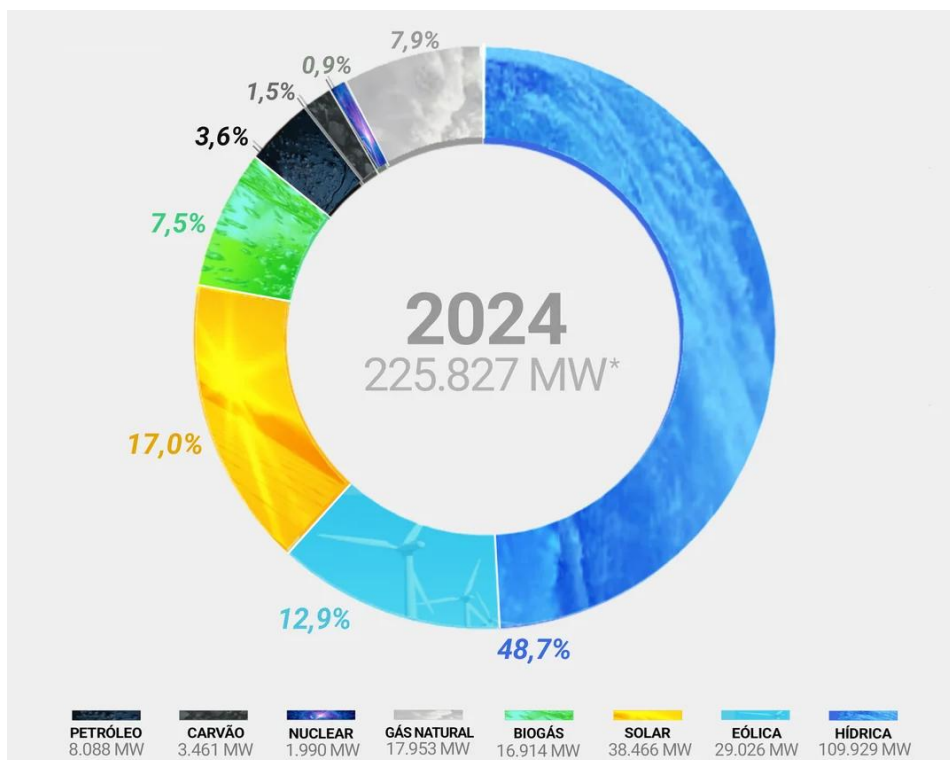
Analisar as consequências das alterações nas vazões simuladas sobre a geração de energia elétrica das principais usinas hidrelétricas de interesse do SIN.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. O Setor Elétrico Brasileiro e suas características

O Brasil possui características únicas na geração de energia elétrica (**Figura 1**). A maior oferta interna de geração continua sendo predominantemente renovável, com destaque para a hidráulica, com pouco menos 50% de toda a oferta.

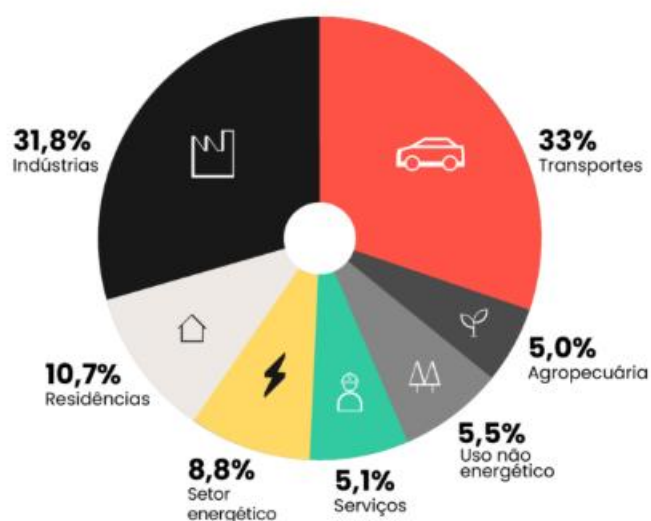
Figura 1 Panorama da matriz elétrica brasileira (BEN, 2024).



A predominância hidráulica faz com que a geração seja, de certa forma, vulnerável devido à dependência dos volumes armazenados nos reservatórios das usinas hidrelétricas (UHE), pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e centrais hidrelétricas (CGH).

Nos últimos anos a demanda energética tem se tornado cada vez maior. Os setores da sociedade, o comércio e as indústrias juntos representam mais de 50% de todo o consumo de energia elétrica do país (**Figura 2**). Embora as demandas energéticas individuais das residências sejam pequenas, o consumo agregado faz do setor o de segundo maior consumo, atrás apenas das indústrias (BEN, 2024).

Figura 2 Demanda energética dividida por setor da sociedade (BEN, 2024).



Devido a esse aumento projetado da demanda, se torna necessária a produção de energia na quantidade suficiente para atender todos os setores da sociedade para que não ocorra um novo racionamento.

Outro fator relevante é a dependência da precipitação, devido a predominância hidráulica, ou seja, com a falta ou a redução de chuva no país, os reservatórios podem atingir níveis críticos de armazenamento como em 2001, 2012 e 2016.

Como alguns aproveitamentos não possuem reservatórios de regularização, ou ainda, o volume armazenado nos períodos de estiagem, muitas vezes não é suficiente para suprir toda a demanda energética, principalmente em regiões de alta densidade populacional, a precipitação se torna ainda mais importante.

O SEB tem a característica de interligação que o diferencia dos demais. De acordo com (ANA, 2020), o SIN é um sistema hidrotérmico de grande porte para a produção e transmissão de energia elétrica, cuja operação envolve modelos complexos de simulação sob coordenação e controle do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que, por sua vez, é fiscalizado e regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

De acordo com o ONS (2022), o SIN é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte (**Figura 3**). A interconexão dos sistemas elétricos, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade dos regimes hidrológicos das bacias.

Figura 3 Divisão em subsistemas do SIN (ONS, 2025).



As termelétricas são posicionadas estrategicamente perto dos grandes centros de carga e contribuem para a segurança do SIN. São despachadas em função das condições hidrológicas, permitindo a gestão dos estoques de água armazenada nos reservatórios para assegurar o atendimento futuro.

Os sistemas de transmissão integram as diferentes fontes de produção de energia e possibilitam o suprimento do mercado consumidor. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018) o país é constituído de uma complexa malha de transmissão que deve chegar a 200.000 km até o ano de 2027.

Com todas essas características e a estrutura do SEB, o país se tornou suscetível ao clima, principalmente no que se refere à precipitação. O Brasil e o mundo têm sofrido com mudanças no ciclo hidrológico, que podem estar associadas a mudanças no clima, onde secas prolongadas atingiram regiões de alta demanda energética.

Associado a isso, Bergamini (2022) afirma que a capacidade de geração de energia elétrica no Brasil não cresce no mesmo ritmo da demanda energética, agravando a vulnerabilidade do sistema. Segundo Marangon, Marengo e Alves (2023) o Brasil não possui ainda uma política concreta para enfrentar os desafios e impactos advindos de mudanças climáticas.

As projeções das mudanças climáticas verificadas nos relatórios do IPCC apontam para o futuro ainda mais preocupante para o Brasil, pois estas indicam reduções nos volumes de precipitação em algumas regiões do país, associadas ao aumento da temperatura da superfície terrestre, sendo potencializados os extremos climáticos, como

secas prolongadas e temperaturas elevadas por longos períodos, fragilizando ainda mais o SEB e aumentando a demanda pelos recursos hídricos.

3.2. Principais Definições dos Modelos Hidrológicos e Aplicações do MGB

Diante de toda a importância da variável vazão ao sistema elétrico brasileiro, surge a necessidade de se encontrar uma maneira de simular o futuro e determinar as afluições para cada um dos aproveitamentos de geração hidrelétrica, sob a influência das variações do clima e das projeções das demandas hídricas.

Com isso, muitas ferramentas têm sido utilizadas e, na área de hidrologia, foram desenvolvidos os modelos hidrológicos, que simulam as componentes do ciclo hidrológico e suas interações com o ambiente, transformando a precipitação que cai sobre uma bacia hidrográfica em vazão, que será propagada nos rios (Almeida e Serra, 2017).

Segundo Moriasi *et al.* (2015) podem apresentar topologias diversas, de acordo com seu objetivo, podendo ser classificados como de simulação e otimização, empíricos, conceituais ou físicos, concentrados ou distribuídos, e, de acordo com a natureza de seus resultados, podem ser determinísticos ou estocásticos.

De acordo com Almeida e Serra (2017), atualmente os modelos têm sido amplamente utilizados para diversas aplicações como em análise de consistência e preenchimento de falhas de séries históricas, dimensionamento e projeção de cenários de planejamento do uso de recursos hídricos, análise dos efeitos da modificação do uso e ocupação dos solos e a previsão de vazão que podem ser utilizadas para análise de cheias, operação de obras hidráulicas e para o planejamento e operação de usinas hidrelétricas.

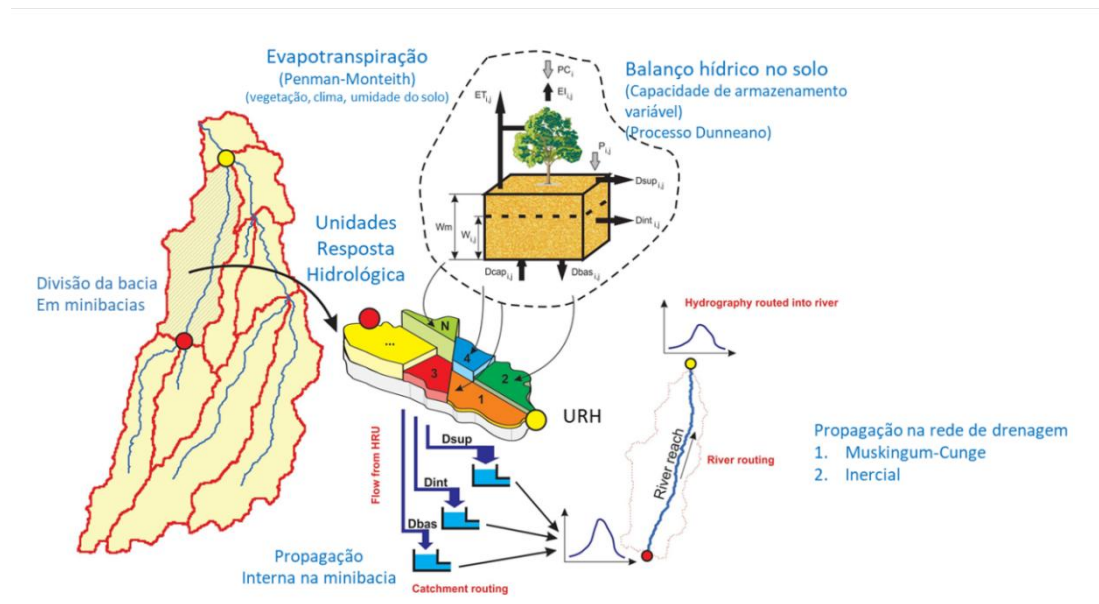
O MGB foi desenvolvido por Collischonn (2001), com base na estrutura do modelo LARSIM e adaptações do modelo VIC-2L, no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) ao longo dos últimos anos.

É classificado como conceitual, que é baseado em equações que descrevem os processos físicos teórico ou hipotéticos, determinístico pois produz respostas idênticas para o mesmo conjunto de entradas, mesmo quando uma variável de entrada tem caráter aleatório e distribuído reconhecendo desta forma, a distribuição espacial das variáveis e dos parâmetros considerados.

Os principais dados de entrada do modelo são a precipitação diária, os valores médios mensais da temperatura do ar, da umidade relativa, da velocidade do vento, da insolação e da pressão atmosférica. Além entradas relativas aos tipos de solos e ao uso e

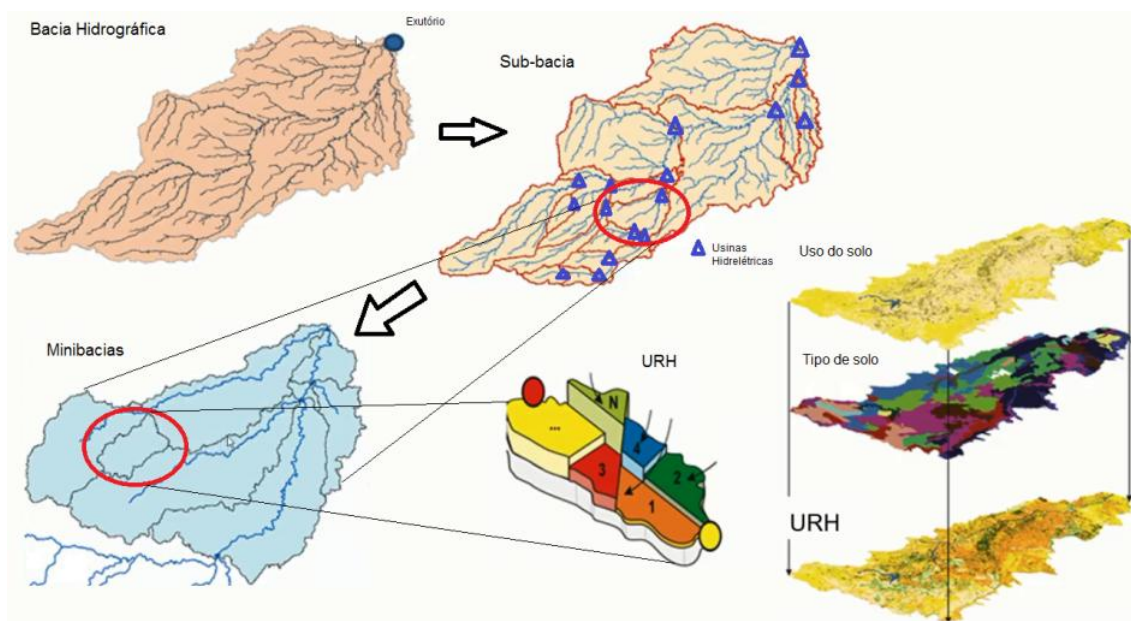
ocupação dos solos, que são inseridas no modelo a partir de mapas que combinam tais informações. Vazões diárias observadas que são utilizadas no processo de calibração e validação do modelo (Collischonn *et al.*, 2020). A Figura 4 apresenta a estrutura do modelo MGB.

Figura 4 Estrutura do modelo MGB (Collischonn *et al.*, 2020).



O MGB discretiza a bacia hidrográfica em três diferentes níveis de bacias de drenagem, o de sub-bacias, que são divididas em função de pontos com vazão, usinas hidrelétricas ou estações fluviométricas. Em minibacias, que são divididas em função da segmentação da rede de drenagem a partir das confluências ou do comprimento mínimos. Existe outra subdivisão que são as Unidades de Resposta Hidrológica (URH), definidas a partir da composição de mapas de uso e tipo de solos, são áreas menores no interior das minibacias com características hidrológicas semelhantes. A Figura 5 apresenta os níveis de discretização realizadas pelo modelo.

Figura 5 Níveis de discretização da bacia hidrográfica (Adaptado de Collischonn *et al.*, 2020).



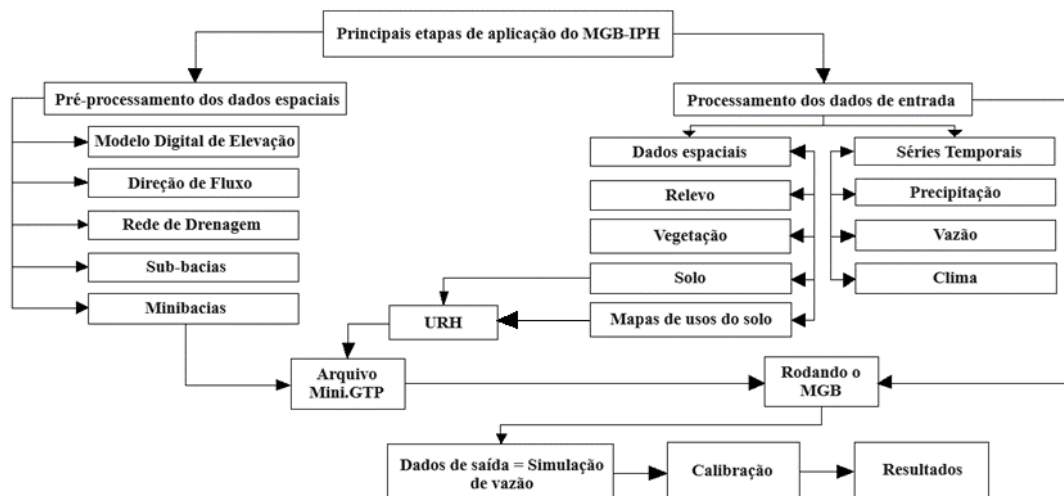
Os cálculos de balanço de energia para a estimativa da evapotranspiração (calculada por Penman-Monteith) e de balanço hídrico no solo são realizados nas URH em cada minibacia, evidenciando a importância do pré-processamento do MGB.

A propagação de vazão no interior de cada minibacia é realizada de forma simplificada, utilizando reservatórios lineares simples que representam separadamente o escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo conforme apresentado na Figura 5.

Os processos hidrológicos reconhecidos e representados pelo modelo são a precipitação, a interceptação, o armazenamento de água no solo, o escoamento difuso, o escoamento em rios com a representação dos processos de translação/atraso, a atenuação de cheias que depende da declividade e da largura dos rios e a evapotranspiração (Silva, 2007).

O ajuste do modelo requer procedimentos prévios sendo os principais a coleta de dados de entrada (fisiográficos e hidrometeorológicos), discretização da bacia, definição das URH e a preparação dos dados hidrometeorológicos (chuva, vazão e clima). O fluxograma desenvolvido por Collischonn (2001) apresentado na Figura 6, sintetiza as etapas de utilização do modelo.

Figura 6 Fluxograma de aplicação do MGB em relação aos dados de entrada e as etapas de geoprocessamento no Qgis (Adaptado de Collischonn, 2001).



As funções de calibração utilizadas pelo MGB no processo de otimização dos parâmetros são o Nash-Sutcliffe (NS), o Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões (NSLog) e a diferença entre os volumes (ΔV) calculados pelas Equações 1, 2 e 3, respectivamente. Na Tabela 1 são feitas descrições das estatísticas e das relações destas com o ajuste realizado nas vazões simuladas.

Tabela 1 - Estatísticas de eficiência utilizadas no modelo MGB

Função objetivo	Descrição
NS	Coefficiente adimensional, cujo valor máximo é igual a 1, considerado o ajuste perfeito. É muito influenciado pelas vazões máximas (cheias). Em geral, valores acima de 0,7 são considerados satisfatórios. Valores inferiores a 0,6 podem indicar falhas ou pouca cobertura espacial dos dados de precipitação.
NSLog	Coefficiente adimensional que também apresenta ajuste perfeito quando o valor é igual a 1 (valor máximo). É mais sensível às estiagens (vazões mínimas).
ΔV	Coefficiente adimensional, apresentado em termos percentuais. Valores ideais devem permanecer dentro da faixa de -10% e 10%. Não possui valor máximo nem mínimo, e não é influenciado de maneira diferenciada pelos períodos de cheia ou estiagem. É uma forma de avaliar se existe um desvio sistemático de superestimativa ou subestimativa da vazão calculada.

Fonte: Silva (2007).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^n (QC_i - QO_m)^2} \quad \text{Equação (1)}$$

$$NSLog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(QC_i) - \log(QO_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(QC_i) - \log(QO_m))^2} \quad \text{Equação (2)}$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{Ci} - \sum_{i=1}^n Q_{Oi}}{\sum_{i=1}^n Q_{Oi}} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

Q_{Ci} = Vazão calculada num intervalo de tempo i

Q_{Oi} = Vazão observada neste mesmo intervalo de tempo

N = Número de intervalos de tempo

Q_{Om} = Média das vazões observadas no período de n intervalos de tempo

A calibração pode ser realizada em duas etapas, a primeira consiste em ajuste manual dos parâmetros, e na segunda etapa, os valores são otimizados através de um processo automático pela técnica de algoritmos genéticos disponível como uma ferramenta do MGB (Collischonn, 2007).

Na Tabela 2, resumem-se as medidas de desempenho para calibração, com as faixas das estatísticas e a classificação de acordo com os valores de NS, NSLog e ΔV , realizada por Moriasi *et al.* (2015).

Tabela 2 - Valores de referência dos coeficientes estatísticos NS, NSLog e ΔV

NS e NSLog	ΔV	Classificação
NS e NSLog $\leq 0,4$	$\Delta V \geq \pm 25\%$	Insatisfatório
$0,4 < \text{NS e NSLog} \leq 0,6$	$\pm 15\% \leq \Delta V < \pm 25\%$	Satisfatório
$0,6 < \text{NS e NSLog} \leq 0,75$	$\pm 10\% \leq \Delta V < \pm 15\%$	Bom
$0,75 < \text{NS e NSLog} \leq 1,00$	$\Delta V \leq \pm 10\%$	Muito Bom

Fonte: Moriasi *et al.* (2015).

O MGB tem sido amplamente utilizado para diferentes finalidades e objetivos e se mostrado muito útil no processo de tomada de decisão e de planejamento em bacias hidrográficas brasileiras. Dentre os trabalhos publicados, pode-se destacar, para a simulação hidrológica as referências citadas a seguir:

- Negreiros e Medeiros (2017) utilizaram o MGB avaliando o desempenho do modelo para simulações na bacia do Seridó, um rio intermitente, no período de 1990 a 2000. Os resultados mostraram que o MGB foi capaz de simular a sazonalidade da bacia e o realce entre anos mais secos ou mais úmidos.
- Fan e Collischonn (2014) que propuseram a integração do modelo MGB com um sistema de informações geográfica (SIG), criando ferramentas úteis para manipulação e representação dos dados de entrada no ambiente SIG, e para pós processamento e análise dos resultados do modelo hidrológico.

- Pontes *et al.* (2015) que implementaram um aprimoramento na propagação da vazão na rede de drenagem e o nível da água ao longo de rios e planícies de inundação, focando em simulações hidráulicas em grande escala. Os autores concluíram que o MGB representa melhor os efeitos da atenuação da onda de cheia com a nova proposta.
- Felix e Paz (2016), que avaliaram a aplicabilidade do MGB na bacia do rio Piancó. Os resultados indicaram que o modelo conseguiu reproduzir o comportamento geral do hidrograma observado diário e mensal com vazões simuladas muito próximas das vazões observadas, porém, evidenciaram que o MGB teve dificuldade em representar as vazões de cheia e a intermitência de rios.

Para o uso do modelo em cenários de mudanças do uso e ocupação dos solos destacam-se as seguintes referências:

- Bayer e Collischonn (2013) analisaram a sensibilidade do MGB para simular as mudanças no uso do solo e mostraram que o MGB reproduz de forma coerente o comportamento médio das bacias submetidas ao desmatamento, sendo diretamente influenciado pelos parâmetros de vegetação, na mesma ordem de grandeza que os resultados de estudos experimentais em muitas bacias pareadas.
- Silva (2014) verificou os efeitos da substituição de campos para atividades agropecuárias ocasionadas pelo desenvolvimento econômico da região, simulando cenários com o MGB e os resultados apontaram para aumentos substanciais nas vazões máximas, mínimas e médias, sendo as alterações perfeitamente representadas nas simulações com o MGB.
- Bezerra (2016) que analisou as mudanças no uso e ocupação dos solos utilizando o MGB e concluiu que as alterações foram identificadas pelos resíduos entre as vazões observadas e simuladas obtidas do período de referência, anterior à mudança no solo e o posterior, sendo verificada a redução das vazões devido à substituição da vegetação nativa por pastagem e agricultura.
- Brito Neto *et al.* (2021) avaliaram a redução de áreas florestais sendo substituídos por atividades agropecuárias. E concluíram que no geral o MGB foi capaz de captar as alterações de uso do solo, uma vez que, as vazões médias

que passaram a ser aumentadas, estão associadas ao favorecimento do escoamento superficial pela substituição por áreas com vegetações rasteiras.

- Siqueira *et al.* (2022) aplicaram cenários baseados em mudanças no Novo Código Florestal para Áreas de Preservação Permanente (APP) de topos de morros utilizando o MGB. Os resultados indicaram reduções no escoamento superficial nos cenários em que a área florestal preservada é maior, mas não conseguiram identificar diferenças consistentes no comportamento hidrológico da bacia do Sapucaí, considerando o cenário atual de ocupação e os três cenários hipotéticos simulados com base na cobertura das APP de topo de morro.

Utilização do MGB para a avaliação de mudanças climáticas onde se destacam as seguintes referências:

- Gama (2011) utilizando o MGB analisou os impactos das MC no que tange a precipitação e a temperatura projetadas pelo IPCC e seus efeitos nas vazões e o escoamento na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio. Os resultados com o MGB captaram as alterações no regime hidrológico apresentando reduções da disponibilidade hídrica e aumento das enchentes na bacia hidrográfica para o período em análise.
- Adam (2013) avaliou cenários de mudanças climáticas utilizando cerca de 20 modelos climáticos diferentes do projeto CMIP3/AR4 e três cenários de emissão em conjunto com o MGB na bacia do rio Ibicuí. As simulações demonstraram que as vazões médias e altas são sensíveis às alterações nos volumes de chuva. Em muitas simulações, os cenários apontaram para variações acentuadas nos extremos (intensificação de cheias ou secas prolongadas), dependendo do membro do modelo climático utilizado como base.
- Adam *et al.* (2015) avaliaram o impacto das mudanças climáticas utilizando as projeções de variáveis climáticas de quatro modelos climáticos regionais ETA-CPTEC para analisar os efeitos nas vazões anuais mínimas e máximas projetadas pelo MGB na bacia do rio Paraná, para quatro períodos (1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100). Concluindo que as vazões máximas projetadas estão dentro dos limites de incerteza em relação às séries atuais. No

geral os resultados sugerem que a variabilidade natural do clima pode ser tão importante quanto a influência de mudanças climáticas.

- Santana, Silva e Santos (2013) avaliaram os impactos de mudanças climáticas nas vazões nas bacias dos rios Doce e Jequitinhonha, a partir das projeções de modelos climáticos globais e regionais e da utilização do MGB, encontrando reduções nas vazões nas bacias, sendo estas mais acentuadas no final do século.

Além desses autores, pode-se destacar outros que utilizaram o MGB para diferentes finalidades e obtendo bons resultados utilizando o modelo. Com destaque para as seguintes referências:

- Paiva (2009), Fan e Collischonn (2014), Pontes *et al.* (2015), Silva e Medeiros (2018), Felix e da Paz (2016), Jati e Silva (2017), Pessoa (2017) que usaram para a simulação hidrológica; Guilhon, Rocha e Moreira (2007), SILVA *et al.* (2007), Meller, Bravo e Collischonn (2012), Jiménez (2017), Martins, Silva e Pons (2019) para a previsão de vazões; Bayer e Collischonn (2013), Silva (2014), Lopes *et al.* (2015), na avaliação de alterações nos usos do solo; Ribeiro Júnior (2013), Jati (2017) e Schuster, Fan e Collischonn (2020) que usaram o MGB para a análise de impactos de mudanças climáticas.

3.3. Mudanças Climáticas e as Relações com os Setores da Sociedade

As mudanças climáticas podem ser definidas como o fenômeno das alterações do clima ocorridas ao longo do tempo devido à variabilidade de processos na atmosfera ou decorrentes da atividade humana (Barbosa, 2024).

De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2023), as projeções de mudanças climáticas são geradas por meio de modelos numéricos de alta complexidade, cujo objetivo é representar os principais processos do sistema terrestre. São utilizadas informações observadas nos últimos séculos e em cenários futuros de desenvolvimento socioeconômico global.

Para serem utilizadas de maneira regional, as projeções climáticas feitas por modelos climáticos globais (GCM) podem passar pelo processo de *downscaling* dinâmico ou estatístico.

O *downscaling* dinâmico utiliza Modelos Climáticos Regionais (RCM) que incorporam características regionais, como topografia, vegetação, solo e diferenças continente-oceano, não contidas nos modelos globais. Dessa forma, GCM responde mais

à influência da circulação de grande escala, enquanto o RCM é capaz de responder às forçantes dos efeitos locais (Lima e Alves, 2009).

O *downscaling* estatístico consiste em uma técnica baseada no uso de metodologias matemáticas e estatísticas para estabelecer e determinar as relações entre os padrões climáticos de grande escala, resolvidos por Modelos Climáticos Globais (MCGs), e as respostas climáticas locais ou regionais observadas. Essa relação empírica é então aplicada para refinar os dados brutos, adaptando-os a uma escala subgrade ou de estação meteorológica (Costa *et al.*, 2020).

Magrini e Veiga (2013) afirmam que há evidência científica de que as mudanças climáticas podem afetar os recursos hídricos e as atividades associadas a eles, como o abastecimento público (eventos de cheia ou seca), os setores produtivos (agricultura, pecuária e indústria), a geração de energia elétrica, entre outros.

Santana, Silva e Santos (2013) avaliaram os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos na bacia do Rio São Francisco, analisando os efeitos das precipitações futuras simuladas pelo modelo regional ETA nas vazões do Rio São Francisco. O modelo ETA previu reduções nas precipitações mesmo no cenário mais otimista da ordem de 10 a 15%, o que acarretaria reduções nas vazões médias na ordem de 12 a 17%. Para o cenário pessimista, as reduções na precipitação foram da ordem de 20 a 25%, com diminuição de 35% nas vazões no final do século.

Sobral *et al.* (2018) analisaram o impacto das mudanças climáticas na região Nordeste do Brasil, onde concluíram o aumento da ocorrência de anos secos, tanto na quantidade quanto na intensidade desses eventos. Apontou ainda que as mudanças climáticas associadas a alterações no uso e na ocupação dos solos são de extrema importância na disponibilidade hídrica da bacia do Rio São Francisco.

Muitos autores têm avaliado os possíveis impactos das alterações do clima na disponibilidade hídrica e na geração de energia elétrica. Dentre eles destacam-se:

→ Rodrigues (2012) avaliou o efeito da elevação da temperatura dos diferentes cenários do AR5, na demanda de eletricidade do país e concluiu que as demandas residenciais e industriais do Brasil poderão aumentar como resposta adaptativa ao aumento projetado na temperatura, devido ao aumento das necessidades de climatização e refrigeração.

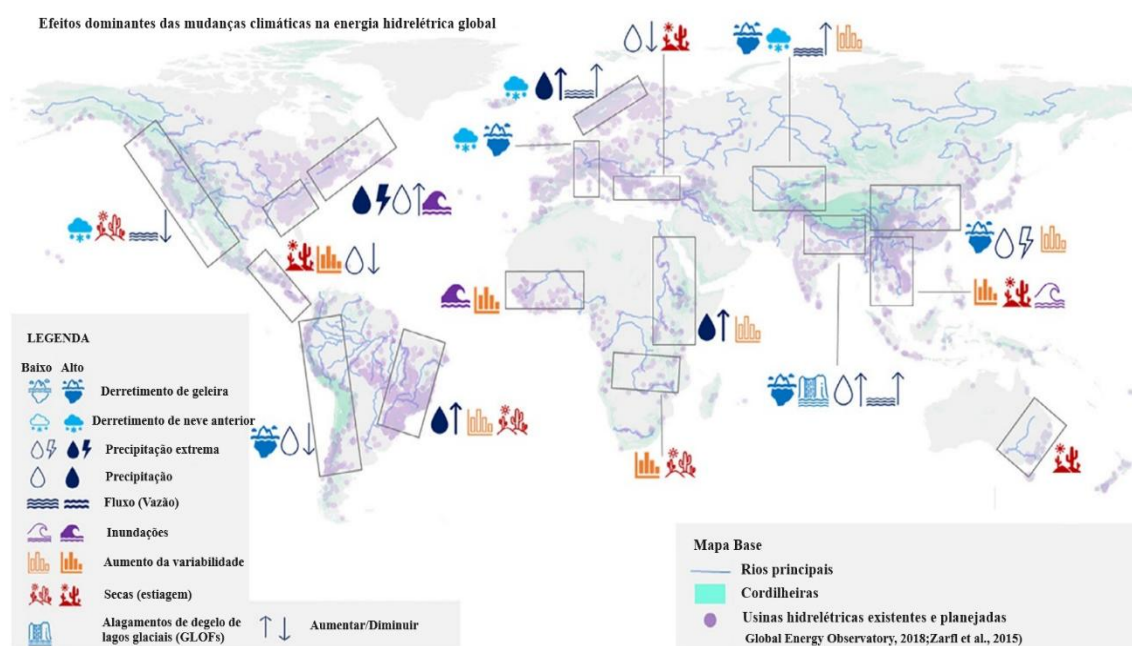
→ Silveira *et al.* (2013) analisaram as projeções de vazões das principais bacias do setor elétrico com base em dados do AR5, para o cenário RCP8.5 e utilizando o modelo hidrológico *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) e concluíram que os modelos

do CMIP5 concordam em termos dos impactos devido a reduções na vazão sobre o setor elétrico nas regiões Norte e Nordeste e apresentam divergências para as regiões Sul e Sudeste/Centro-Oeste.

→ Scianni (2014) avaliou o efeito das mudanças climáticas na geração de energia elétrica proveniente de fontes hidráulicas, usando a energia assegurada como métrica de avaliação e deixou uma indicação da importância da incorporação de variáveis climáticas nos estudos de planejamento da expansão e operação do SEB. A autora ainda conclui que as perdas na energia assegurada no período futuro podem chegar a 25% a partir de 2040.

→ Wasti *et al.* (2021) classificam os principais impactos das mudanças climáticas no setor hidroelétrico para diversas regiões, como pode ser visto na Figura 7. Para a América Central e do Sul são projetados o aumento da temperatura e a redução da precipitação, o que afetaria negativamente a geração hidrelétrica na região.

Figura 7 Efeito das mudanças climáticas na geração hidrelétrica global (Wasti *et al.*, 2021).



O IPCC desenvolve trabalhos que abrangem o estado do conhecimento científico, técnico e socioeconômico das alterações climáticas, os seus impactos e riscos futuros.

Um apontamento importante do IPCC (2021), diz respeito aos impactos das mudanças climáticas no ciclo hidrológico, com destaque para a mudança no escoamento e nas vazões dos recursos hídricos, nos padrões de precipitação em escalas global e regional e aumento da frequência e da intensidade de eventos de precipitação intensa.

No AR6 foram apresentados cinco novos cenários, sendo que esses cenários foram projetados para o período de 2015 a 2100 e utilizaram modelos climáticos mais sofisticados para preencher lacunas das últimas publicações (Barbosa, 2024).

Os cenários de emissões são enredos desenvolvidos para representar as possíveis emissões de GEE e as mudanças climáticas decorrentes da ocorrência de cada um desses cenários. São descrições plausíveis de futuros desafiadores, que podem ser apresentados como modelos numéricos ou mentais e são gerados por cientistas especializados em modelagem climática (IPCC, 2021).

Dos cinco cenários do AR6, dois apresentam prognósticos mais otimistas (SSP1-1.9 e SSP1-2.6), um apresenta um prognóstico intermediário (SSP2-4.5) e dois apresentam prognósticos mais pessimistas (SSP3-7.0 e SSP5-8.5). A seguir, são abordadas as principais características dos cenários utilizados, o intermediário e o mais pessimista (Barbosa, 2024):

→ SSP2-4.5 – Cenário de média emissão de CO₂ com média nos níveis atuais e decréscimo a partir do meio do século. Em relação aos fatores socioeconômicos, a tendência histórica é mantida e não surgem mudanças com pouco engajamento em relação à sustentabilidade e à igualdade social. Nesse cenário, o aquecimento global atinge 2,7° acima dos limites pré-revolução industriais.

→ SSP5-8.5 – No pior cenário, os níveis de emissão de CO₂ dobram até 2050 e, no final do século, o aquecimento global chega a 4,4° acima da temperatura pré-revolução industrial. A economia mundial cresce rapidamente utilizando combustíveis fósseis e grandes aportes de energia.

O NEX-GDDP-CMIP6 foi criado para ajudar a comunidade científica na condução de estudos sobre os impactos das mudanças climáticas em escalas locais e regionais e para melhorar a compreensão pública de possíveis futuros padrões climáticos na escala espacial de cidades e bacias hidrográficas.

Inclui cenários climáticos globais reduzidos derivados das execuções do GCM realizadas no âmbito do CMIP6 e, por meio dos quatro cenários de emissões de gases com efeito de estufa (SSP). A Tabela 3 apresenta os modelos climáticos globais encontrados no CMIP6 que foram trabalhados no projeto NEX-GDDP e a disponibilidade das variáveis climáticas. O sinal de check significa que o modelo possui a variável para todo o período, o asterisco significa que o modelo possui a variável mas não para todo o período e o traço significa que o modelo não possui a variável.

Tabela 3 - Modelos do NEX-GDDP e as variáveis climáticas disponibilizadas

Modelo	hurs	huss	pr	rlds	rsds	sfcWind	tas	tasmx	tasmin
ACCESS-CM2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ACCESS-ESM1-5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
BCC-CSM2-MR	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CanESM5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CESM2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
CESM2-WACCM	*	*	*	*	*	*	*	-	-
CMCC-CM2-SR5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	*	-	-
CMCC-ESM2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CNRM-CM6-1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CNRM-ESM2-1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EC-Earth3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EC-Earth3-Veg-LR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
FGOALS-g3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
GFDL-CM4 (gr1)	*	*	*	*	*	*	*	*	*
GFDL-CM4 (gr2)	*	*	*	*	*	*	*	*	*
GFDL-ESM4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
GISS-E2-1-G	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
HadGEM3-GC31-LL	*	*	*	*	*	*	*	*	*
HadGEM3-GC31-MM	*	*	*	*	*	*	*	*	*
IITM-ESM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
INM-CM4-8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
INM-CM5-0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
IPSL-CM6A-LR	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
KACE-1-0-G	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
KIOST-ESM	*	*	*	*	*	*	*	*	*
MIROC-ES2L	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MIROC6	✓	*	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MPI-ESM1-2-HR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MPI-ESM1-2-LR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MRI-ESM2-0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
NESM3	-	-	*	*	*	*	*	*	*
NorESM2-LM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
NorESM2-MM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TaiESM1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UKESM1-0-LL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Thrasher *et al.* (2022).

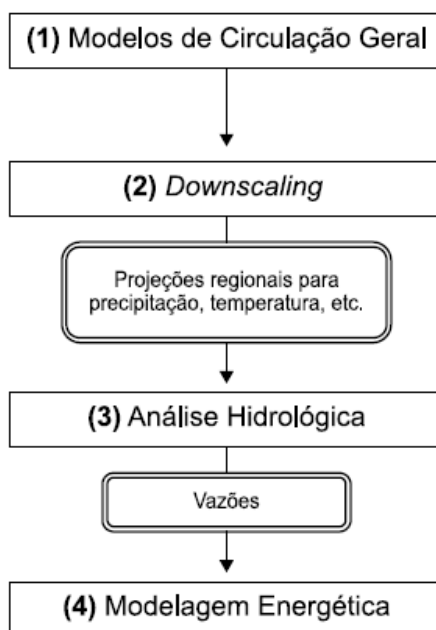
Atualmente, diante de todas as evidências de que o clima e as alterações são decorrentes de ações antrópicas, muitos autores têm se dedicado a avaliar os impactos em diferentes áreas de estudo.

O setor energético não fica de fora, ainda mais no Brasil, que possui características que torna o País vulnerável às alterações no regime hidrológico, conforme tem sido discutido.

A maioria dos estudos de análise das mudanças climáticas e dos efeitos na geração hidrelétrica seguem a metodologia apresentada no esquema proposto por Lucena (2010).

Os estudos utilizam dados de projeções climáticas globais e seu downscaling para projeções regionais, que alimentarão os modelos hidrológicos, gerando informações sobre os impactos nas afluências dos aproveitamentos hidrelétricos. Finalmente, é feito o cálculo energético e, assim, pode ser realizada a análise dos impactos do clima e suas alterações na geração de energia hidrelétrica (Figura 8).

Figura 8 Esquema geral dos estudos de impactos de mudanças climáticas na geração hidrelétrica (Lucena, 2010).



3.4. Usos Consuntivos da Água no Brasil

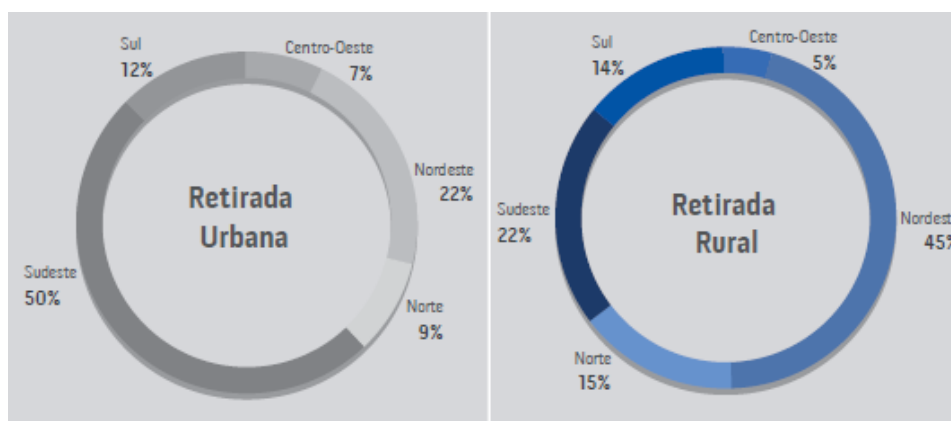
Embora o Brasil possa ser considerado um país privilegiado quanto à disponibilidade hídrica, a ideia de que a água é um recurso finito e dotado de valor econômico tem se tornado mais evidente nos últimos anos, principalmente pela escassez enfrentada no país em algumas regiões.

Além disso, a distribuição é desigual no território brasileiro, com as maiores parcelas encontradas na região norte do país, e, nas regiões sudeste e sul onde fica concentrada a maior parte da população, a oferta do recurso hídrico muitas vezes se torna insuficiente o que é ainda mais preocupante nos períodos de estiagem.

A Figura 9 exemplifica as diferenças nas retiradas do uso do abastecimento humano urbano e rural, por região do país, evidenciando que as demandas são variáveis e associadas à densidade populacional.

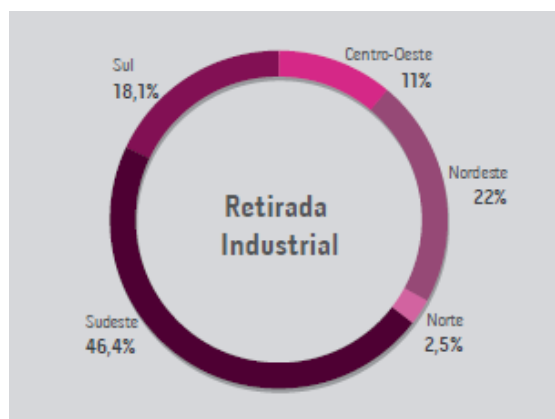
Para a retirada urbana, os grandes centros da região Sudeste retiram metade do total, embora não seja a região que apresente a maior disponibilidade hídrica. Já a região norte, que apresenta maior disponibilidade, a retirada urbana é de apenas 9% do total.

Figura 9 Retiradas de água por região do Brasil para o ano de 2017 para o abastecimento humano (ANA, 2019).



Assim como acontece para o abastecimento urbano, movimento semelhante acontece para as retiradas das indústrias. Os grandes centros urbanos se apresentam com maior desenvolvimento industrial e, com isso, as retiradas anuais são maiores nas regiões sudeste, sul e nordeste, conforme se pode ver na Figura 10.

Figura 10 Retiradas de água do setor industrial por região do Brasil para o ano de 2017 (ANA, 2019).



A irrigação é o setor de maior demanda hídrica no Brasil e no mundo. Nas décadas de 70 e 80 houve intensificação da agricultura e, com isso, aumento da irrigação devido a fatores como a expansão para áreas de clima desfavorável, como a região sudeste, que possui pluviosidade baixa, sendo necessário compensar com a irrigação artificial.

A Figura 11 apresenta as retiradas por região do Brasil, com destaque para a região sul (36%) e região sudeste (25%) onde estão concentradas as maiores demandas de água.

Figura 11 Retiradas de água do setor irrigação por região do Brasil para o ano de 2017 (ANA, 2019).



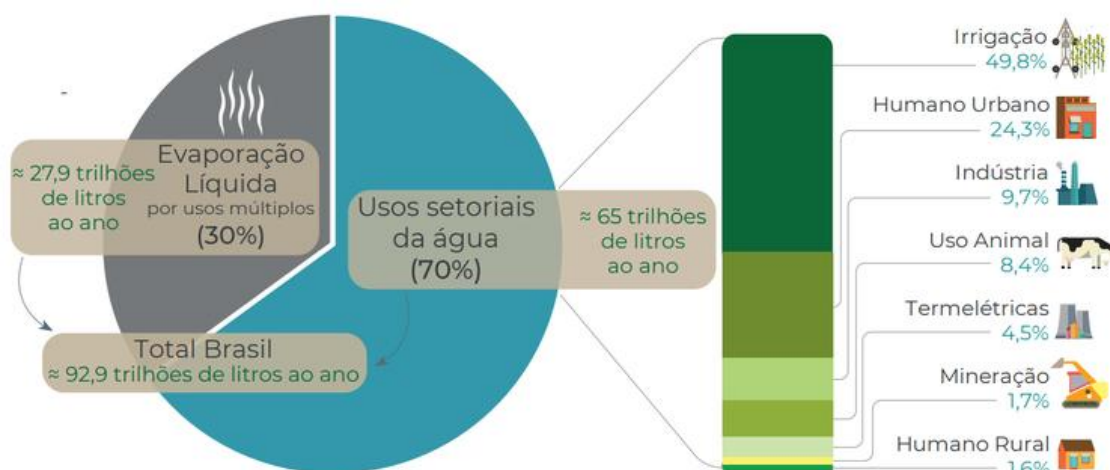
Segundo as diretrizes da ANA (2019), em situações de escassez, a prioridade deve ser o abastecimento humano e a dessedentação de animais, fora desses períodos críticos, o recurso deve ser gerenciado de maneira a proporcionar os usos múltiplos, ou seja, um mesmo manancial pode atender a mais de uma finalidade, mas sempre com a segurança hídrica em pauta.

De acordo com ANA (2019) qualquer atividade que altere as condições da água é considerada uso da água. Os usos consuntivos são aqueles usos da água que retiram a água do corpo hídrico e há consumo direto ou indireto, como por exemplo, a irrigação, a utilização da água nos processos produtivos de indústrias, o abastecimento humano (urbano e rural), o abastecimento animal, a mineração, a termoeletricidade, entre outros.

No Brasil são retirados aproximadamente 93 trilhões de litros de água por ano de fontes superficiais e subterrâneas para o atendimento dos usos consuntivos múltiplos. A Figura 12 mostra que a irrigação ainda é o setor que mais consome água (50%), seguido pelo consumo humano urbano (24%), as indústrias (10%) e dessedentação animal ((8%), termelétricas (4,5%), mineração (1,7%) e o abastecimento humano rural (1,6%).

A figura indica também que a evaporação líquida deve ser levada em consideração, pois representa cerca de 30% de toda a retirada, e, isso está intimamente relacionado a geração hidrelétrica no país, onde muitas das usinas hidrelétricas possuem grandes reservatórios, que propiciam maior exposição de água para a evaporação.

Figura 12 Retiradas de água no Brasil no ano de 2019 (ANA, 2019).

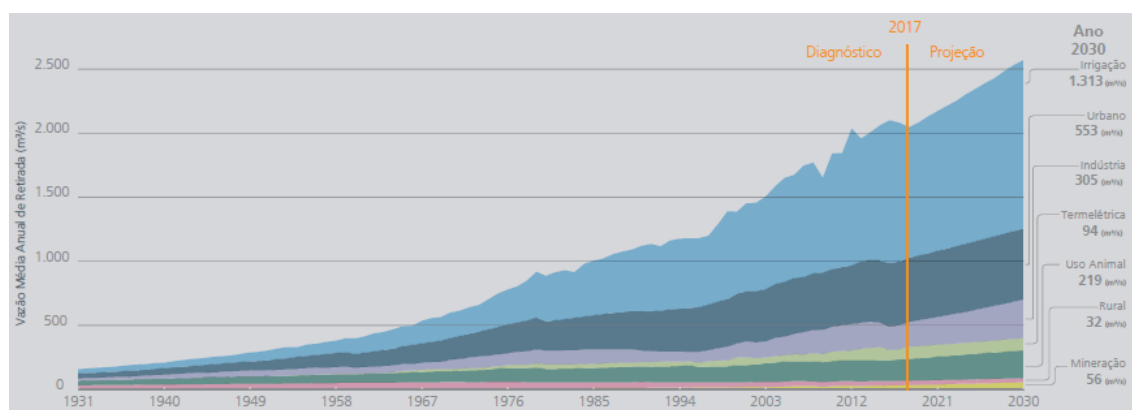


No manual de usos consuntivos da água do Brasil (ANA, 2019) é apresentada a evolução da retirada da água pelos setores, do ano de 1931 a 2017, chamado de diagnóstico. Além disso, há a projeção dos consumos até 2040, que mostra o crescimento das retiradas de água ao longo do período analisado, com tendência de maior crescimento no final do período projetado (Figura 13).

Os resultados disponibilizados são separados em classes ou setores de usos consuntivos, em que as siglas são aqui definidas como: abastecimento humano urbano (HU), abastecimento humano rural (HR), dessedentação animal (ANI), irrigação (IRR), indústria (IND), mineração (MIN) e termelétricas (TME).

Em 2030, a média anual de retirada da irrigação esperada passará de 1083 m³/s a 1313 m³/s, o abastecimento urbano de 496 m³/s a 553 m³/s, a indústria de 189 m³/s a 305 m³/s, a geração termelétrica de 79 m³/s a 94 m³/s, e assim por diante, o que confirma o aumento crescente na retirada de água em todos os setores.

Figura 13 Evolução da retirada de água no Brasil (ANA, 2019).



3.4.1. Evapotranspiração, agricultura irrigada e mudanças climáticas

A evapotranspiração (ET), consiste na combinação dos processos de evaporação da água do solo e de outras superfícies e da transpiração das plantas, representando o movimento do vapor d'água da superfície terrestre para a atmosfera (Ghiat, Mackey e Al-Ansari, 2021).

É um fator importante a ser considerado nas projeções de consumo, conforme mencionado anteriormente. Esse processo envolve a evaporação da água de superfícies de espelhos d'água (como rios, lagos, represas, oceanos, entre outros), dos solos e da vegetação úmida, no processo de interceptação durante uma chuva e a transpiração dos vegetais.

A ET é fundamental também para a engenharia, pois influencia diversos estudos hidrológicos e a orientação do planejamento e manejo de culturas. A evaporação tem sua importância fundamentada na perda de água nos reservatórios e canais, enquanto a evapotranspiração, influencia a quantidade de chuva que é transformada em vazão nas bacias hidrográficas (Collinschonn e Dornelles, 2013).

Na escala de bacias hidrográficas, a evapotranspiração desempenha papel fundamental no balanço hídrico, juntamente com a precipitação. O balanço entre a precipitação (entrada) e a evapotranspiração (saída) irá resultar na vazão do sistema de drenagem.

O Método Thornthwaite, foi idealizado a partir de um conjunto de equações elaboradas por meio de balanços hídricos em bacias hidrográficas e em medidas realizadas em lisímetros (Braga *et al.*, 2023).

Um estudo realizado na porção norte do país pelos autores Alves *et al.* (2020) buscou estimar a evapotranspiração de referência para o município de Santana do Araguaia (PA), comparando-a com o método Penmann. Os resultados apontaram que ambos os métodos apresentaram comportamento semelhante quanto à distribuição da ET ao longo do ano, porém o método de Thornthwaite apresentou leve tendência de superestimativa dos dados.

Bons resultados da aplicação do método são apontados por Syperreck *et al.* (2008), em estudo desenvolvido na região do estado do Paraná, Camargo e Sentelhas (1997) no estado de São Paulo e Back (2008) em estudo realizado no estado de Santa Catarina.

A equação proposta por Thornthwaite é dada por uma relação exponencial estimada pelas Equações 4 e 5 (Pereira e Pruitt, 2004):

$$ET_p = 16. \left(10. \frac{T}{I}\right)^a \text{ para } 0^\circ\text{C} < T \leq 26^\circ\text{C} \quad \text{Equação (4)}$$

$$ET_p = -415,85 + 32,24T - 0,43T^2, \text{ para } T > 26^\circ\text{C} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

ET_p = Evapotranspiração potencial [mm/mês]

T = Temperatura média mensal [$^\circ\text{C}$]

I = Índice anual de calor

O expoente “a” é calculado em função do índice anual de calor, expresso pelas Equações 6 e 7, respectivamente:

$$I = \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1,514}, T \geq 0^\circ\text{C} \quad \text{Equação (6)}$$

$$a = 6,75.10^{-7}.I^3 - 7,71.10^{-5}.I^2 + 0,01791.I + 0,492 \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

i = mês do ano (1, ..., 12)

O aumento da temperatura do ar, intensificado pelas mudanças climáticas globais, exerce forte influência sobre o ciclo hidrológico, afetando tanto a disponibilidade quanto a demanda por recursos hídricos. A evapotranspiração é altamente dependente de fatores climáticos, especialmente da temperatura, da radiação solar, da umidade relativa do ar e da velocidade do vento (Allen *et al.*, 1998).

O aumento da evapotranspiração está diretamente associado ao crescimento da demanda hídrica em diferentes setores da economia e da sociedade (Shiklomanov, 2000; IPCC, 2021).

No setor agrícola, os impactos do aumento da temperatura e da evapotranspiração são particularmente significativos. A agricultura irrigada depende fortemente do equilíbrio entre a disponibilidade de água no solo e as necessidades hídricas das culturas.

Com temperaturas mais elevadas, as plantas transpiram mais para regular sua temperatura, o que aumenta a necessidade de irrigação para manter níveis adequados de produtividade (Allen *et al.*, 1998).

Estudos indicam que, mesmo em regiões onde a precipitação permanece constante, o aumento da evapotranspiração pode resultar em maior demanda de água para irrigação, ampliando a pressão sobre rios, reservatórios e aquíferos (FAO, 2017).

Além disso, em cenários de aquecimento global, eventos extremos, como ondas de calor e períodos prolongados de seca, tendem a se tornar mais frequentes. Essas condições climáticas intensificam ainda mais a evapotranspiração e reduzem a eficiência do uso da água na agricultura, exigindo investimentos em tecnologias mais eficientes, como irrigação localizada e manejo adequado do solo (IPCC, 2021).

No contexto urbano, o aumento da temperatura também contribui significativamente para o crescimento da demanda por água. Em períodos mais quentes, há maior consumo de água para usos domésticos, como banhos mais frequentes, lavagem de roupas, limpeza de superfícies e irrigação de jardins e áreas verdes.

A evaporação em reservatórios urbanos, lagos artificiais e sistemas de abastecimento também se intensifica, reduzindo a disponibilidade de água para consumo humano (Gato *et al.*, 2007; Kenney *et al.*, 2008).

Outro fator relevante é o fenômeno das ilhas de calor urbanas, caracterizado por temperaturas mais elevadas nas cidades do que nas áreas rurais. Esse fenômeno aumenta a evapotranspiração local e estimula o consumo de água, especialmente em regiões metropolitanas densamente urbanizadas.

Como resultado, os sistemas de abastecimento urbano enfrentam picos de demanda durante períodos de calor intenso, o que pode comprometer a segurança hídrica se não houver planejamento adequado (Kenney *et al.*, 2008).

O setor industrial também é impactado pelo aumento da temperatura e da evapotranspiração, embora de forma diferenciada. Muitas indústrias utilizam grandes volumes de água para o resfriamento de processos, a geração de energia e a limpeza de equipamentos.

Em condições de temperaturas mais elevadas, a eficiência térmica desses sistemas diminui, exigindo maior consumo de água para manter o funcionamento adequado das instalações (Vörösmarty *et al.*, 2000).

Do ponto de vista ambiental, o aumento da evapotranspiração afeta diretamente o balanço hídrico das bacias hidrográficas. A maior perda de água para a atmosfera pode reduzir a recarga de aquíferos, diminuir a vazão dos rios e comprometer a manutenção dos ecossistemas aquáticos.

Esses impactos ambientais, por sua vez, influenciam a disponibilidade de água para os demais setores, intensificando os conflitos pelo uso dos recursos hídricos (Shiklomanov, 2000; IPCC, 2021).

Diante desse cenário, torna-se essencial adotar uma abordagem integrada de gestão dos recursos hídricos, que considere os efeitos do aumento da temperatura e da evapotranspiração sobre a demanda de água.

Medidas como o uso eficiente da água, a modernização de sistemas de irrigação, o reúso de água, a conservação de áreas verdes e o planejamento urbano adaptado ao clima são estratégias fundamentais para reduzir a vulnerabilidade hídrica (FAO, 2017).

Em resumo, o aumento da temperatura intensifica a evapotranspiração, reduz a disponibilidade hídrica e eleva a demanda de água nos setores agrícolas, urbanos, industriais e ambientais.

A compreensão dessa relação é essencial para o planejamento sustentável e para a formulação de políticas públicas voltadas à segurança hídrica, especialmente em um contexto de mudanças climáticas e crescimento populacional.

3.5. Definições e Cálculo da Energia Natural Afluente

A ENA representa a energia produzível pela usina e é calculada como o produto das vazões naturais aos reservatórios, multiplicadas pelas produtividades a 65% dos volumes úteis (ONS, 2021).

De acordo com ONS (2021) os dados podem servir de insumo para estudos energéticos e projeção do custo marginal de operação. O cálculo pode ser feito no nível das regiões brasileiras, por submercado, por bacia hidrográfica ou ainda no nível das usinas hidrelétricas, conforme Equações 8 e 9, respectivamente (ONS, 2016).

$$ENA_{BACIA}(t) = \sum_{i=1}^n (Qnat_{(i,t)} \cdot p_{(i)}) \quad \text{Equação (8)}$$

$$ENA_{SUBSISTEMA}(t) = \sum_{j=1}^n (Qnat_{(j,t)} \cdot p_{(j)}) \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

t = Intervalo de tempo de cálculo da ENA;

i = Aproveitamento pertencente ao sistema de aproveitamentos da bacia considerada;

n = Número de aproveitamentos existentes no sistema de aproveitamentos da bacia considerada;

Qnat = Vazão natural do aproveitamento no intervalo de tempo considerado;

p = Produtibilidade média do conjunto turbina-gerador do aproveitamento hidrelétrico, referente à queda obtida pela diferença entre o nível de montante, correspondente a um armazenamento de 65% do volume útil, e o nível médio do canal de fuga;

j = Aproveitamento pertencente ao sistema de aproveitamentos do subsistema considerado;

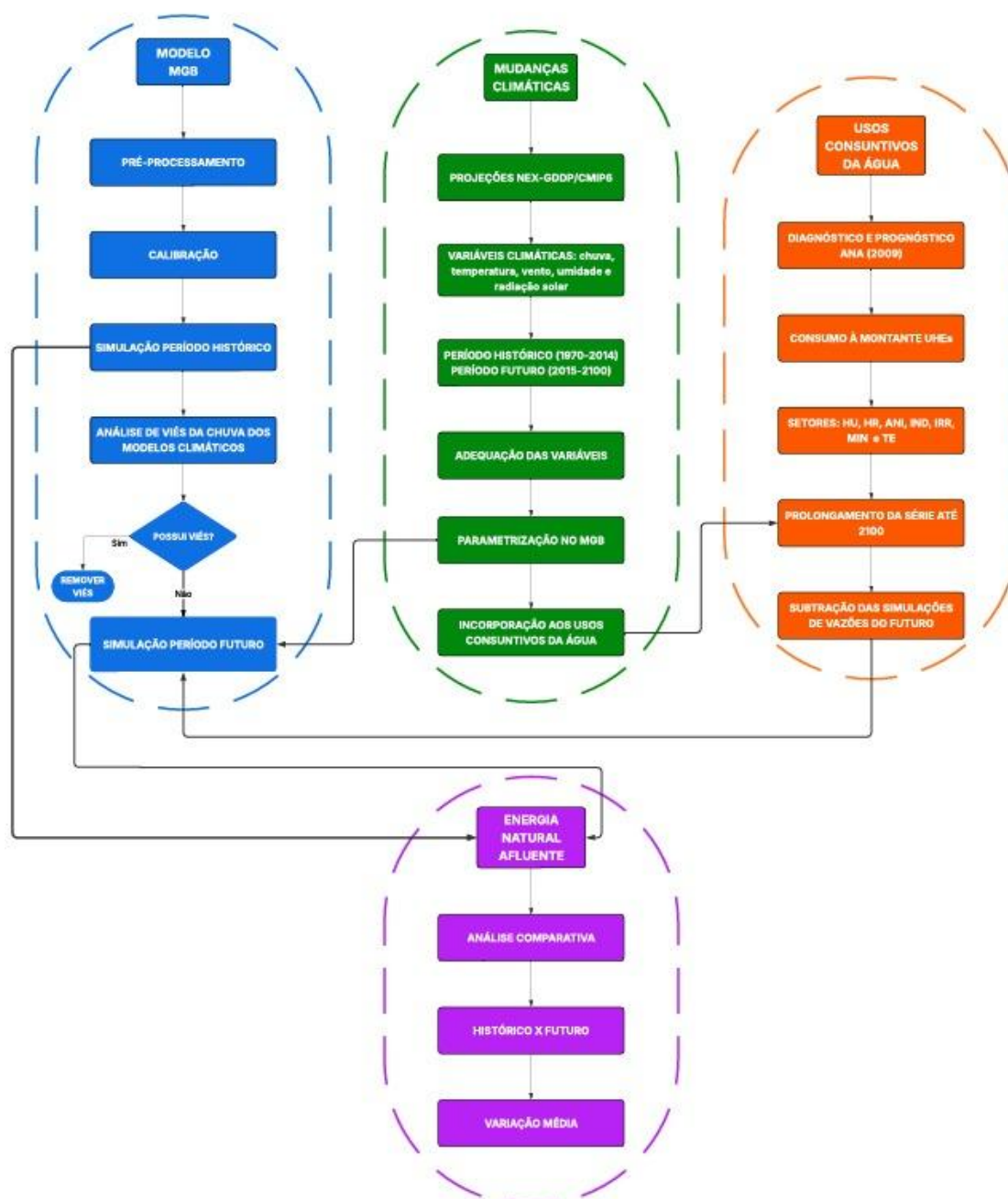
m = Número de aproveitamentos existentes no sistema de aproveitamentos do subsistema considerado.

4. METODOLOGIA

4.1. Descrição geral da metodologia

Essa seção apresenta as etapas de trabalho desenvolvidas desde a descrição da metodologia, dos softwares e dos dados utilizados, da área de estudo, da apresentação dos processos envolvidos na projeção das vazões e no cálculo energético, entre outros. A Figura 14 apresenta de forma esquemática o fluxograma da metodologia.

Figura 14 Fluxograma da metodologia de trabalho com o resumo das principais etapas realizadas.



Inicia-se o trabalho com o ajuste do modelo hidrológico MGB às condições da bacia hidrográfica a ser avaliada. Para utilização do modelo é necessária a realização do pré-processamento, onde são parametrizadas as condições iniciais das bacias hidrográficas no MGB.

São necessários dados fisiográficos tais como o relevo, que são inseridos no formato de Modelos Digitais de Elevação (MDE), o tipo de solo e usos dos solos, que combinados determinam as URH, informações de cobertura vegetal e séries temporais de dados observados da bacia hidrográfica, tais como, a precipitação diária, dados climáticos médios mensais e as vazões diárias de pontos de interesse.

Após a obtenção e organização das entradas, com o modelo ajustado às condições iniciais da bacia, pode-se calibrar o MGB. Inicialmente realiza-se a calibração manualmente, variando os parâmetros de cada sub-bacia de maneira iterativa e verifica-se a melhoria nos ajustes pelas estatísticas e pela análise visual em gráficos. Chegando-se ao ponto em que os resultados não podem melhorados. Pode-se iniciar a calibração automática, utilizando uma ferramenta do próprio modelo MGB que busca os melhores conjuntos de parâmetros pela técnica de algoritmos genéticos.

Paralelamente trabalhou-se na obtenção, organização e ajustes das projeções futuras das variáveis climáticas no horizonte de avaliação, onde além da precipitação dos modelos climáticos, outros parâmetros são utilizados, tais como as temperaturas (mínima, média e máxima), vento, radiação solar e umidade relativa. Nessa etapa, se realiza os recortes para a área de interesse, as transformações de coordenadas, ajustes de unidades e interpolação dos dados (apenas na precipitação).

Realizou-se a parametrização das variáveis no MGB. Para a precipitação se interpolou a chuva dos modelos para o centroide das minibacias. Para as demais variáveis associa-se aos pontos de grade mais próximos cada uma das estações de clima utilizadas. Calcula-se a variação percentual entre o período futuro e o período histórico para cada variável, e a variação é aplicada ao arquivo de médias climáticas para o período futuro, ou seja, são gerados arquivos referentes aos modelos climáticos, para os dois cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

Com o modelo ajustado para as condições iniciais e devidamente calibrado, o MGB está apto para a realização das simulações das vazões. Realiza-se as simulações para o período histórico, com a chuva observada e com a chuva dos modelos climáticos do NEX-GDDP, onde se avalia as simulações para condições em que os dados de entrada não foram utilizados na calibração, uma vez que, a chuva observada é utilizada na

calibração, com isso, torna-se importante verificar se o MGB é capaz de simular de maneira adequada utilizando informações do modelo climático.

Realizou-se as projeções dos usos consuntivos da água em usinas hidrelétricas. Nessa etapa utiliza-se os dados históricos e as projeções da ANA (2019) até de 1970 a 2021. Para expandir a série até 2100 (horizonte de estudo), aplica-se a taxa de variação dos últimos anos da série histórica, tendo algumas classes de usos consuntivos com a restrições de crescimento em 2050, ano em que a taxa de crescimento populacional passa a ser negativa, promovendo uma estabilização do crescimento da série de usos consuntivos.

Como as séries projetadas de usos consuntivos não considera mudanças climáticas, o efeito do clima foi aplicado nas séries projetadas, utilizando-se o ano de 2021 como referência, aplicando-se um fator de correção calculado a partir da variação anual da evapotranspiração e temperatura (F_{cc}).

Para projeções futuras das vazões no mesmo horizonte, o modelo MGB é simulado para o futuro de 2015 a 2100, utilizando as entradas referentes ao clima que foram alteradas, inseridos os efeitos do clima tanto na chuva (interpolada para as bacias) quanto nas demais variáveis relacionadas ao clima que parametrizadas no MGB, conforme mencionado anteriormente.

De posse das séries de vazões projetadas pelo MGB e das séries projetadas de usos consuntivos com a incorporação das mudanças climáticas, é realizada a subtração dos montantes referentes aos usos consuntivos das séries de vazão projetadas.

Após todos esses procedimentos, pode-se fazer a análise comparativa das vazões, atividade em que os resultados das projeções são analisados de modo a verificar o efeito das alterações climáticas e dos usos consuntivos nas vazões das usinas hidrelétricas em análise.

De posse das vazões simuladas para o período histórico e o período futuro, sob a influência do clima e de usos consuntivos da água, se realiza a análise comparativa da ENA que é proporcional às vazões afluentes aos aproveitamentos hidrelétricos, para os diferentes modelos climáticos avaliados, cenários de emissão e períodos futuros.

4.2. Projeções dos Usos Consuntivos da Água

Esse estudo se torna importante pois avalia os efeitos de cenários de usos consuntivos da água e as consequências sobre a geração hidrelétrica nos aproveitamentos hidrelétricos de 27 bacias hidrográficas.

Além disso, são incorporados os efeitos das mudanças climáticas que geram impactos diretos e indiretos sobre as demandas de água, principalmente em usos nos quais o seu consumo se dá diretamente pelas condições climáticas.

Por exemplo, no caso do aumento da temperatura há uma necessidade de quantidades maiores de água para a irrigação de culturas agrícolas, além disso, maiores quantidades de água são consumidas para a dessedentação humana e animal.

Outro exemplo de mudança no clima que pode afetar as demandas hídricas são as reduções na chuva projetadas para algumas regiões do país, que podem aumentar também a necessidade de irrigação e, com isso, diminuir a disponibilidade da água para a geração hidrelétrica.

Apesar da latente importância do tema, as estimativas de demanda de água realizadas por estudos ligados ao planejamento de recursos hídricos e energia, geralmente não consideram mudanças nas condições climáticas, mas apenas cenários econômicos de desenvolvimento.

Por esse motivo, neste trabalho será considerada uma projeção de referência (com efeitos de mudanças climáticas) sobre a qual será aplicado um ajuste para representar as alterações no clima e os efeitos nas demandas de usos consuntivos da água.

Para a realização da projeção dos usos consuntivos da água para as bacias de drenagem das usinas hidrelétricas, utilizou-se os dados fornecidos no manual de usos consuntivos da água (ANA, 2019) e sua atualização realizada no ano de 2021. Onde são encontrados dados históricos (1931 a 2021) e uma projeção de (2022 a 2040) dos usos consuntivos da água à montante dos aproveitamentos hidrelétricos brasileiros.

Vale ressaltar que até o momento as projeções não consideraram os efeitos das mudanças climáticas. Portanto, os efeitos das mudanças climáticas serão posteriormente incorporados no trabalho.

Como é avaliado o período histórico de 1970 a 2014, os dados referentes a anos anteriores à 1970 são descartados. Para o período futuro, é avaliado o horizonte de 2015 a 2100 (mesmo horizonte disponibilizado nos modelos climáticos), com isso, é necessário estender a série de consumos para o período de 2022 a 2100.

Julgou-se mais coerente realizar as projeções conforme metodologia proposta para todo o período futuro, para que não houvesse diferenças muito significativas entre os valores projetados até 2040 (ANA) e os demais anos da série.

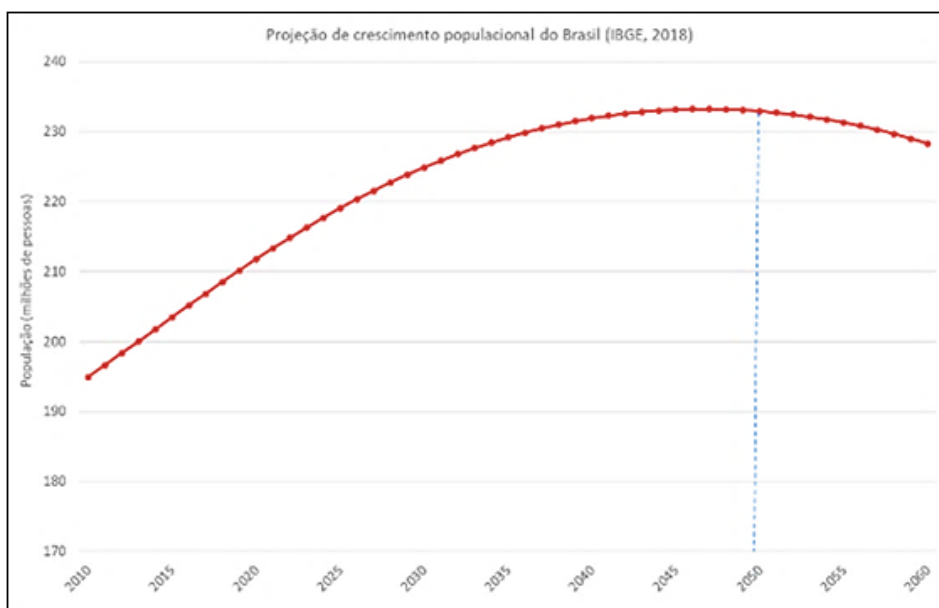
Outra consideração a ser feita, é que as projeções não poderiam crescer de maneira ilimitada até o final do século, uma vez que, poderiam existir algumas limitações para o crescimento de alguns setores.

Por exemplo, a agricultura com a limitação de área disponível para novos cultivos ou crescimento de áreas já cultivadas. Outra limitação que pode ser mencionada é a quantidade de água disponível, já que, algumas das bacias avaliadas se encontram saturadas, com montantes de água outorgados próximos aos limites estabelecidos em lei.

Portanto, aplicou-se alguns limites para o crescimento das demandas de água dos setores associados ao crescimento populacional, seguindo a projeção do realizada pelo IBGE (Figura 15).

Com isso, a partir do ano de 2050, as taxas do crescimento do consumo de água das classes abastecimento humano (urbano e rural), foram reduzidas e deixadas constantes com o valor residual da variação de 2050 com relação a 2049, até o ano de 2100.

Figura 15 Projeção brasileira de crescimento populacional. Fonte: IBGE (2018).



Utilizou-se o mesmo ano para limitar a classe indústria e irrigação, partindo-se da premissa de que haveria um limite de área disponível para que esses setores consumidores pudessem crescer o que poderia estar associado também ao crescimento populacional.

A partir do momento em que a população parar de crescer, não será necessário aumentar a produção de alimentos e nem a produção industrial, com isso haveria estabilização dos dois setores.

Para classes de dessedentação animal e mineração optou-se por se aplicar uma tendência linear de crescimento seguindo uma média do período histórico, sem aplicação de limitação, uma vez que, esses setores não se correlacionam diretamente com o crescimento populacional.

Uma última consideração a ser feita a respeito do setor de Termelétricas, pois para a maioria dos aproveitamentos este era irrelevante quando comparado com os demais setores apresentados no manual da ANA, portanto, os resultados foram desconsiderados.

Para estender as séries mensais de demanda até 2100, a metodologia adotada consistiu em aplicar a taxa de crescimento observada nos últimos cinco anos do registro histórico a cada uma das classes de uso consuntivo.

Os valores das taxas de crescimento foram calculados para cada classe, de acordo com a Equação 10, no período de 2017 a 2021, e a média dessas taxas foi calculada e atribuída ao ano de 2021. Esse processo é representado na Figura 16.

$$\Delta C_t = \frac{C_t}{C_{t-1}} \quad \text{Equação (10)}$$

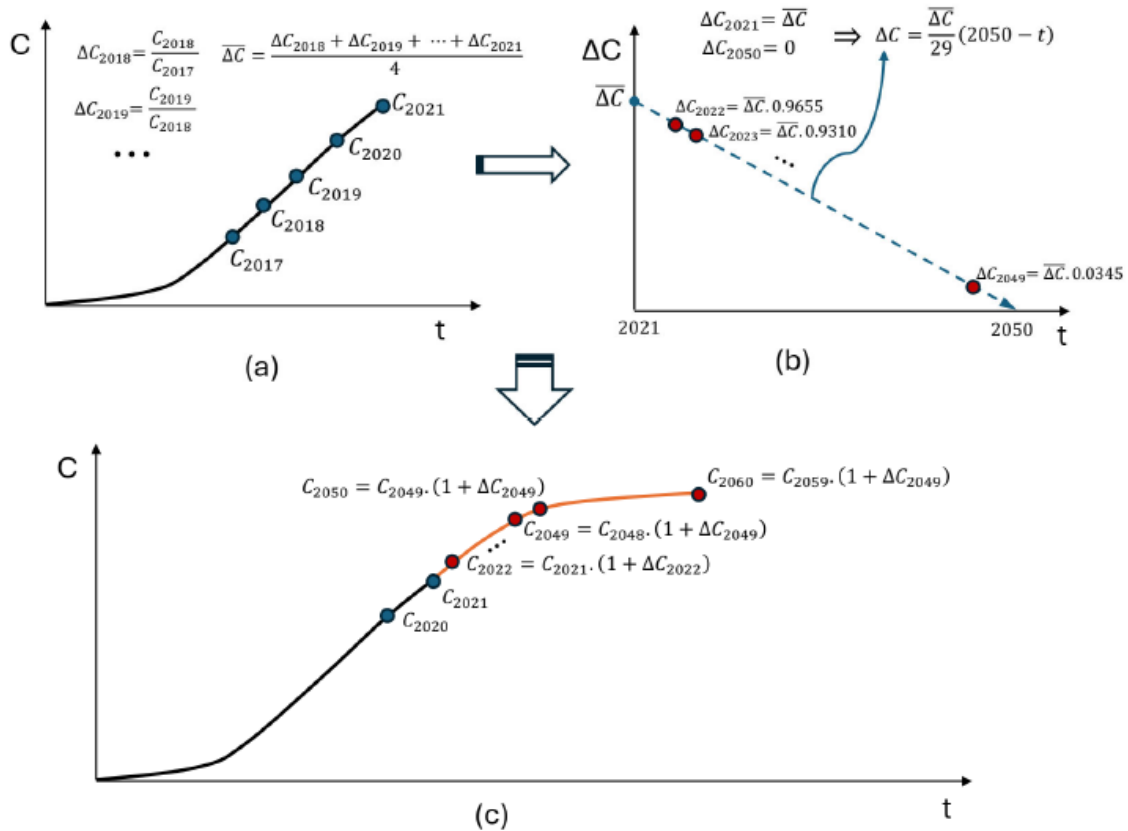
Onde:

ΔC_t = taxa de crescimento do consumo no ano t, em relação ao ano t – 1;

C_t = consumo médio anual da classe no ano t;

C_{t-1} = consumo médio anual da classe no ano t – 1.

Figura 16 Etapas para a projeção do consumo de água pela taxa de variação histórica por setor.



Uma equação linear foi ajustada, iniciando em 2021 com a taxa média de crescimento e o valor da variação foi fixado em 0 para o ano de 2050 (Figura 16), ano em que o crescimento populacional se estabiliza, de acordo com o censo brasileiro. Dessa forma, a taxa de variação da classe é uma função do ano (Equação 11).

$$\Delta C_t^{fut} = \frac{\overline{\Delta C}}{29}(2050 - t) \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

ΔC_t^{fut} = taxa de crescimento do consumo no ano futuro t ;

$\overline{\Delta C}$ = taxa média de crescimento do consumo dos últimos cinco anos do período histórico.

Os valores projetados de consumo são calculados de 2022 a 2100 utilizando a Equação (12). Conforme pode ser observado na Figura 16, no período de 2050 a 2100 aplica-se a Equação (12) com a taxa de crescimento de 2049. Em outras palavras, considerou-se que, apesar da estabilização populacional, a demanda por água continuará aumentando a uma taxa residual igual à observada entre 2048 e 2049.

$$C_{t+1} = C_t \cdot (1 + \Delta C_{t+1}) \quad \text{Equação (12)}$$

Esse ajuste é realizado para as classes de consumo de água diretamente influenciadas pela população total. Assim, as classes de mineração, termelétricas e dessedentação animal não tiveram seu crescimento limitado até 2050.

Para incorporar as mudanças climáticas às projeções de consumo, adotou-se a premissa de que essas projeções constituem um cenário de referência que deve ser corrigido de acordo com as alterações climáticas de cada modelo climático.

Para isso, assumiu-se que as mudanças na ET de referência influenciam a classe de irrigação e que as mudanças na temperatura média influenciam o abastecimento humano (urbano e rural) e o abastecimento animal.

A Equação 13 é utilizada para calcular a correção do consumo de água, aplicada aos valores projetados de consumo das classes mencionadas, incorporando, assim, o efeito das mudanças climáticas às séries. A Figura 17 apresenta o procedimento utilizado para os cálculos.

$$C_t^{CC} = C_t \cdot \frac{\overline{ET_{hist}}}{ET_t} \quad \text{Equação (13)}$$

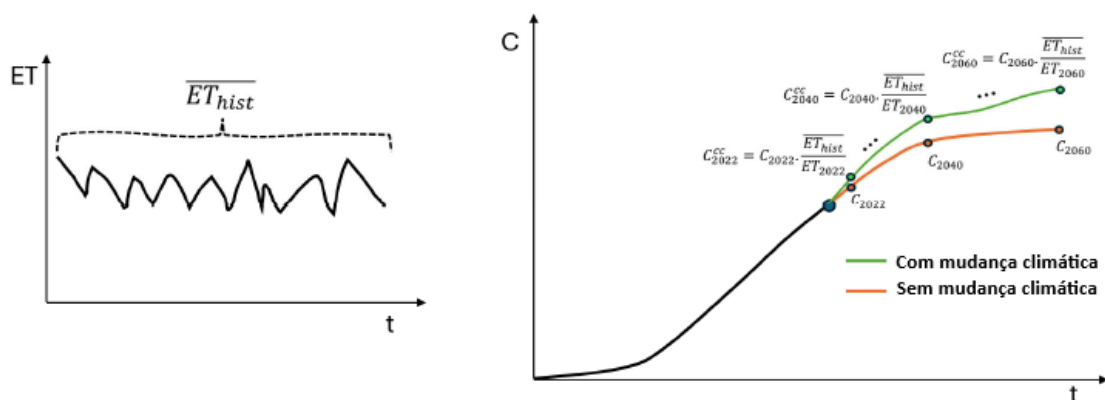
Onde

C_t^{cc} = Consumo de água corrigido pelas mudanças climáticas;

ET_{hist} = Evapotranspiração média do período histórico do modelo climático (1970–2014);

ET_t = Evapotranspiração do ano futuro t . A evapotranspiração é substituída pela temperatura quando aplicada aos consumos de abastecimento humano e animal.

Figura 17 Correção das projeções de consumo de água para incorporar o efeito das mudanças climáticas.



Para as demais classes, assumiu-se que não há uma relação bem definida entre as variáveis climáticas e as mudanças na demanda por água. Dessa forma, o efeito do clima não foi aplicado ao consumo de mineração, de usinas termelétricas e da indústria.

As projeções construídas a partir dessa metodologia ainda não consideram a influência das mudanças climáticas, cujos impactos podem alterá-las significativamente.

Como a consideração de uma evolução dinâmica do consumo de água em função das mudanças climáticas exige uma modelagem complexa, adotou-se a premissa de que as projeções formam um cenário de referência, sobre o qual será aplicada a influência das mudanças no clima.

Considerou-se que deve ocorrer uma correção das projeções de usos consuntivos por setores em função das mudanças climáticas projetadas por cada um dos modelos climáticos do NEX-GDDP.

Para aplicar as mudanças climáticas aos cenários de referência foi adotada a variação da evapotranspiração de referência (ET), calculada pela equação de Thornthwaite para o setor da agricultura e a variação anual da temperatura média para os setores de abastecimento humano urbano e rural e dessedentação animal.

No cálculo da ET pela equação de Thornthwaite foram utilizados os dados das variáveis temperatura máxima e mínima, oriundas das projeções dos cinco modelos climáticos do NEX-GDDP.

Determinou-se, os valores médios anuais de ET sobre cada uma das sub-bacias incrementais determinadas pelo aproveitamento hidrelétrico e a partir desses resultados calcula-se, o aqui denominado de fator de correção de consumo de água (Fcc), dividindo o valor anual médio de ET no ano futuro pelo valor médio de ET do período histórico (Equação 14).

Isso é feito para as variações de temperatura, onde calcula-se o fator de correção de consumo dividindo-se o valor médio anual de temperatura pela média de temperatura do período histórico.

$$F_{cc} = \frac{\text{Variável}(\text{ano futuro})}{\text{Variável}(\text{histórico})} \quad \text{Equação (14)}$$

Onde:

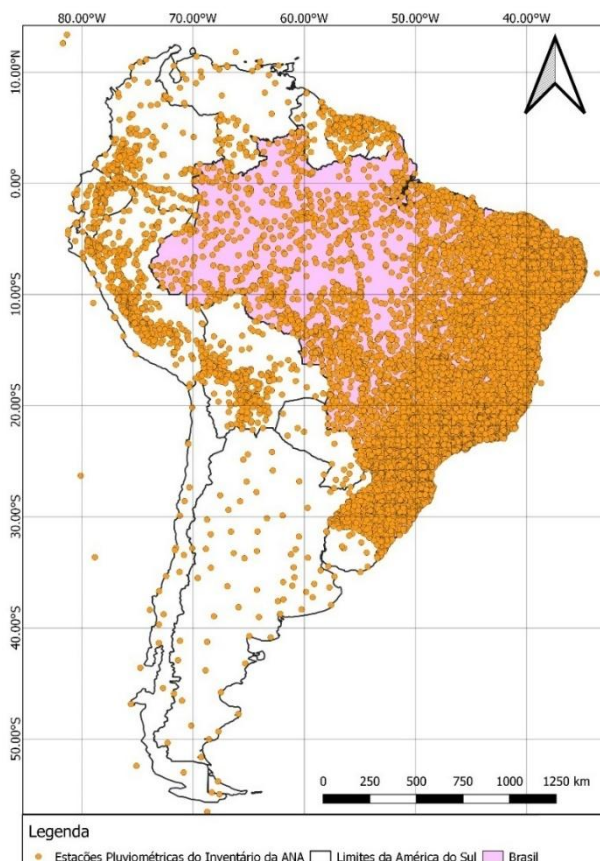
Variável = Evapotranspiração ou Temperatura.

4.3. Dados e softwares utilizados

→ Precipitação:

Nesse trabalho, utiliza-se na etapa de calibração de dados de precipitação as informações obtidas de estações pluviométricas contidas na base de dados Hidroweb que contempla estações de responsabilidade de várias agências além de muitas estações da própria ANA, conforme a Figura 18.

Figura 18 Estações pluviométricas (ANA, 2023).



→ Vazões observadas:

As vazões são utilizadas na calibração do modelo MGB a partir das estatísticas (NS, NSlog, ΔV), calculadas entre a vazão observada e a vazão simulada pelo modelo, que determinam se o MGB está bem ajustado às condições iniciais da bacia hidrográfica em estudo.

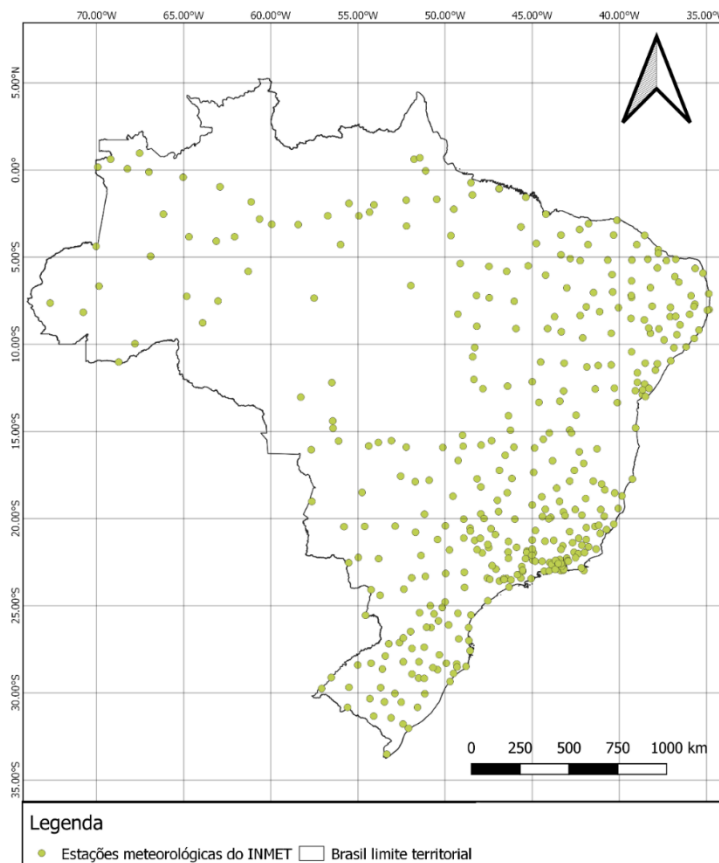
→ Clima:

Nesse trabalho, utiliza-se as informações da base de dados do INMET, onde a localização das estações utilizadas pode ser verificada na Figura 19.

As variáveis necessárias para a simulação do MGB são: a temperatura média (°C), umidade relativa (%), insolação (h/dia), vento (m/s) e pressão atmosférica (kPa), essas

informações são obtidas de séries temporais, onde são inseridas no modelo MGB-IPH as climatologias e organizadas em um arquivo de entrada.

Figura 19 Estações climáticas do INMET encontradas no território nacional (INMET, 2025).

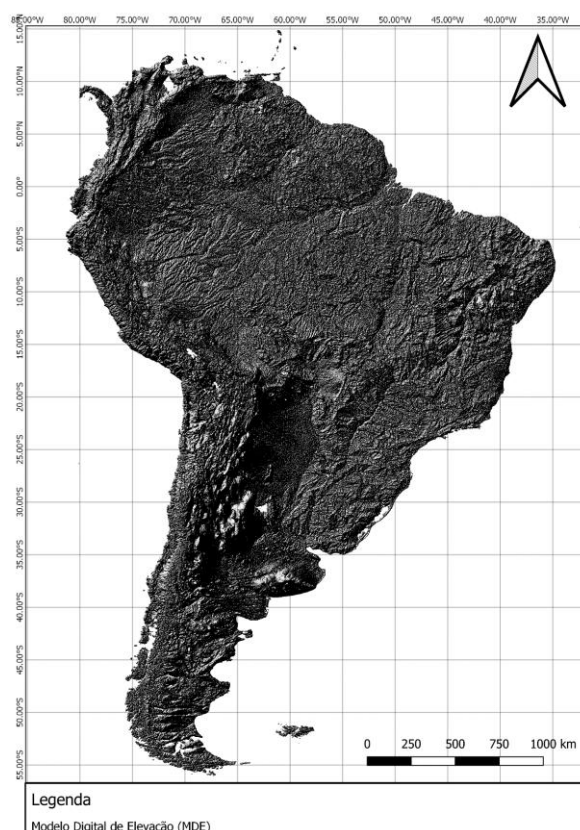


→ Dados fisiográficos:

O MDE utilizado nesse trabalho são provenientes do *Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI) com resolução espacial de 90 metros. A partir desse banco de dados foi desenvolvida uma camada *raster* apresentada Figura 20, que apresenta uma representação em forma de mapa com o MDE gerado para toda a América do Sul.

No pré-processamento do modelo foram recortadas as informações da camada *raster* referentes ao relevo para todas as bacias hidrográficas avaliadas.

Figura 20 Modelo Digital de Elevação da América do Sul (CGIAR-CSI, 2025).



→ Unidades de resposta hidrológica:

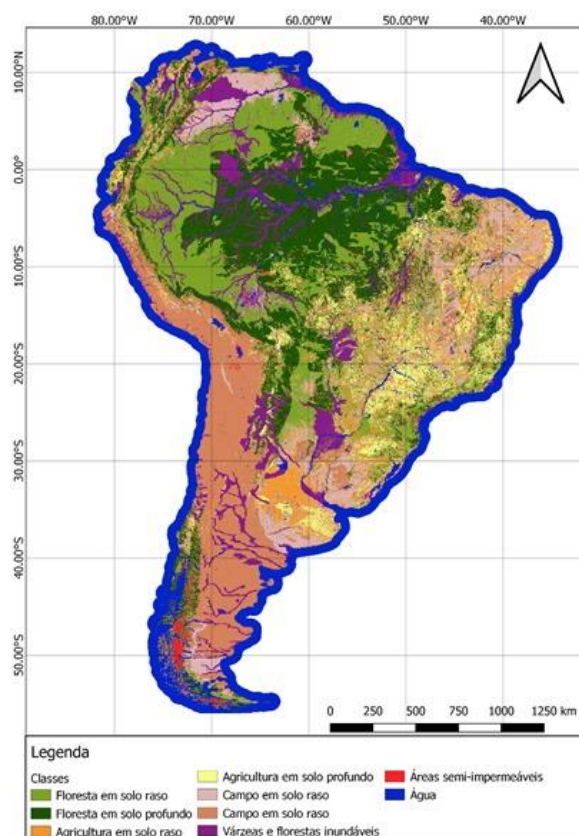
São utilizadas as URH apresentadas por Fan *et al.* (2015), com 9 classes apresentadas na Tabela 4 e na Figura 21. Essa informação é recortada para as áreas estudadas e são determinados os percentuais de cada uma das classes em cada minibacia discretizada pelo modelo MGB no pré-processamento.

Tabela 4 – Classes de URH determinadas para a América do Sul

Sigla da classe	Descrição da Classe
F_S_R	Floresta em solo raso
F_S_P	Floresta em solo profundo
A_S_R	Agricultura em solo raso
A_S_P	Agricultura em solo profundo
C_S_R	Campo em solo raso
C_S_P	Campo em solo profundo
F_I_S_P	Floresta e várzeas inundáveis
A_S_I	Áreas semi-impermeáveis
AGUA	Rios, lagos e oceanos

Fonte: Fan et al. (2015).

Figura 21 Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica da América do Sul (Fan *et al.*, 2015).



→ Cobertura Vegetal:

Collischonn (2001) apresenta tabelas com valores típicos de parâmetros fixos, extraídos da literatura. Nesse trabalho são utilizados os valores típicos dos parâmetros em todas as simulações com o MGB e são apresentados na Tabela 5 a Tabela 8.

Tabela 5 - Valores típicos de Albedo de cobertura vegetais

Cobertura	Albedo	Fonte
Água	0,08	Shuttleworth (1993)
Florestas altas	0,11 a 0,16	Shuttleworth (1993)
Cultivos agrícolas altos (cana de açúcar)	0,15 a 0,20	Shuttleworth (1993)
Cultivos agrícolas baixos (trigo e soja)	0,20 a 0,26	Shuttleworth (1993)
Grama e pastagem	0,20 a 0,26	Shuttleworth (1993)
Solo nu (seco)	0,35	Shuttleworth (1993)
Solo nu (úmido)	0,10	Shuttleworth (1993)
Neve e gelo (velha)	0,20	Shuttleworth (1993)
Neve e gelo (nova)	0,80	Shuttleworth (1993)
Cerrado (estiagem)	0,18	Miranda <i>et al.</i> (1996)
Cerrado (época úmida)	0,13	Miranda <i>et al.</i> (1996)
Floresta amazônica	0,134	Wright <i>et al.</i> (1996)
Pastagem amazônica	0,18	Wright <i>et al.</i> (1996)

Fonte: Collischonn (2001).

Tabela 6 - Valores de IAF de coberturas vegetais da literatura

Tipo de Cobertura	IAF	Fonte
Coníferas	6,0	Bremicker (1998)
Floresta decídua	6,0*	Bremicker (1998)
Soja irrigada	7,5*	Fontana <i>et al.</i> (1992)
Soja não irrigada	6,0*	Fontana <i>et al.</i> (1992)
Floresta amazônica	6,0 a 9,6*	Honzák <i>et al.</i> (1996)
Pastagem amazônica (estiagem)	0,5	Roberts <i>et al.</i> (1996)
Pastagem amazônica (época úmida)	3,9	Roberts <i>et al.</i> (1996)
Savana africana (região semiárida)	1,4*	Kabat <i>et al.</i> (1997)
Cerrado (estiagem)	0,4	Miranda <i>et al.</i> (1996)
Cerrado (época úmida)	1,0	Miranda <i>et al.</i> (1996)

Fonte: Collischonn (2001).

Tabela 7 - Altura da vegetação para diferentes tipos de cobertura vegetal

Cobertura	Altura (m)
Floresta	10
Cerrado	5
Campo, Pastagem	0,5
Agricultura	0,5
Pastagem amazônica	0,53
Floresta amazônica	30

Fonte: Collischonn (2001).

Tabela 8 - Valores de RS para diversos tipos de vegetação em condição de boa disponibilidade de água no solo

Cobertura do solo	RS sem déficit ($r_{sco} - s.m^{-1}$)	Fonte
Floresta	100	Shuttleworth (1993)
Cerrado	100 a 200	Conde (1997)
Cultura	40	Bremicker (1998)
Trigo	40	Bremicker (1998)
Campo	40 a 80	Bremicker (1998)
Grama	69	Shuttleworth (1993)
Grama	71	Todorovic (1999)
Savana africana	60	Blyth (1997)
Savana africana com arbusto (tiger bush)	98	Blyth (1997)
millet	154	Blyth (1997)

Fonte: Collischonn (2001).

→ Parâmetros relativos a características dos solos:

São os parâmetros que estão sumarizados na Tabela 9. A Tabela 10 apresenta os valores típicos sugeridos no Manual Expresso de Calibração dos parâmetros do MGB.

Vale ressaltar que, em alguns casos, os valores típicos podem ser extrapolados para os limites inferiores e superiores, a fim de melhorar o ajuste do modelo, sendo que os três últimos parâmetros da Tabela 9 são mantidos com valores fixos.

Tabela 9 - Parâmetros calibráveis do modelo MGB

Parâmetro Calibrável	Descrição
Capacidade de Armazenamento do Solo (Wm)	Capacidade de armazenamento de água no solo.
Forma da relação entre armazenamento e saturação (b)	Parâmetro empírico que define a variabilidade da capacidade de armazenamento do solo em torno de Wm.
Vazão durante a estiagem (Kbas)	Parâmetro que controla a vazão durante a estiagem. Valores mais altos implicam em maior escoamento subterrâneo.
Quantidade de água que escoasubsuperficialmente (Kint)	Parâmetro controla a quantidade de água da camada de solo que escoasubsuperficialmente.
Forma da curva de redução da drenagem intermediária (XL)	Controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou sub-superficial do solo.
Fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial (CAP)	Controla a possibilidade de retorno de água subterrânea para a camada de solo.
Armazenamento Residual (Wc)	Limita o armazenamento residual e subterrâneo.
Calibração da propagação superficial (CI)	Parâmetro para calibração da propagação superficial nas minibacias.
Calibração da propagação sub-superficial (CS)	Parâmetro para calibração da propagação subterrânea nas minibacias.
Retardo do reservatório subterrâneo (CB)	Parâmetro que representa o retardo do reservatório subterrâneo.
Vazão de Base (QB)	Parâmetro que representa o fluxo de base da minibacia.

Fonte: Collischonn *et al.* (2020).

Tabela 10 - Parâmetros calibráveis do modelo MGB

Parâmetro	Valor mínimo sugerido	Valor máximo sugerido
Wm	50	1000
b	0,12	1,60
Kbas	0,05	5,00
Kint	4	40
CI	50	200
CS	1	20
CB	1200	8000
XL	0,67	0,67
CAP	0	0
Wc	0,1	0,1

Fonte: Collischonn *et al.* (2020).

4.4. Desenvolvimentos no MGB

A primeira etapa a ser desenvolvida é o pré-processamento, que consiste em determinação da caracterização física, como as divisões em bacias de drenagem, sub-bacias e minibacias a partir do MDE. Embora já se encontre MDE com resoluções melhores do que o utilizado, esses dados se mostraram bastante consistentes em aplicações anteriores.

Todo o pré-processamento é executado no SIG e nessa etapa são inseridas, ajustadas e organizadas todas as informações de entrada do MGB para posterior

calibração e simulação utilizando o modelo. Por aqui existe a opção de desenvolvimento dos arquivos da precipitação diária, o arquivo de vazão, as entradas de clima, parâmetros dos solos e de cobertura vegetal. No entanto, esses arquivos podem ser obtidos de maneira independente ao SIG.

No trabalho para a entrada de precipitação, os dados das estações pluviométricas foram adquiridos e interpolados a partir de ferramentas do próprio SIG. As demais entradas foram elaboradas manualmente com o auxílio de arquivos padrão em formato de bloco de notas, alterando os valores dos parâmetros de acordo com a bacia a ser analisada.

Na calibração do MGB, conforme mencionado, foram utilizados dados de vazões diárias naturalizadas, obtidas junto ao ONS, de usinas hidrelétricas do SIN no período de 1970 a 2014.

Inicialmente realizou-se a calibração manual, alterando os valores de parâmetros iniciais, conforme Figura 26, de maneira individualizada e a verificação da melhoria do ajuste é feita a partir de hidrogramas das vazões naturalizadas, aqui chamadas de observadas com as vazões simuladas pelo MGB, além da verificação das três estatísticas de eficiência que o próprio MGB tem como resultado.

Após esse processo iterativo pode-se utilizar a rotina de calibração automática do MGB, calibrando sub-bacia por sub-bacia até se atingir as condições consideradas satisfatórias e adequadas para a próxima etapa. Vale ressaltar que nesse estudo não se utilizou um período de validação para a verificação da eficiência das calibrações.

A última etapa de desenvolvimento no modelo é a de simulação dos resultados. Nesse estudo as simulações foram realizadas tanto para a obtenção das vazões no período histórico (1970 a 2014) quanto para as projeções de vazões do período futuro (2015 a 2100). As saídas de vazões do MGB seguem a mesma discretização temporal da entrada de precipitação, portanto, as séries de vazões simuladas para ambos períodos são séries diárias.

4.5. Projeções climáticas CMIP6 e NEX-GDDP:

As projeções de variáveis climáticas utilizadas são provenientes do CMIP6, mais especificamente, são os resultados do projeto NEX-GDDP, que a partir da técnica de downscaling estatístico com o método *Bias Correction and Spatial Disaggregation* (BCSD) originalmente desenvolvido por Wood *et al.* (2002), reduzindo as informações para escalas regionais, algo importante para estudos na escala de bacias hidrográficas.

Os modelos utilizados são:

- Modelo ACCESS-ESM1-5, desenvolvido pelo *Australian Community Climate and Earth System Simulator*.
- Modelo CanESM5, desenvolvido pelo *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis*.
- Modelo INM-CM4-8, desenvolvido pelo *Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences*.
- Modelo IPSL-CM6A-LR, desenvolvido pelo *Institut Pierre-Simon Laplace*.
- Modelo MPI-ESM1-2-HR, desenvolvido pelo *Max Planck Institute for Meteorology Earth System Model*.

A justificativa da escolha desses modelos se baseou na disponibilidade das variáveis utilizadas pelo modelo hidrológico no período em que os dados foram coletados, no ano de 2023.

O que difere da situação apresentada na Tabela 1, que mostra que teriam muitas outras opções que contêm as variáveis necessárias para as simulações com o MGB. No entanto, são modelos que apresentam bom desempenho da representação da precipitação, sendo boa justificativa, uma vez que, a variável é a principal entrada dos modelos hidrológicos.

As projeções das variáveis climáticas são obtidas do projeto NEX-GDDP, nesses dados, foi realizado o processo de downscaling estatístico nas projeções dos modelos climáticos globais do AR6 do IPCC de baixa resolução $1^\circ \times 1^\circ$ (aproximadamente 100 km).

Após o downscaling os pontos de grade dos dados passaram a ter resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (aproximadamente 25 km) segundo informações do *NASA Center for Climate Simulation* (NCCS, 2023). Os dados estão disponíveis para download no formato *Network Common Data Form* (NetCDF) com grade que cobre todo o globo terrestre.

Foi aplicada uma série de algoritmos desenvolvidos por Barbosa (2024) em *Bourne Again SHell* (Bash) e *Climate Data Operators* (CDO). Foram utilizados para realizar operações específicas como a conversão de coordenadas, o recorte espacial, a conversão de unidades e a concatenação dos dados desenvolvidos que executavam as seguintes tarefas:

No primeiro, foram transformadas as coordenadas dos arquivos para a adequação ao padrão de longitude de -180° a $+180^\circ$ e de latitude de -90° a $+90^\circ$, já que os dados são encontrados em outro padrão, a saber, longitude de 0° a 360° e latitude de 0° a 180° . No

mesmo script, foi realizado o primeiro recorte, contemplando a região da América Latina, reduzindo o tamanho dos dados para facilitar o armazenamento e a manipulação destes.

No segundo script pode-se realizar o segundo recorte para a área de interesse, no caso, são utilizadas as coordenadas do retângulo envolvente da bacia hidrográfica a ser avaliada, já que o modelo MGB utiliza as bacias hidrográficas como a unidade de avaliação.

Com isso, mais uma vez, os dados são reduzidos, o que facilita seu processamento. Além disso, nessa etapa são realizadas as transformações de unidades das variáveis precipitação e temperatura para se adequar à maneira que o MGB-IPH utiliza;

No terceiro script, as variáveis são concatenadas em um único arquivo que contempla as informações do período histórico ou do futuro para ambos os cenários. Esses arquivos são posteriormente para interpolar as variáveis para as minibacias previamente discretizadas no pré-processamento do modelo MGB.

No quarto script os dados que estão em formato NetCDF são convertidos para arquivos de texto e binários; estes são os formatos utilizados pelo modelo MGB-IPH. A entrada necessária é dos arquivos concatenados das variáveis de cada modelo climático utilizado.

No quinto script, é feita uma correção adicionando os mesmos valores verificados na variável no dia 28 de fevereiro ao dia 29 de fevereiro, referente aos anos bissextos que não são considerados em alguns dos modelos do AR6 do IPCC. Esse fato acarreta alterações no número de dias nos dados (faltam alguns dias referentes ao dia 29 de fevereiro), causando conflitos na simulação do modelo MGB, já que os arquivos de vazões contemplam os anos bissextos.

Finalmente, é utilizada a rotina de interpolação, onde se utiliza uma adaptação em CDO da rotina do próprio modelo MGB, que faz a interpolação pelo inverso do quadrado da distância, das variáveis para os centroides das minibacias para cada um dos modelos e cenários.

→ Projeção de vazões dos aproveitamentos hidrelétricos:

São projetadas as vazões com as entradas de chuva dos cinco modelos climáticos analisados, com a parametrização de mudanças climáticas feita em outras quatro variáveis (temperatura média, insolação, velocidade do vento e umidade relativa) e para o período futuro.

Além disso, serão apresentados os resultados das projeções sem e com a retirada dos usos consuntivos da água, sendo que a estes também foram incorporados os efeitos das mudanças climáticas, como apresentado na seção anterior.

As análises das vazões são realizadas entre as vazões do futuro para os dois períodos e para os dois cenários de emissão dos modelos climáticos, em termos médios, em relação às médias de vazões simuladas para o período histórico utilizando a chuva dos modelos climáticos como entrada do MGB.

Portanto, são comparados os resultados das projeções do período futuro e das simulações para cada modelo climático no período histórico, e não mais com as simulações do MGB para o período histórico sendo alimentado pela chuva observada, como é feito na seção 5.3.

São analisadas também as vazões características como a Q95% (vazões de estiagem) e Q5% (vazões de cheia) a partir de análise de curvas de permanência do período histórico e período futuro.

São apresentados mapas com as variações de vazão em termos percentuais para algumas das principais usinas hidrelétricas e de anomalias de vazões para algumas das principais bacias hidrográficas.

Além disso, serão analisadas as vazões sem e com as retiradas de projeções de usos consuntivos da água à montante dos aproveitamentos hidrelétricos, que foram estendidas para o período futuro.

→ Softwares:

Na etapa de pré-processamento realizada em um SIG, utiliza-se o Quantum Gis (Qgis) na versão 3.4.14 que é um software de código aberto e livre, que possui uma interface do MGB e seus processos, tais como a obtenção de séries temporais de vazão, precipitação, das variáveis climáticas, além disso, é possível realizar toda a simulação do MGB a partir dessa interface.

A utilização do MGB foi realizada a partir das rotinas em Fortran para as etapas de calibração do modelo, simulação do histórico e projeção dos cenários futuros. O compilador de linguagem Fortran utilizado no trabalho foi o *Visual Studio Community 2019*. O MGB é utilizado para as simulações de vazões diárias tanto para o período histórico quanto para os períodos futuros.

No tratamento dos dados climáticos e na utilização dos pacotes de aplicações do CDO foi utilizado o Cygwin, que é uma grande coleção de ferramentas de código aberto que fornecem funcionalidade semelhante à de uma distribuição Linux no Windows.

Ainda foram amplamente utilizadas planilhas eletrônicas, na confecção de gráficos, hidrogramas, na realização de cálculos, análises dos resultados, etc.

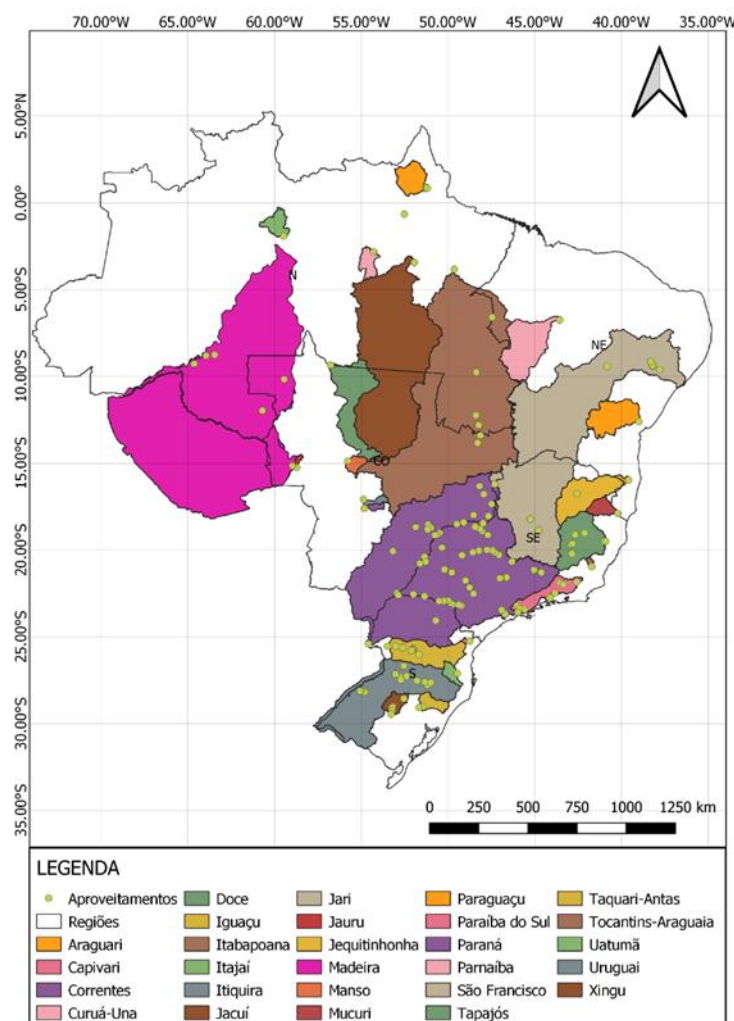
4.6. Descrição da área de estudo

São avaliadas as principais bacias hidrográficas contidas no território brasileiro, além de duas com limites em outros países da América do Sul, as bacias do rio Madeira e do rio Paraná. São avaliadas as vazões das principais usinas hidrelétricas do país de maneira a contemplar todos os subsistemas de energia e regiões do Brasil.

Com isso, todas as características encontradas no país, no que diz respeito a tipos e usos dos solos, cobertura vegetal, características fisiográficas das bacias brasileiras, padrões de precipitação e de temperatura, diferenças nos consumos e na utilização da água, assim como os efeitos na geração de energia elétrica são incorporadas as simulações desse trabalho de forma a abranger todas as possibilidades e combinações destas.

A Figura 22 apresenta a divisão das bacias hidrográficas a serem avaliadas nesse projeto e o posicionamento destas no território brasileiro, observando-se que todas as regiões brasileiras serão analisadas e, com isso, espera-se que a variação do comportamento das mudanças climáticas projetadas pelos modelos possa ser captada no estudo. Além disso, são apresentadas a localização dos aproveitamentos hidrelétricos no interior de cada bacia. A lista das bacias hidrográficas e aproveitamentos hidrelétricos avaliados pode ser encontrada no ANEXO I.

Figura 22 Distribuição das bacias hidrográficas e aproveitamentos hidrelétricos avaliados.



5. RESULTADOS

5.1. Pré-processamento do MGB

A Figura 23 a Figura 25, apresentam as bacias de drenagem delimitadas a partir dos exutórios de três das mais importantes bacias, seja pelo número de aproveitamentos ou pela importância deles para o SIN, a saber, bacia do rio Paraná, do rio Tocantins e do rio Uruguai.

No geral, os exutórios são colocados como o último aproveitamento hidrelétrico das bacias de drenagem. Em alguns casos, foi necessário adicionar um ponto de exutório fictício para fins de fechamento adequado da área em estudo, como, por exemplo, as bacias do rio Madeira e do rio Uruguai. As demais delimitações podem ser observadas no ANEXO II.

São apresentadas também as sub-bacias delimitadas para as bacias de drenagem, o que configura uma subárea de avaliação pelo modelo MGB, na qual há a necessidade

de calibração dos parâmetros e para que as simulações de vazões sejam analisadas de maneira individualizada.

Além disso, há também o nível das minibacias que pode ser determinado a partir das confluências dos trechos de drenagem e na segmentação da rede de drenagem, no pré-processamento, completando assim os três níveis principais de discretização necessários para a utilização do MGB.

A Tabela 11 apresenta a área da bacia de drenagem definida, além do número de minibacias determinado conforme supracitado. A divisão em minibacias influencia diretamente o detalhamento das informações no MGB e, com isso, a velocidade das simulações do MGB, ou seja, quanto mais minibacias o modelo é discretizado, mais detalhes serão adicionados, resultando em mais tempo no processamento das informações e nas simulações.

Mesmo assim, não são simulações demoradas, levando alguns minutos para simular todo o histórico e um pouco mais para simular o futuro, sendo o tempo máximo de simulações para o período futuro entre 5 e 10 minutos.

Figura 23 Delimitação da bacia de drenagem e sub-bacias da bacia do rio Paraná

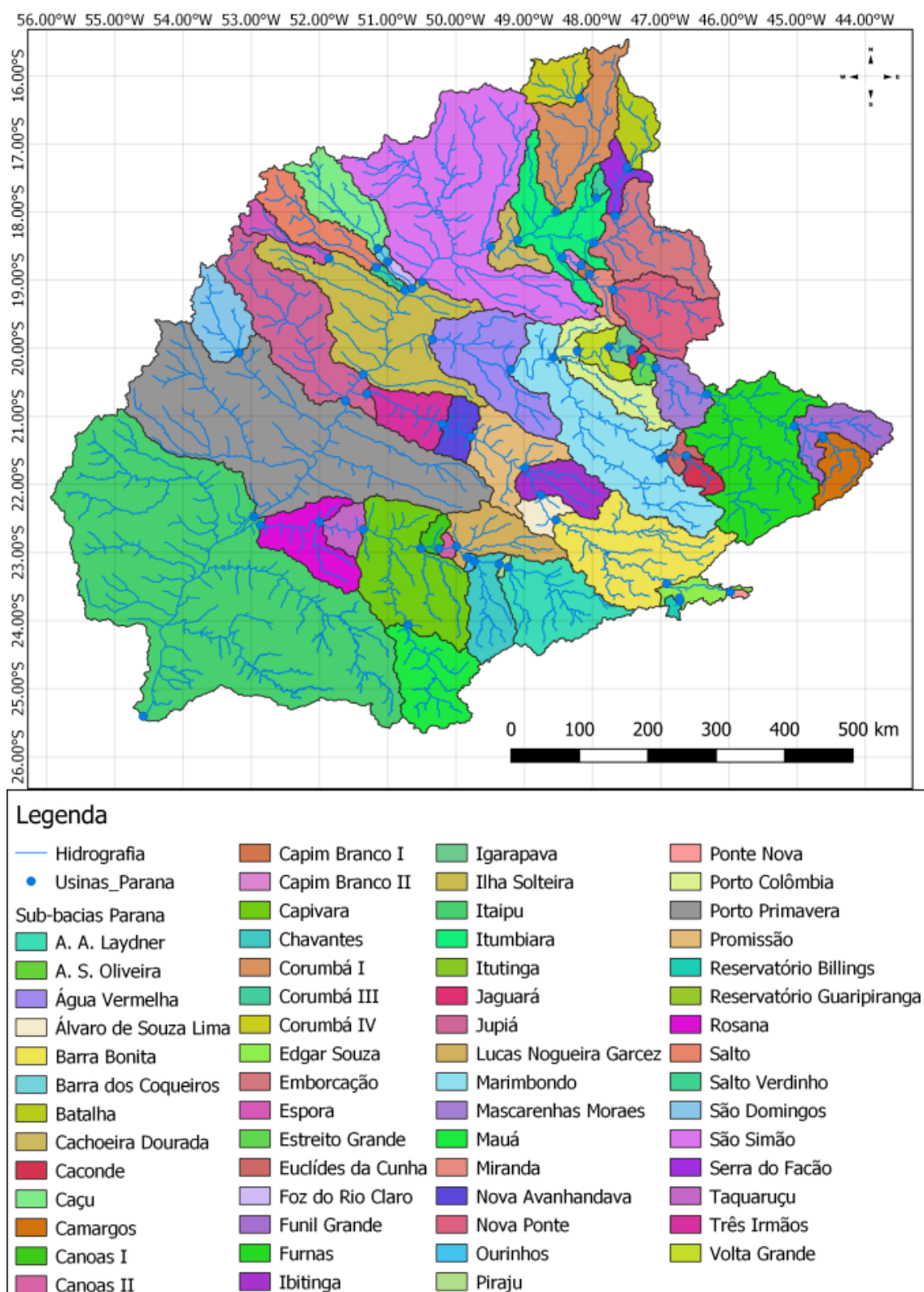


Figura 24 Delimitação da bacia de drenagem e sub-bacias da bacia dos rios Tocantins-Araguaia.

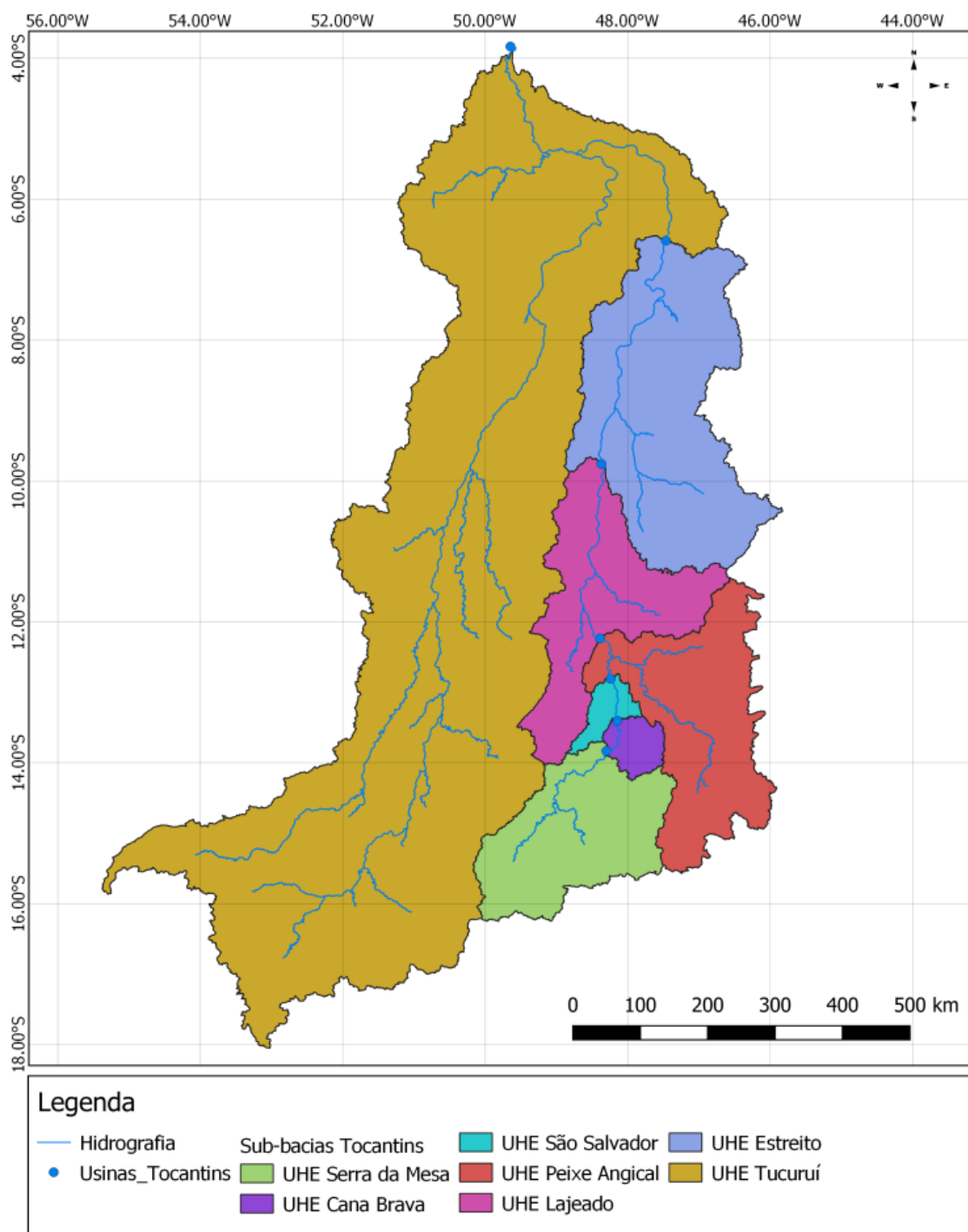


Figura 25 Delimitação da bacia de drenagem e sub-bacias da bacia do rio Uruguai.

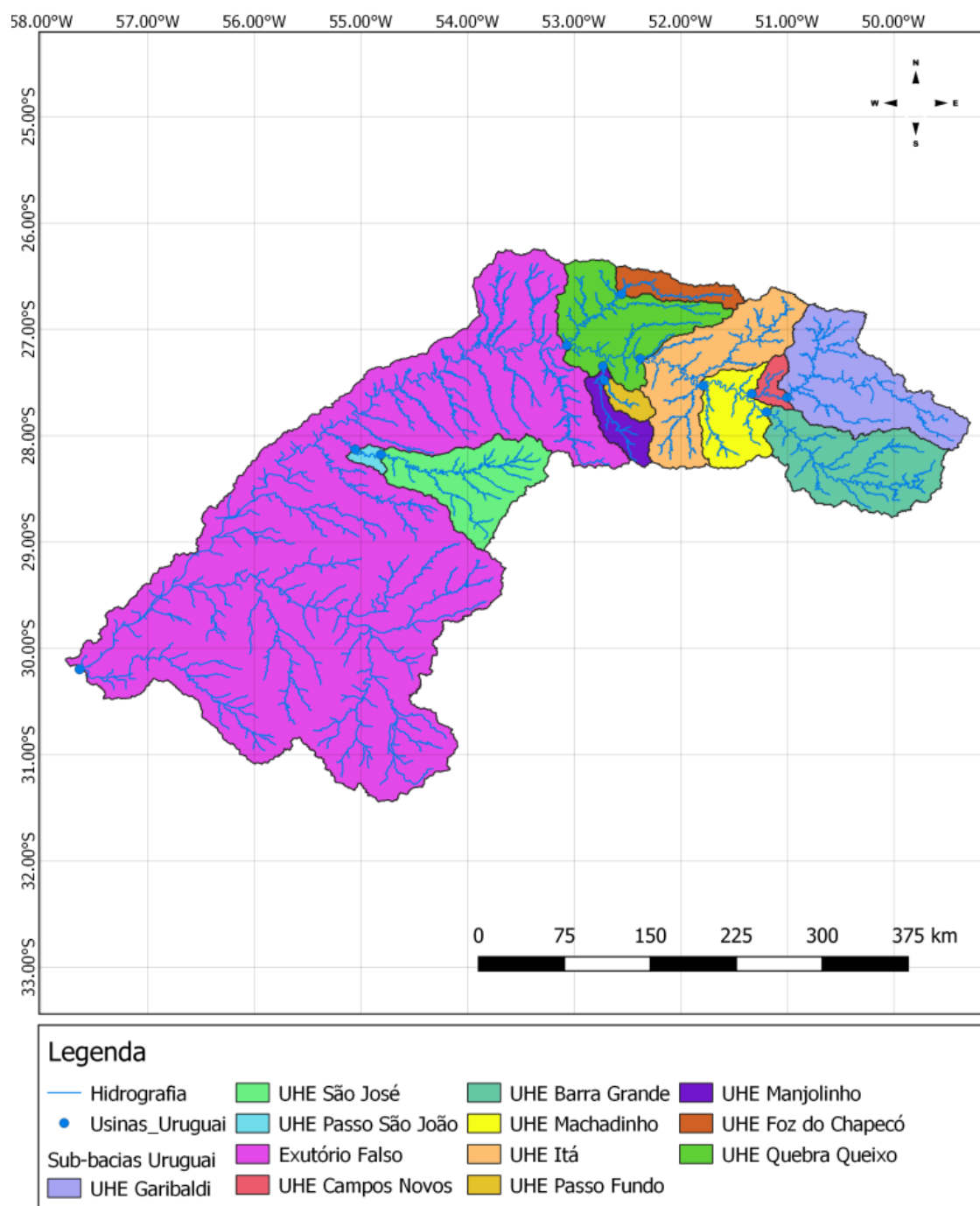


Tabela 11 - Área de drenagem e número de minibacias determinados no pré-processamento do MGB

Bacia Hidrográfica	Área de drenagem (km²)	Número de minibacias	Ranking área	Ranking minibacias
Araguari	31.658,9	547	15	16
Capivari	941,7	57	27	27
Correntes	3.968,5	93	24	23
Curuá-Una	16.603,5	173	17	20
Doce	73.689,6	2153	9	4
Iguaçu	63.745,9	930	11	11
Itabapoana	1.925,7	144	26	21

Itajaí	8.839,2	79	22	24
Itiquira	5.240,6	59	23	26
Jacuí	15.232,7	619	19	14
Jari	52.444,0	583	13	15
Jauru	2.322,8	67	25	25
Jequitinhonha	67.705,2	1957	10	5
Madeira	1.145.638,3	6232	1	1
Manso	9.791,7	137	21	22
Mucuri	15.371,2	175	18	19
Paraguaçu	55.582,1	1140	12	9
Paraíba do Sul	36.715,4	1031	14	10
Paraná	879.687,5	1376	2	8
Parnaíba	86.402,5	913	8	12
São Francisco	649.388,8	1722	4	7
Tapajós	92.828,7	1928	7	6
Taquari-Antas	14.841,8	509	20	17
Tocantins-Araguaia	755.692,7	6072	3	2
Uatumã	18.939,9	239	16	18
Uruguai	213.840,0	722	6	13
Xingu	457.735,1	3284	5	3

Fonte: Elaborado pelo autor

Da Tabela 11, verifica-se que as bacias hidrográficas com maior área possuem o maior número de minibacias. Isso se deve ao fato de que as maiores bacias possuem também maior número de aproveitamentos hidrelétricos e, também estes são os mais importantes para o SIN exigindo maior grau de detalhamento para que os resultados possam ser mais representativos.

Porém, existem algumas exceções, como a bacia hidrográfica do Xingu que está em 5º lugar no ranking de área com apenas uma usina hidrelétrica, a bacia do rio Madeira que está em 1º lugar no ranking de área e apenas 6 usinas (com 3 usinas relevantes) e, ainda, a bacia hidrográfica do rio Paraná com o maior número de usinas (60 aproveitamentos), segundo lugar no ranking de áreas, porém, ocupa apenas a 8ª posição no ranking de número de minibacias.

A importância do número de minibacias se dá pelo fato de que os cálculos realizados pelo modelo MGB são realizados nesse nível de discretização, portanto, quanto maior o número de minibacias, maior o nível de detalhamento das informações de entrada que é passado para o MGB, fazendo com que os resultados sejam mais precisos para cada uma das subáreas.

Os principais resultados das estatísticas de eficiência de ajuste da calibração, bem como os hidrogramas de vazões observadas e simuladas, que oferecem uma visão mais clara da capacidade do modelo de simular vazões quando são passadas as informações adequadas, podem ser apresentados no item seguinte.

5.2. Calibração do MGB para as 27 bacias hidrográficas

Na etapa de calibração do modelo MGB os valores iniciais dos parâmetros relacionados aos solos são alterados e otimizados. O processo de calibração consiste na definição dos parâmetros do modelo que melhor representarão as vazões da bacia. No MGB, existem dois conjuntos principais de parâmetros a serem definidos, os fixos e os calibráveis.

A calibração pode ser feita inicialmente de maneira manual, alterando os valores dos parâmetros calibráveis um a um e, observando os resultados nos hidrogramas e nas estatísticas, o que pode ser um processo demorado com a possibilidade de não se alcançar o melhor ajuste do modelo MGB. Porém, essa primeira etapa pode trazer melhorias imediatas, facilitando e agilizando a calibração automática.

A outra maneira de fazer a calibração é usando a rotina de calibração automática para a otimização dos parâmetros. Este processo utiliza algoritmos genéticos e busca o ponto de máximo global e não o máximo local (o que pode ocorrer no caso da calibração manual) para o conjunto de parâmetros a cada rodada da rotina, agilizando o processo e garantindo o melhor ajuste possível.

O processo de calibração pode ser mais demorado em alguns casos, foram deixados rodando durante as madrugadas por 10 horas ou mais, mas se os valores das estatísticas estiverem adequados, pode-se interromper o processo e utilizar o melhor conjunto de parâmetros.

Realizou-se a calibração utilizando-se dados de vazões diárias observadas e a chuva diária observada de 1970 a 2014, período definido como o histórico nesse estudo (mesmo período histórico das projeções climáticas do CMIP6).

Neste trabalho foram utilizados no processo de calibração do modelo MGB os dados diários de precipitação provenientes de estações pluviométricas do banco de dados Hidroweb (Figura 18). As informações de chuva são interpoladas para o centroide das minibacias obtidas no pré-processamento, pelo inverso do quadrado da distância. Ressalta-se a importância de se ter o mesmo número de dias de informações para os arquivos de chuva e vazão.

Foi realizada a calibração solidária, ou seja, apenas os parâmetros da primeira classe de URH participam do processo de otimização e o fator multiplicativo obtido no processo é aplicado nos parâmetros das demais classes.

Ou seja, ao invés de se buscar 35 valores de fatores, a rotina irá buscar por apenas 7 fatores multiplicativos de otimização (os 4 parâmetros referentes a primeira linha (W_m , b , K_{bas} , K_{int}) que são aplicados para as demais classes mais 3 parâmetros (CS , CI , CB)).

Embora seja possível realizar a calibração dos demais parâmetros (XL , CAP , W_c e $QB_M3/SKM2$) usualmente não é feita a calibração destes, sem que haja perda na qualidade do ajuste.

Figura 26 Valores iniciais adotados nos parâmetros calibráveis (Silva, 2007).

Watershed 1								
	uso	W_m	b	K_{bas}	K_{int}	XL	CAP	W_c
F_S_R		300.0	0.10	1.50	10.00	0.60	0.00	0.10
F_S_P		600.0	0.10	2.50	20.00	0.60	0.00	0.10
A_S_R		300.0	0.80	1.50	10.00	0.60	0.00	0.10
A_S_P		600.0	0.80	2.50	20.00	0.60	0.00	0.10
C_S_R		300.0	0.30	1.50	10.00	0.60	0.00	0.10
C_S_P		600.0	0.30	2.50	20.00	0.60	0.00	0.10
F_I_S_P		100.0	0.90	2.50	20.00	0.60	0.00	0.10
A_S_I		50.0	1.60	0.05	4.00	0.60	0.00	0.10
Agua		0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS		20.00						
CI		100.00						
CB		1000.00						
QB_M3/SKM2		0.0100						

Os parâmetros calibráveis do modelo foram ajustados para todas as sub-bacias estudadas, ou seja, para cada subárea que foi determinada pelo aproveitamento hidrelétrico no pré-processamento.

A Figura 27 apresenta um exemplo de parâmetros calibrados para a bacia hidrográfica dos rios Tocantins-Araguaia na bacia de drenagem respectiva a usina hidrelétrica Tucuruí.

Figura 27 Valores obtidas após a calibração para a sub-bacia respectiva a UHE Tucuruí.

Watershed 7								
	use	W_m	b	K_{bas}	K_{int}	XL	CAP	W_c
F_S_R		351.6	0.38	0.05	12.20	0.50	0.00	0.10
F_S_P		725.2	0.38	0.30	27.10	0.50	0.00	0.10
A_S_R		351.6	1.02	0.05	12.20	0.50	0.00	0.10
A_S_P		725.2	1.02	0.30	27.10	0.50	0.00	0.10
C_S_R		351.6	0.63	0.05	12.20	0.50	0.00	0.10
C_S_P		725.2	0.63	0.30	27.10	0.50	0.00	0.10
F_I_S_P		725.2	0.38	0.30	27.10	0.50	0.00	0.10
A_S_I		84.5	1.55	0.07	8.60	0.50	0.00	0.10
Agua		0.0	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
CS		14.15						
CI		68.10						
CB		5685.65						
QB_M3/SKM2		0.0010						

A qualidade da calibração pode ser analisada de acordo com os valores das estatísticas e de maneira visual com os hidrogramas de vazões observadas x simuladas. Nos gráficos da Figura 28 apresenta-se um resumo dos resultados das estatísticas de eficiência obtidas durante a calibração.

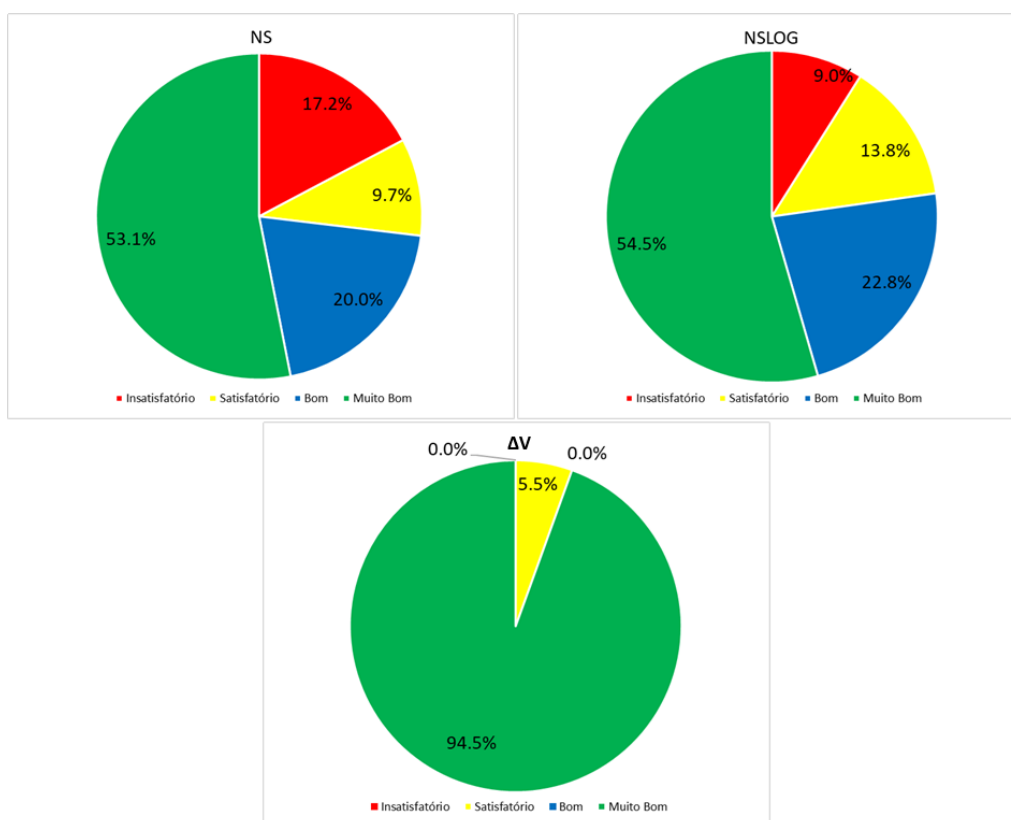
Ressalta-se que se utilizou a proposta de classificação feita por Mosiasi *et al.* (2012), conforme Tabela 2.

Para os ajustes obtidos nos 145 aproveitamentos considerando a estatística NS, um total de vinte e cinco casos foram enquadrados como insatisfatório ($NS \leq 0,4$), quatorze como satisfatório ($0,4 < NS \leq 0,6$), vinte e nove como bom ($0,6 < NS \leq 0,75$) e setenta e sete como muito bom ($NS > 0,75$).

Para os ajustes analisando a estatística NSLOG, um total de treze casos classificados como insatisfatórios, vinte casos classificados como satisfatórios, trinta e três como bons ajustes e setenta e nove casos de ajustes enquadrados como muito bons.

Por fim, analisando os resultados obtidos na estatística ΔV , do total de cento e quarenta e cinco aproveitamentos nenhum foi enquadrado como insatisfatório ou bom, oito casos como ajuste satisfatório e cento e trinta e sete ajustes enquadrados como muito bons.

Figura 28 Resumo das estatísticas de calibração obtidas para as 27 bacias hidrográficas avaliadas.



Nas Figura 29 a Figura 30 são apresentados mapas com o posicionamento das usinas no Brasil e nas bacias de drenagem, além da representação em cores, com as faixas de valores da classificação da qualidade da calibração feita da adaptação da tabela proposta por Moriasi *et al.* (2015).

Figura 29 Resultados da estatística Nash Sutcliffe (NS) para todos os aproveitamentos hidrelétricos.

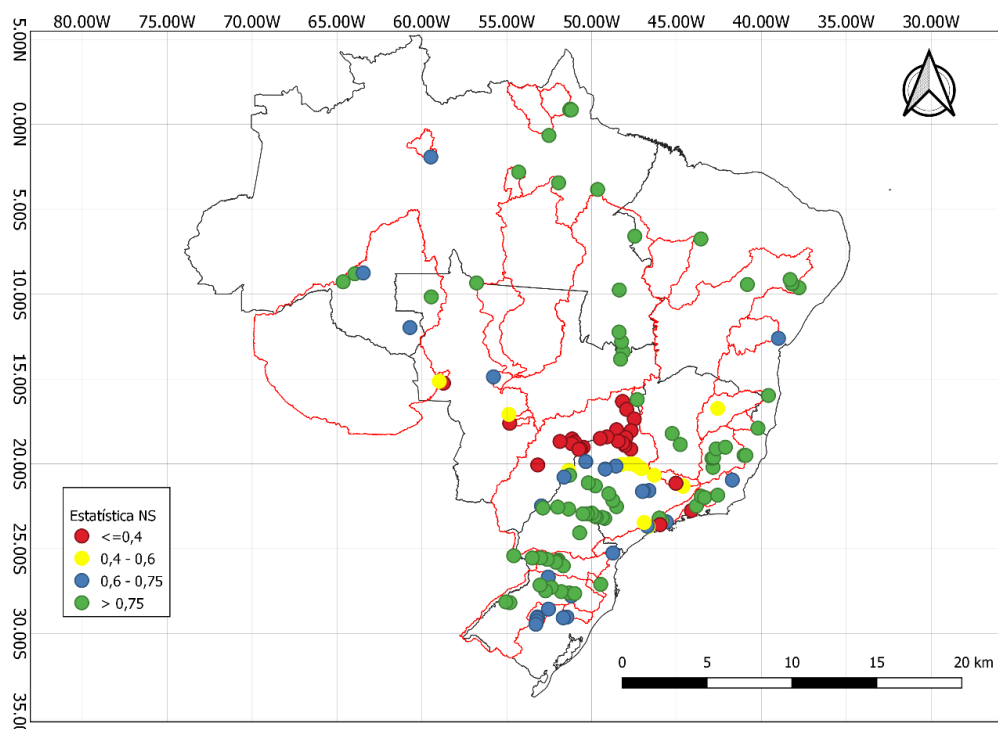


Figura 30 Resultados da estatística NSLOG para todos os aproveitamentos hidrelétricos analisados.

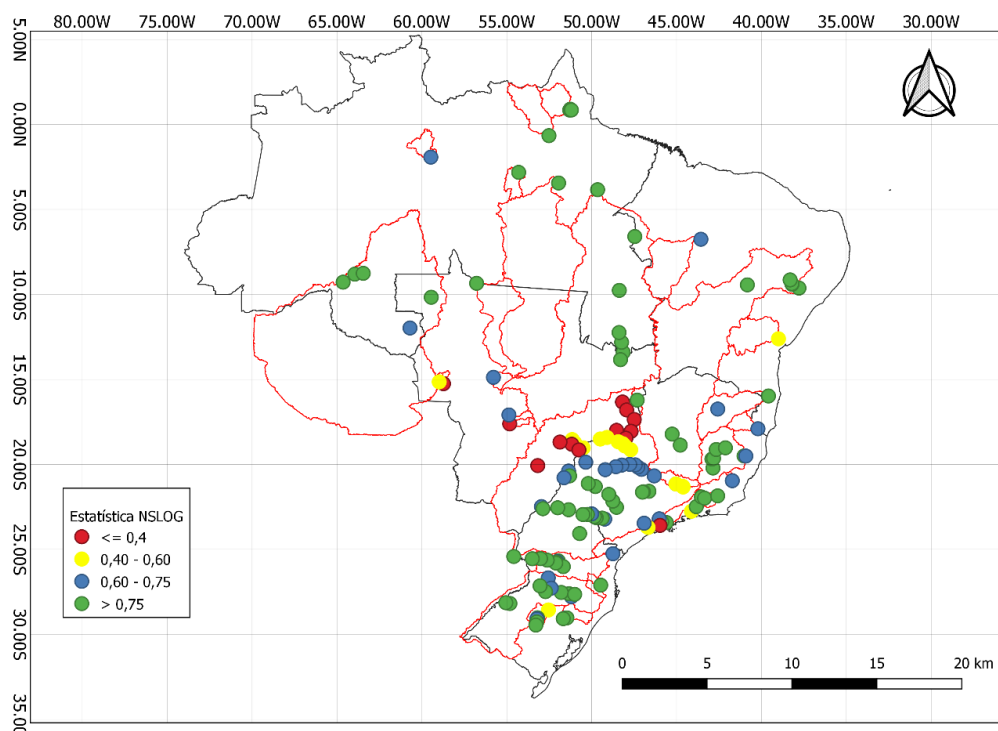
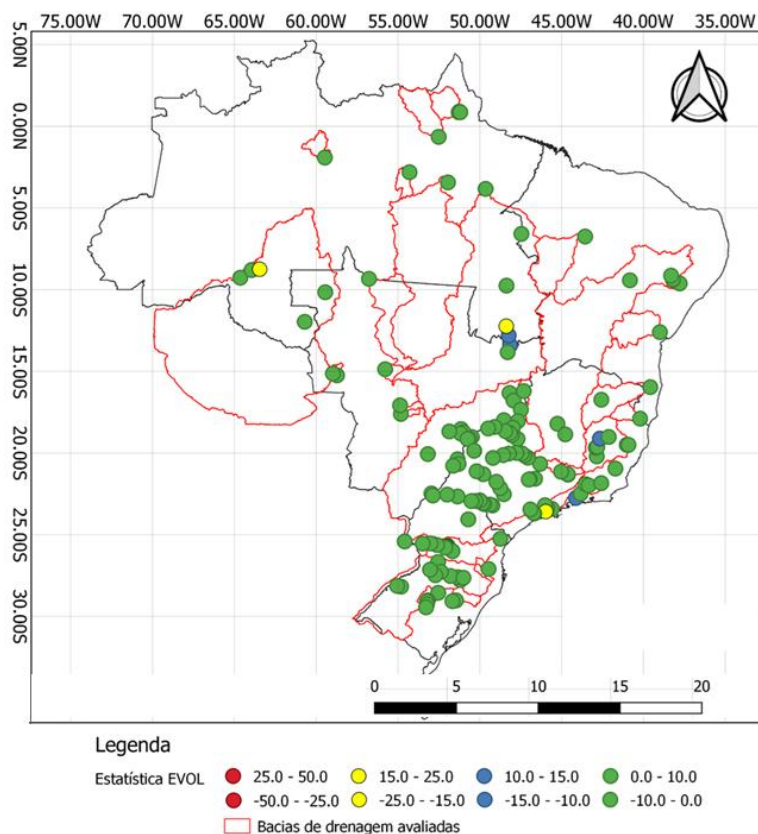


Figura 31 Resultados da estatística EVOL para todos os aproveitamentos hidrelétricos analisados.



Analisando os resultados da estatística NS que está associada com as vazões máximas, ou seja, os picos dos hidrogramas, o que se configura como uma deficiência da maioria dos modelos hidrológicos, observa-se que os ajustes considerados como insatisfatórios na maior parte estão nas sub-bacias de cabeceiras com pequenas bacias de drenagem do rio Paraná, ou seja, dez ajustes do total de doze.

São também em bacias de pequeno porte, o que se configura como outra dificuldade do modelo MGB, que por concepção foi desenvolvido para bacias maiores.

Os ajustes ruins também estão localizados na sub-bacia do rio Paranaíba, ou seja, na porção norte da bacia do rio Paraná. Porém, esses problemas não ocorrem nas usinas da bacia hidrográfica, que estão localizadas nas sub-bacias dos rios Grande, Paraná e Paranapanema.

Outros ajustes enquadrados como insatisfatórios estão nas bacias dos rios Correntes e Jauru, que possuem pequenas áreas de drenagem e, conforme mencionado, caracteriza uma dificuldade do modelo MGB.

Os enquadramentos como satisfatórios estão em grande parte na bacia do Paraná ainda com o maior número na sub-bacia do rio Paranaíba e alguns casos na bacia do rio Grande na região de cabeceira da sub-bacia. Também há ocorrências de ajustes

satisfatórios na bacia dos rios Madeira na região norte do país e Paraíba do Sul na região sudeste.

Os demais ajustes foram classificados como bons ou muito bons, portanto, embora tenham ocorrido algumas exceções, conforme mencionado anteriormente, analisando a estatística NS pode-se considerar que a calibração foi realizada de maneira adequada para todas as bacias de drenagem avaliadas.

Analisando agora isoladamente os resultados pela estatística NSLOG, que está associado as vazões de base e intermediárias dos hidrogramas, existiram poucas ocorrências de ajustes classificado como insatisfatórios.

Sendo quatro deles na bacia hidrográfica do rio Paraná também na sub-bacia do rio Paranaíba, com predominância de bacias de cabeceiras e apenas uma na bacia do rio Correntes que possui pequena área de drenagem, respectiva a UHE Ponte de Pedra, e esta possui menor relevância para o SIN.

O enquadramento do ajuste da calibração como satisfatório ocorreu principalmente na bacia do Paraná nas sub-bacia do rio Paranaíba, assim como na estatística NS, mas também na sub-bacia do Tietê, com outros casos nas bacias dos rios Jauru (UHE Jauru), Madeira (UHE Guaporé) e Paraguaçu (UHE Pedra do Cavalo).

Os demais ajustes foram considerados bons e muito bons de acordo com a classificação adaptada de Moriasi *et al.* (2015). Portanto, pode-se considerar que a calibração foi adequada para todas as bacias hidrográficas e aproveitamentos hidrelétricos analisados.

Finalmente, analisando a estatística EVOL, que avalia a diferença entre os volumes observados e os simulados pelo MGB, apenas 4 foram enquadrados como satisfatórios nas bacias dos rios Iguaçu (UHE Fundão), Madeira (UHE Samuel), Paraná (UHE Ponte Nova) e Tocantins-Araguaia (UHE Peixe Angical).

Os demais ajustes considerando apenas a estatística EVOL, foram enquadrados como muito bons, portanto, pode-se considerar que a calibração foi adequada para todas bacias e usinas analisadas.

Foram escolhidas cinco bacias hidrográficas para apresentar os resultados das estatísticas de maneira mais detalhada. Portanto, nas Figura 32 a Figura 36, são apresentados os resultados das estatísticas das usinas das bacias dos rios Doce (sudeste), Madeira (norte), Paraná (sudeste e parte no centro-oeste), São Francisco (nordeste) e Uruguai (sul), contemplando as cinco regiões do Brasil.

A escolha dessas bacias hidrográficas se deu devido a importância dos aproveitamentos contidos nessas bacias e como mencionado para que a diversificação das características expressas nas cinco regiões do país fosse analisada.

Portanto, a partir desse ponto, os resultados apresentados serão respectivos a essa seleção, a não ser que se julgue necessário destacar algum outro resultado de outra bacia com relevância para o SIN.

Figura 32 Destaques das estatísticas da bacia hidrográfica do rio Doce.

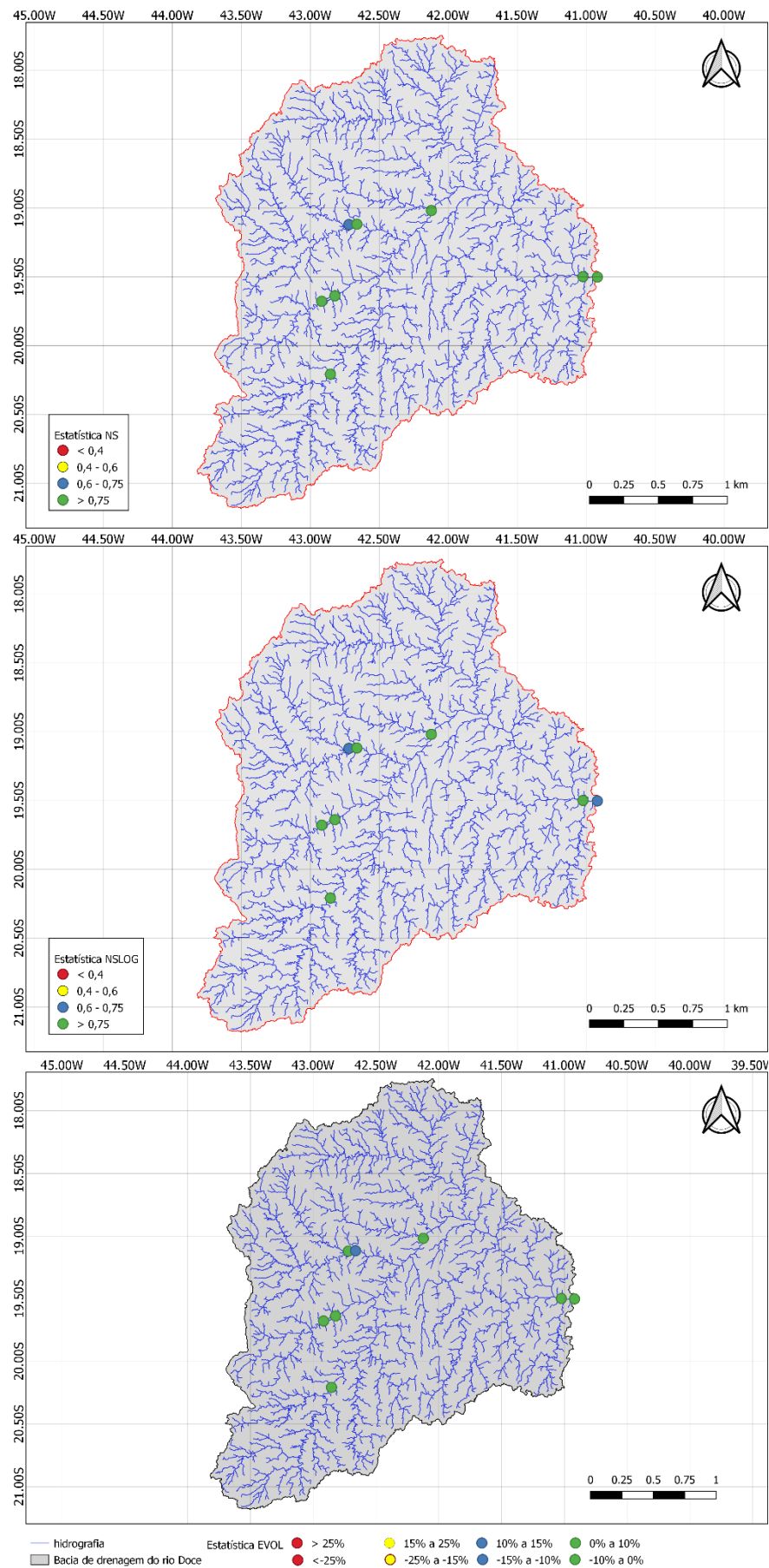


Figura 33 Destaques das estatísticas da bacia hidrográfica do rio Madeira.

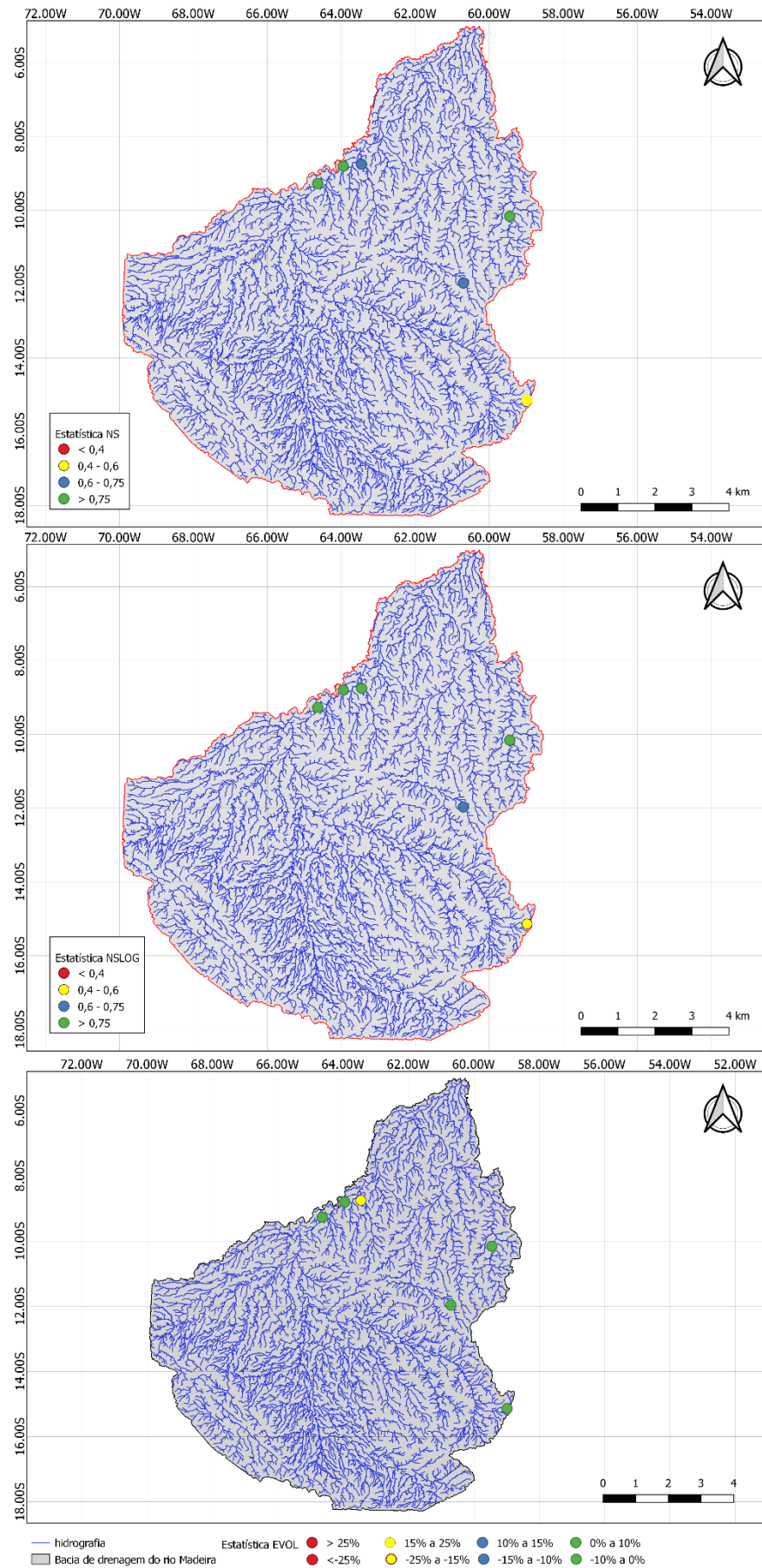


Figura 34 Destaques das estatísticas da bacia hidrográfica do rio Paraná.

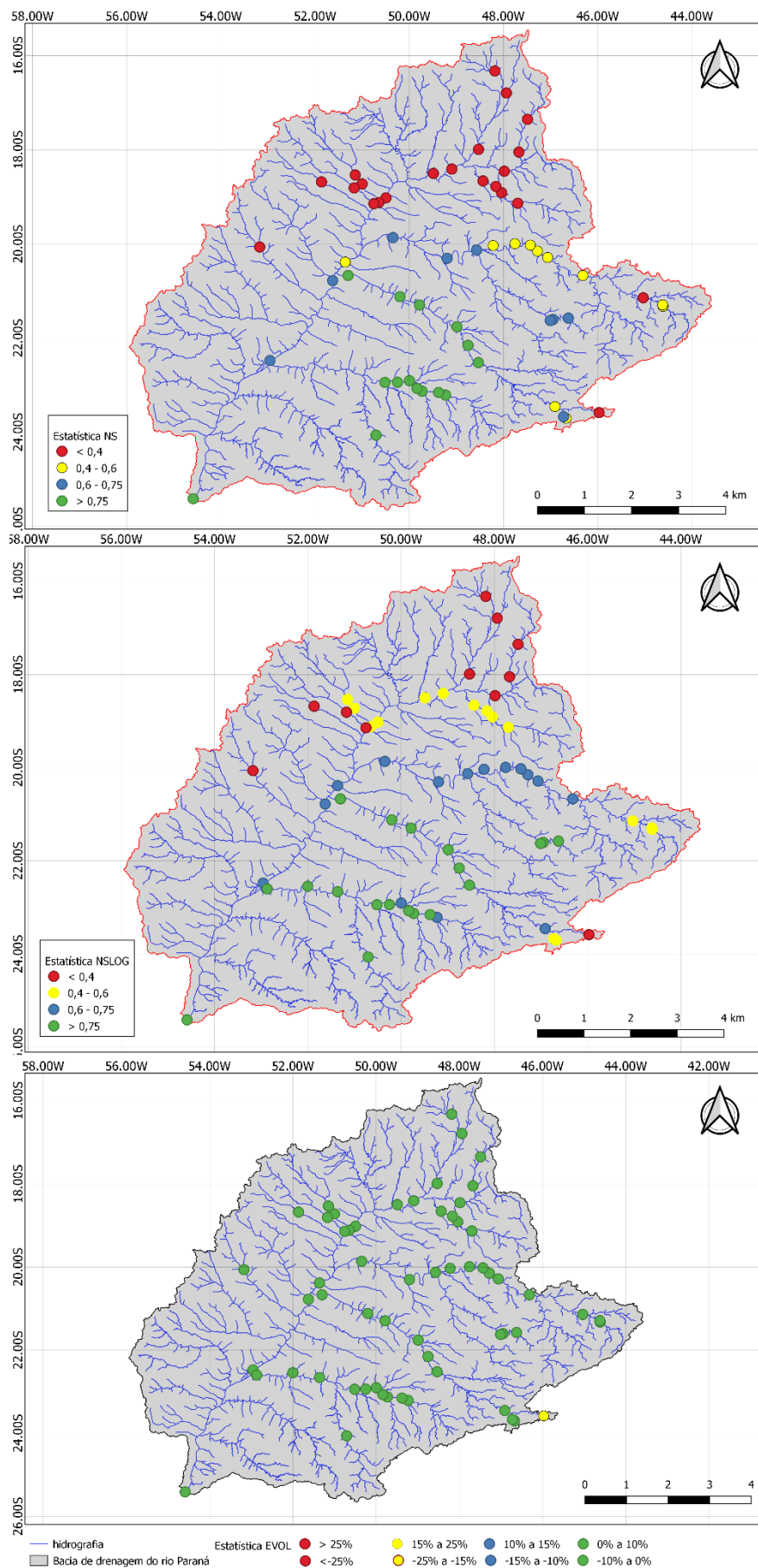


Figura 35 Destaques das estatísticas da bacia hidrográfica do rio São Francisco

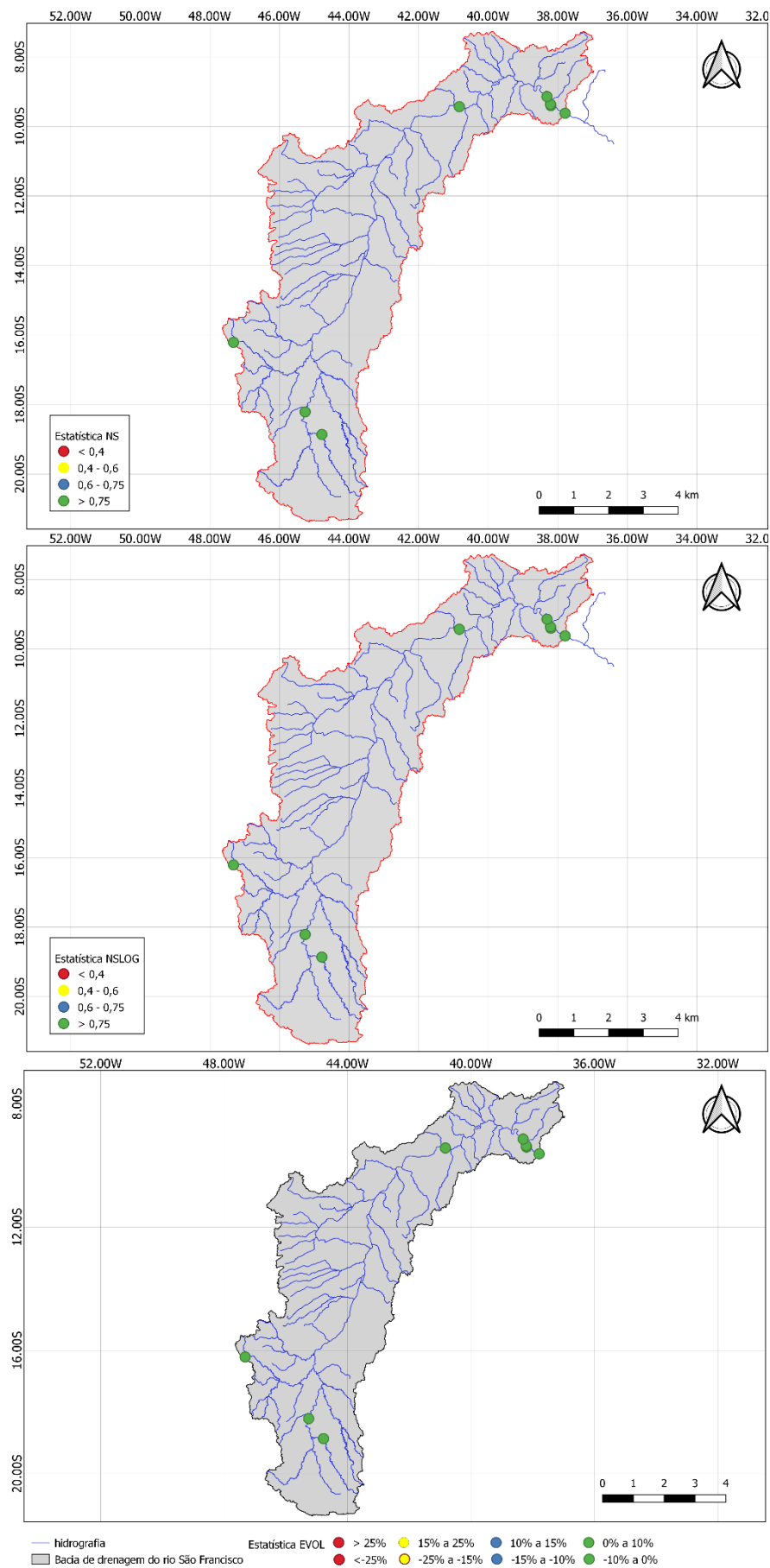
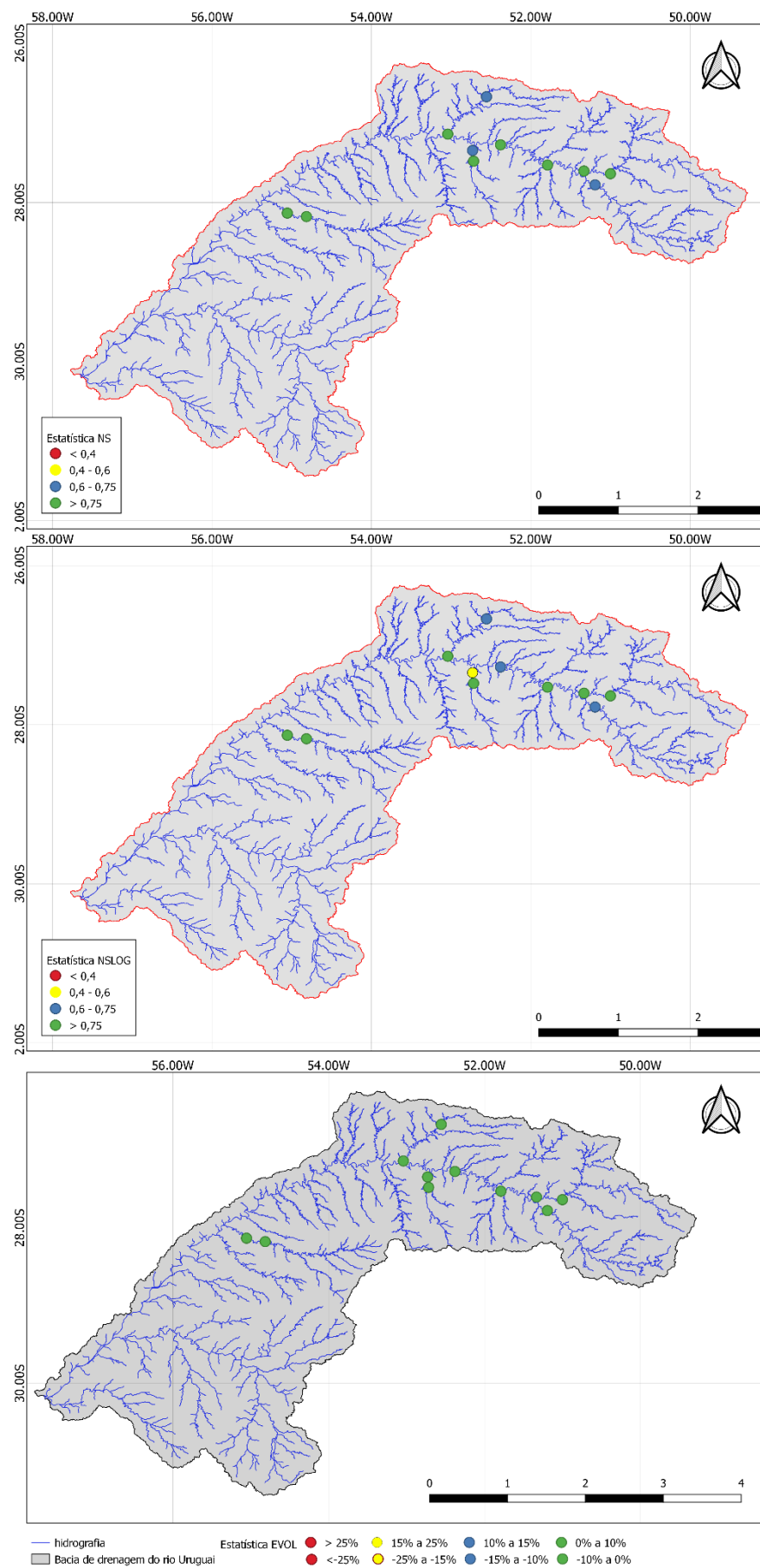


Figura 36 Destaques das estatísticas da bacia hidrográfica do rio Uruguai.



Outra maneira de se analisar os resultados das calibrações do MGB é a partir dos hidrogramas observados x simulados. Nesses gráficos ficam evidenciados os bons ajustes obtidos pela observação do formato dos hidrogramas, pela aderência obtida entre as vazões observadas e simuladas pelo MGB e pela representação dos valores extremos, picos e vales dos hidrogramas, também das vazões intermediárias, e, além disso, a recessão, que é a maneira que as vazões descem após um evento de cheia.

Nas Figura 37 a Figura 41 apresentam os hidrogramas de vazões observadas e vazões simuladas pelo modelo para o período histórico, após o a realização da calibração.

Figura 37 Hidrogramas de vazões observadas x simuladas da UHE Aimorés (Bacia do rio Doce).

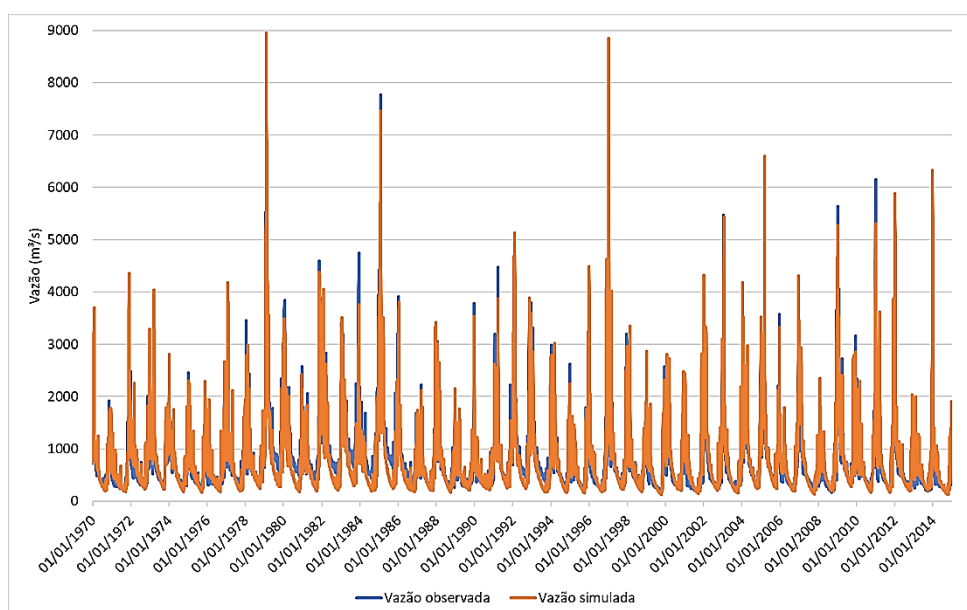


Figura 38 Hidrogramas de vazões observadas x simuladas da UHE Jirau (BH do rio Madeira).

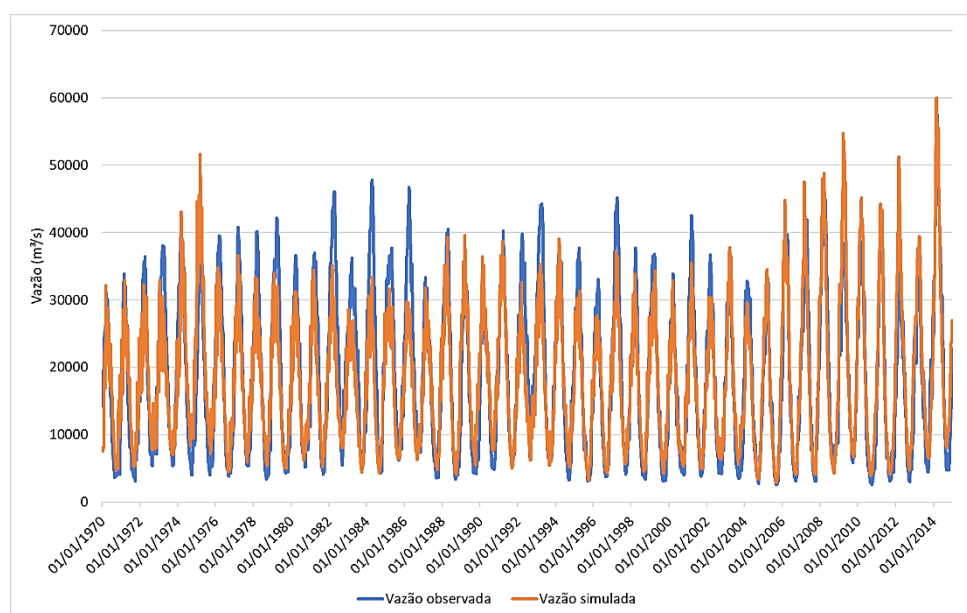


Figura 39 Hidrogramas de vazões observadas x simuladas da UHE Itaipú (BH do rio Paraná).

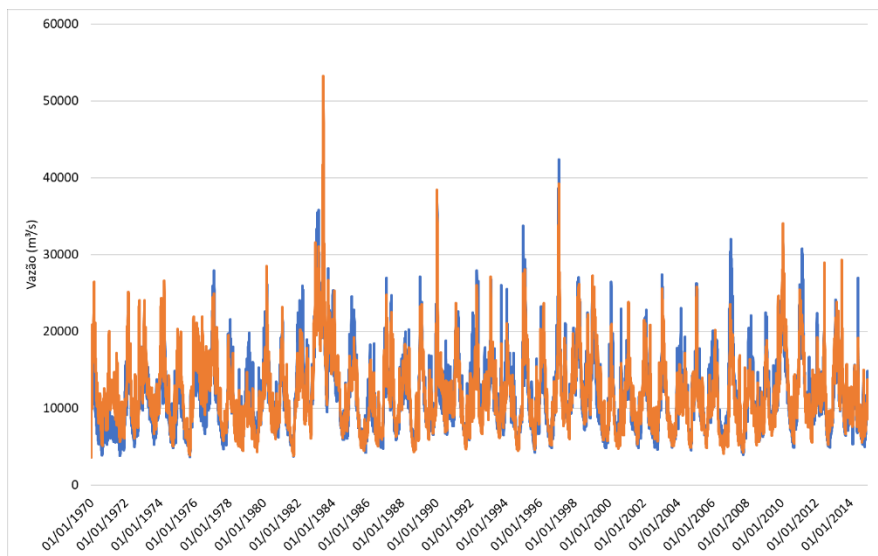


Figura 40 Hidrogramas de vazões observadas x simuladas da UHE Sobradinho (BH São Francisco).

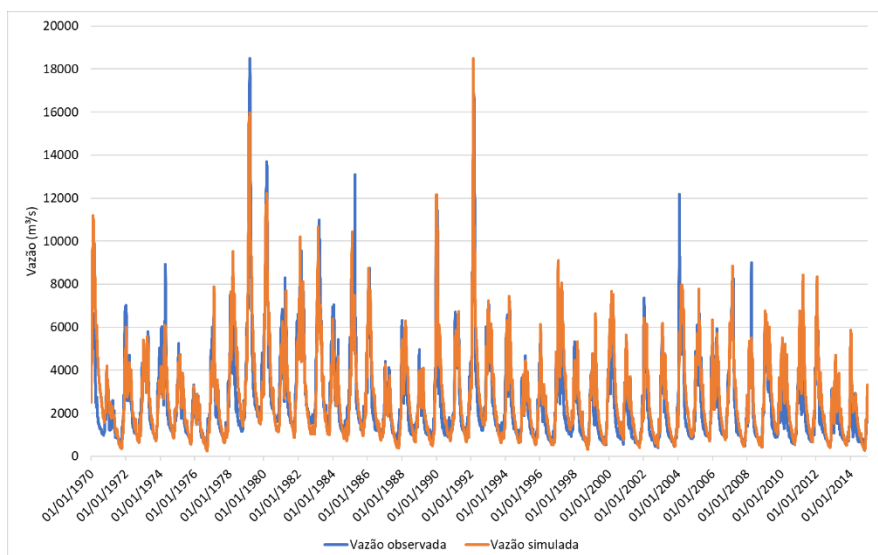
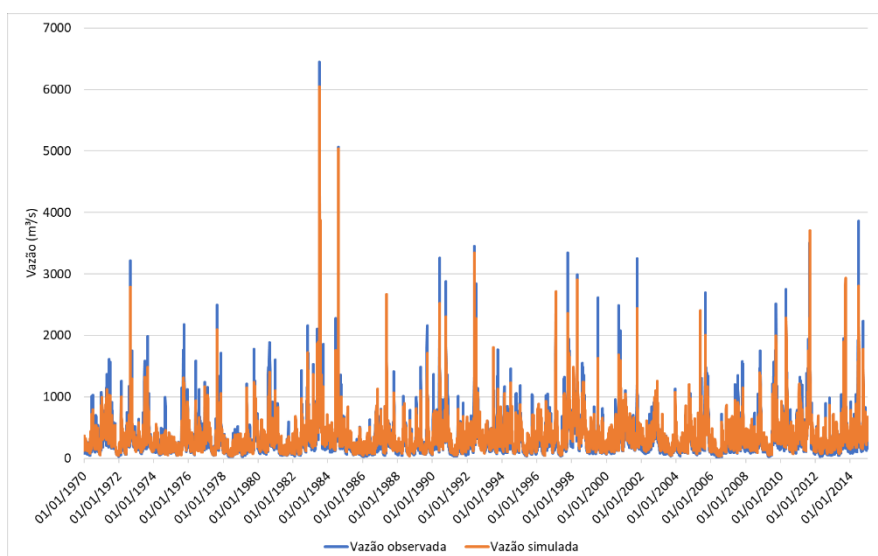


Figura 41 Hidrogramas de vazões observadas x simuladas da UHE Garibaldi (BH do rio Uruguai)



Analisando os 145 hidrogramas de vazões observadas x vazões simuladas, verifica-se o mesmo comportamento encontrado nos hidrogramas das **Erro! Fonte de referência não encontrada. a Erro! Fonte de referência não encontrada..** No geral o formato está sendo muito bem representado, não se verificando defasagem temporal entre os picos e vales dos hidrogramas.

A recessão dos hidrogramas também são bastante semelhantes para a maioria dos hidrogramas, as vazões de base e vazões intermediárias são muito bem representadas pelo modelo MGB.

Os principais problemas verificados são para representação da magnitude das vazões máximas, na maioria dos casos os picos são subestimados pelo modelo MGB como por exemplo na UHE Candonga na bacia do rio Doce, Rondon II na bacia do rio Madeira, UHE Ilha Solteira na bacia do Paraná.

A diferença se evidencia principalmente nos maiores valores de vazão, ou seja, os maiores picos, em especial aqueles em que ocorrem repentinamente e são muitos maiores que os demais valores das séries como nos casos da UHE Retiro Baixo na bacia hidrográfica do rio São Francisco e nas UHEs São José e Passo São José na bacia do rio Uruguai.

Porém, assim como na análise das estatísticas alguns pontos de atenção foram mencionados, e, mesmo assim considerou-se que a calibração foi realizada de maneira bastante satisfatória, pela análise global do comportamento dos hidrogramas com o ajuste do formato, com grande aderência nos valores das vazões de base e das vazões intermediárias, assim como o comportamento da recessão dos hidrogramas e ainda pela ausência de defasagem temporal, considera-se que a calibração foi realizada de maneira adequada para os fins desse trabalho.

Como no trabalho busca-se verificar as variações das vazões do futuro em relação ao passado e, conseqüentemente, os efeitos na geração de usinas hidrelétricas e não os valores exatos que as vazões assumirão no futuro, pode-se supor que os mesmos desvios que foram observados no período histórico serão observados no período futuro não acarretando perda de qualidade nas análises realizadas com os ajustes no processo de calibração. Portanto, novamente conclui-se que a calibração foi realizada de maneira bastante satisfatória para os objetivos da tese.

5.3. Verificação de ajuste das simulações com o MGB alimentado pelos modelos climáticos do NEX-GDDP.

Pode-se realizar uma breve verificação do ajuste das simulações do MGB sendo alimentado com a chuva dos modelos climáticos do NEX-GDDP.

Trata-se de uma verificação devido ao fato de que o modelo MGB não utilizou as séries temporais de chuvas diárias dos modelos climáticos no processo de calibração (usada a chuva observada de estações da ANA).

No trabalho propõe-se realizar essa análise a partir das médias mensais do período histórico das vazões simuladas pelo MGB utilizando a chuva observada em comparação com as vazões simuladas com o MGB utilizando as chuvas dos cinco modelos climáticos do NEX-GDDP.

Consiste em calcular a climatologia das vazões, ou seja, calcular a média de vazão para todos os meses de janeiro, todos os meses de fevereiro, assim por diante até dezembro, das simulações de vazões para o período histórico com o MGB utilizando as chuvas observadas e chuvas dos modelos climáticos.

Nas Figura 42 e Figura 43 pode-se apresentar alguns dos principais resultados da verificação do ajuste, para algumas das principais bacias hidrográficas e aproveitamentos mais relevantes.

No geral, foi feita uma análise visual dos gráficos de climatologia, observando-se a aderência entre simulações com chuva observada x chuva modelos climáticos.

A princípio optou-se por não realizar nenhuma análise estatística, pelo fato de que as variáveis dos modelos já receberam tratamento para esse tipo de correção.

A partir dessa análise pode-se inferir que se a chuva dos modelos climáticos está adequada para as simulações com o MGB para o período histórico, mesmo que estas não tenham sido utilizadas na calibração, estas também serão suficientemente adequadas para as simulações para o período futuro, sem que haja perdas significativas na qualidade das análises da tese.

Tendo sempre o objetivo de análise de variação e não de valores exatos, como uma justificativa válida para se assumir que os problemas estão presentes, mas não limitam as análises desejadas.

Figura 42 Climatologia de vazões das Usinas Hidrelétricas: Sá Carvalho (Doce), Promissão (Paraná), Três Marias (São Francisco).

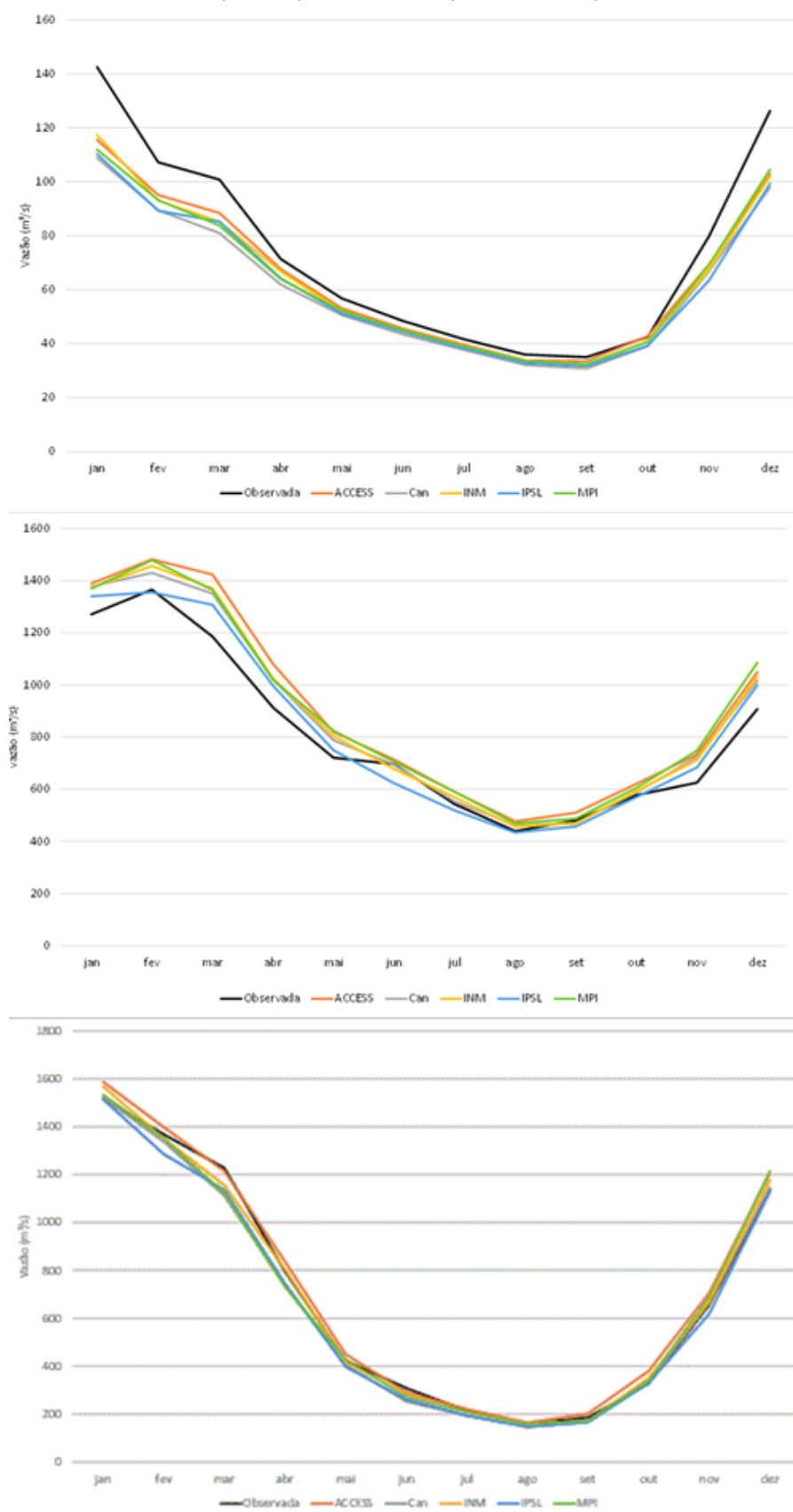
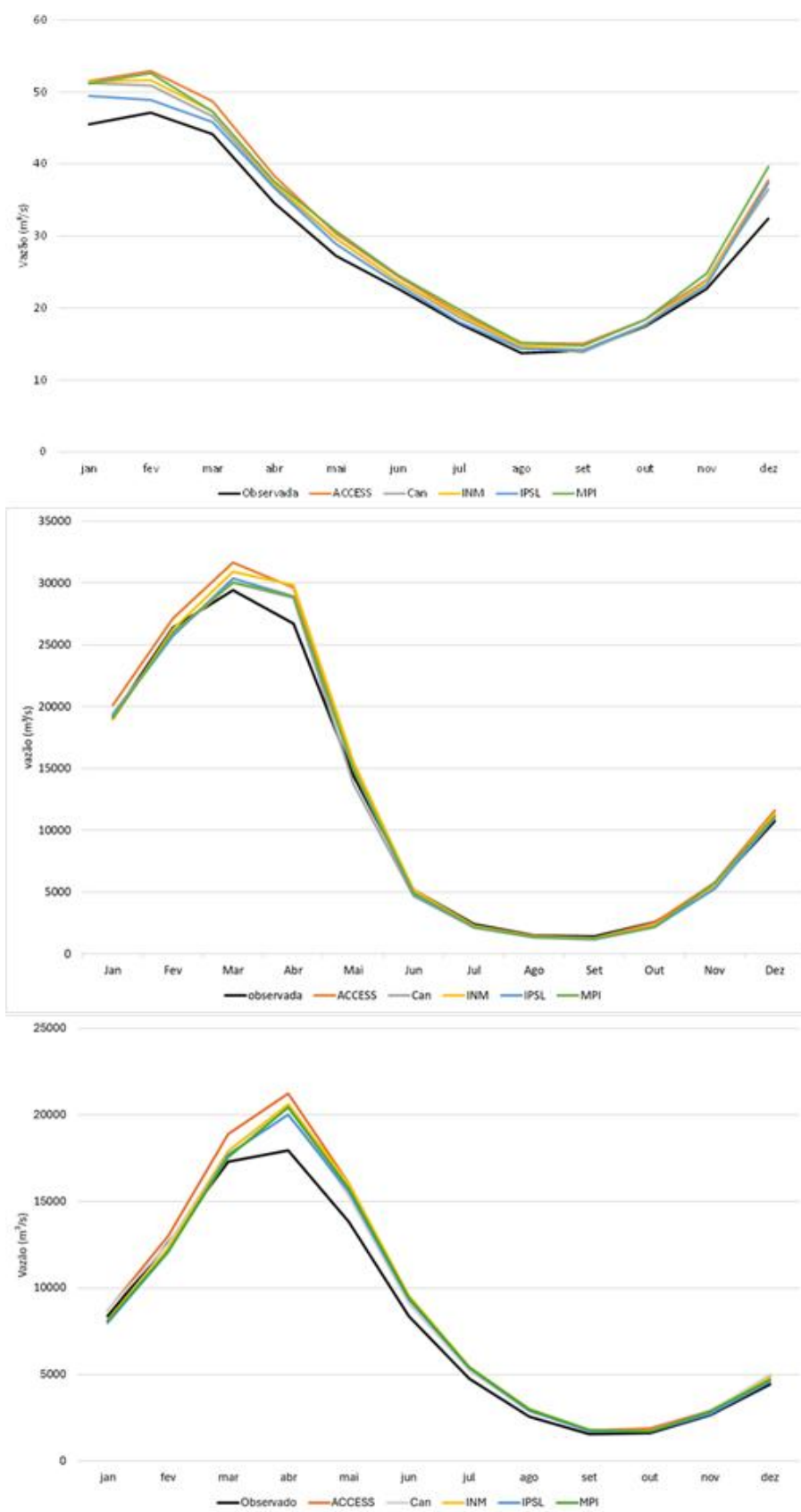


Figura 43 Climatologia de vazões das Usinas Hidrelétricas: Jaguari (Paraíba do Sul), Tucuruí (Tocantins), Pimental (Xingu).



Pelos gráficos das Figura 42 e Figura 43, observa-se que as vazões simuladas com a chuva observada e com a chuva dos modelos climáticos do NEX-GDDP apresentam bastante semelhança quanto a forma dos hidrogramas, um dos fatores mais importantes para a análise de ajuste das simulações.

Esperava-se que nos meses do período úmido no SE e NE (normalmente de dezembro a abril), para as simulações com a chuva observada fosse o mesmo para as vazões simuladas com as chuvas dos modelos climáticos o mesmo para o período mais seco (usualmente de maio a novembro).

Observa-se pelas figuras que os períodos úmidos e secos variam de acordo com a região em que está localizado o aproveitamento hidrelétrico, como o caso da região sul que apresenta a chuva mais distribuída durante todo o ano, portanto, o comportamento da climatologia se torna diferente. O importante é que no geral, o comportamento das simulações para uma dada bacia e seus aproveitamentos seja o mesmo como verificado nos gráficos.

Observa-se também que os maiores desvios, ou seja, menor aderência entre a climatologia das vazões simuladas com a chuva observada e dos modelos, se encontra em períodos úmidos, onde ocorre o maior descolamento das curvas, o que é algo comum de se observar nesse tipo de análise, principalmente se levar em consideração que os principais problemas de ajuste do modelo está em simular os valores extremos máximos.

Outra conclusão das figuras é que as climatologias para os meses mais secos e intermediários apresentam grande aderência entre as curvas e com pequena variabilidade entre as simulações com a chuva dos modelos climáticos.

Existem alguns casos em que as climatologias se apresentaram mais variáveis, tanto para períodos mais secos quanto para mais úmidos, ou seja, as curvas das simulações com as chuvas dos modelos climáticos não ficaram tão coincidentes quanto nas Figura 42 e Figura 43.

Outra informação que se pode retirar da análise é que no geral os modelos ACCESS e INM são os que apresentam maiores valores de chuva para o período histórico, os modelos IPSL e CanESM apresentam os menores valores de chuva e o modelo MPI com valores intermediários. Embora existam alguns casos em que essa lógica não se concretiza, a depender da região do país.

Conclui-se da análise visual das climatologias que embora existam algumas diferenças nas simulações com a chuva observada e com as chuvas dos modelos

climáticos do NEX-GDDP, que estas não são significantes a ponto de se tornar necessário realizar alguma correção na calibração do MGB.

Assim sendo, os dados de precipitação dos modelos climáticos são adequados tanto para a simulações do período histórico (1970 a 2014), quanto para o período futuro (2015 a 2100) sem que haja perdas significantes na qualidade das análises.

5.4. Projeções climáticas do NEX-GDDP

As variáveis utilizadas pelo modelo MGB e encontradas nas projeções climáticas são a precipitação, temperatura média, velocidade do vento, umidade atmosférica e radiação solar.

Para parametrizar as variáveis climáticas no modelo MGB, foram analisadas as variações do período futuro em relação ao período histórico, técnica chamada de *delta change* desenvolvida por Hay, Wilby e Leavesley (2000), conforme Equação 14 aplicada em escala mensal, para a temperatura, velocidade do vento, umidade e radiação.

Após calculadas as variações são aplicadas ao arquivo de médias climáticas, conforme Equação 15, adicionando o efeito das mudanças climáticas as projeções de vazões do MGB.

$$\Delta C = \frac{\bar{F}}{\bar{H}} \quad \text{Equação (15)}$$

Onde:

ΔC = Variação média do período futuro em relação ao período histórico

$\bar{F}$ = Média da variável analisada para o período futuro

$\bar{H}$ = Média da variável analisada para o período histórico.

$$\bar{F}_m = \Delta C * \bar{H}_m \quad \text{Equação (16)}$$

Onde:

$\bar{F}_m$ = Climatologia média mensal da variável analisada para o período futuro

$\bar{H}_M$ = Média mensal da variável analisada para o período histórico

ΔC = Variação média do período futuro em relação ao período histórico.

No caso da precipitação foram utilizados os valores diários das projeções fornecidos e aplicado processo semelhante ao realizado para os dados observados de chuva, ou seja, as informações de chuva contidas nos pontos de grade dos modelos

climáticos foram interpoladas para o centroide de cada minibacia obtida no pré-processamento, assim, espacializando a informação e adequando a proposta do modelo, de ser distribuído.

Foram analisadas as projeções de cinco modelos climáticos do NEX-GDD conforme mencionado. Portanto, para cada modelo foram criados dois arquivos novos de variáveis climáticas para as projeções do período futuro, ou seja, um para o cenário SSP2-4.5 e outro para o cenário SSP5-8.5.

Para as variáveis climáticas, o período futuro não foi dividido em dois conforme as análises de vazões e energética (2015-2060 e 2061-2100), com isso, o mesmo arquivo de médias climáticas foi utilizado para as projeções de vazões dos dois períodos.

Como a temperatura média e a evapotranspiração potencial foram utilizadas para inserir os efeitos das mudanças climáticas, a seguir são apresentados os comportamentos destas para o período futuro (2015-2100).

Na Figura 44 são apresentadas respectivamente as projeções de temperatura e da evapotranspiração dos cinco modelos climáticos analisados em termos médios anuais, para as bacias do rio Doce e Madeira.

Na Figura 45 são apresentadas as variações das variáveis para as bacias do Paraná e São Francisco.

Destacando-se que a evapotranspiração é calculada em função da temperatura, então, os comportamentos são bastante semelhantes entre os gráficos das duas variáveis para uma mesma bacia. Ambas são utilizadas posteriormente no cálculo do fator de correção de consumo, para incorporar os efeitos de mudanças climáticas nas projeções de usos consuntivos da água.

Figura 44 Projeções das variações médias anuais da temperatura e da evapotranspiração para as bacias dos rios Doce e Madeira.

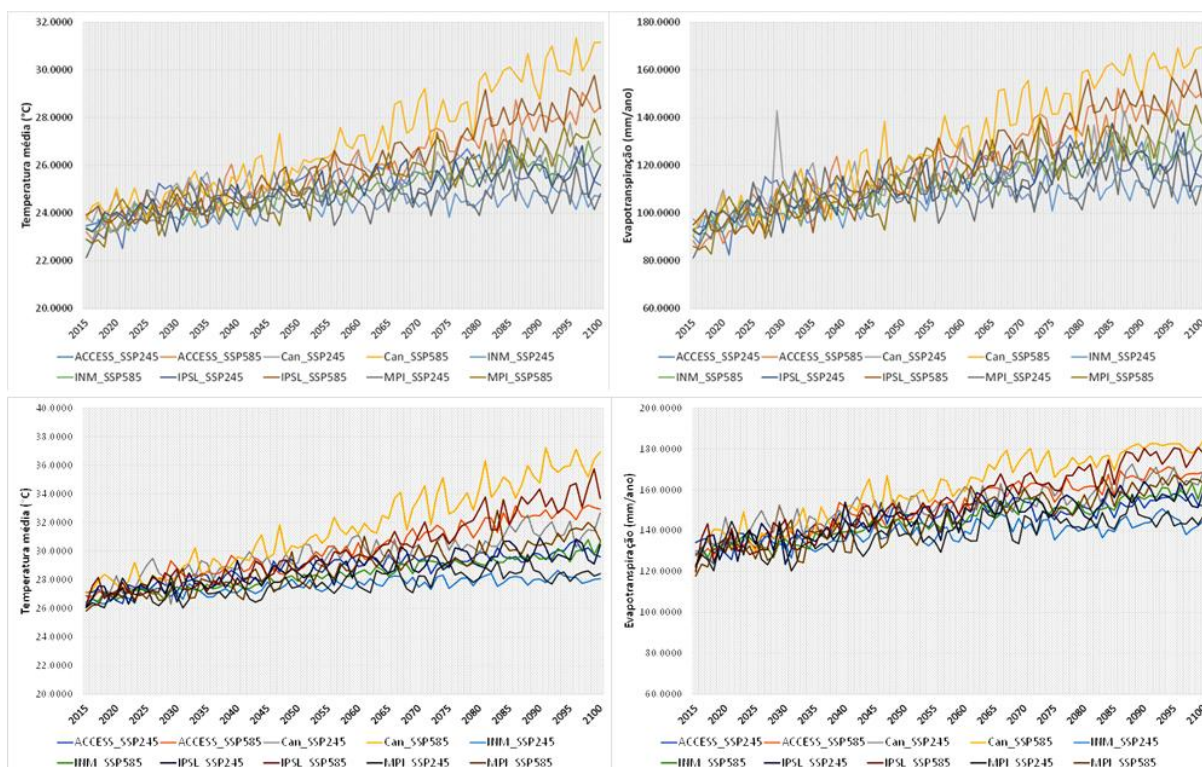
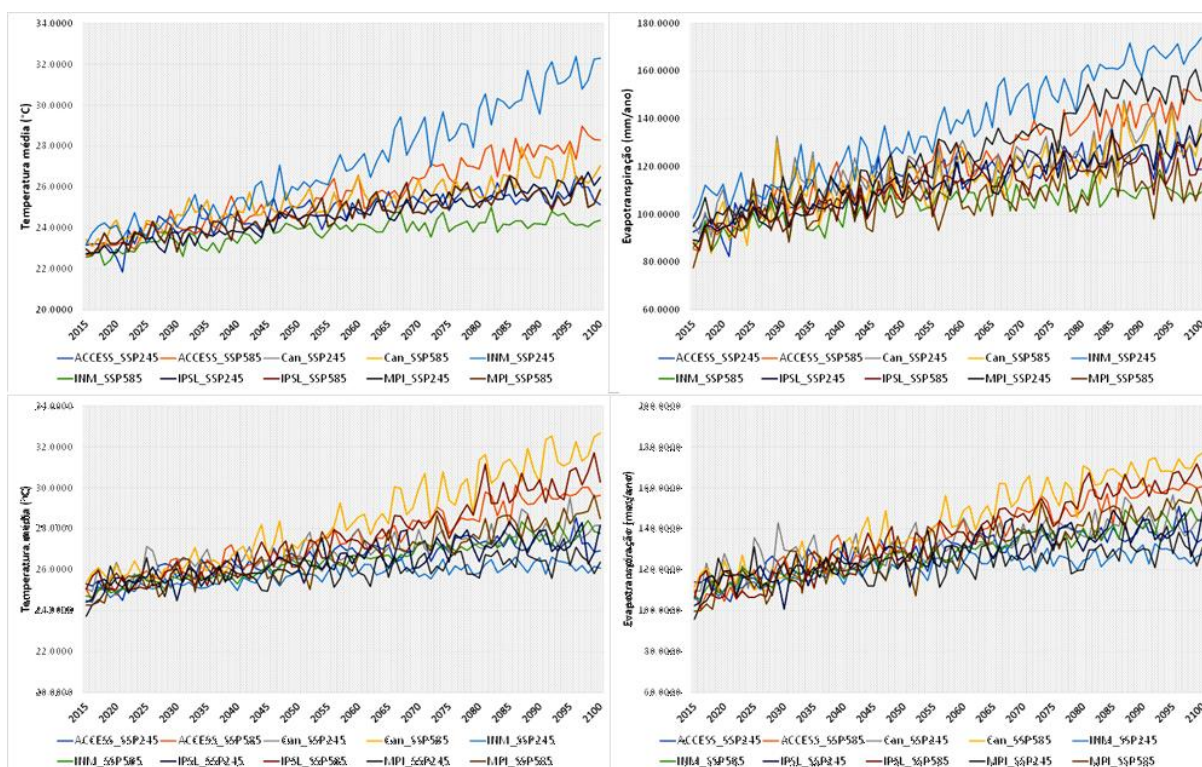


Figura 45 Projeções das variações médias anuais da temperatura e da evapotranspiração para as bacias dos rios Paraná e São Francisco.



Na bacia do rio Doce o modelo CanESM apresenta maior aumento da temperatura média da superfície, variando de aproximadamente 24°C em 2015 para 31°C em 2100, para o cenário SSP5-8.5.

O modelo MPI, para o cenário SSP2-4.5, se apresenta com os menores valores de acréscimo na temperatura média saindo de algo em torno de 22°C em 2015 chegando a 25°C em 2100. Nos demais modelos são projetados valores intermediários a esses para o período futuro.

Na bacia do rio Madeira novamente o modelo CanESM apresenta maior aumento da temperatura, variando de aproximadamente 27°C em 2015 para 35°C em 2100 para o cenário SSP5-8.5.

O modelo INM, para o cenário SSP2-4.5, se apresenta com os menores valores de acréscimo na temperatura média, saindo de 26,5°C em 2015 chegando a 27°C em 2100.

Na bacia do rio Paraná as projeções indicam maior aumento da temperatura média para o modelo ACCESS no cenário SSP2-4.5, o que representa uma exceção, variando de aproximadamente 23°C em 2015 para 32°C em 2100.

O modelo INM se apresenta com os menores valores de acréscimo na temperatura, saindo de algo próximo a 23°C em 2015 chegando a 24,5°C em 2100. Nos demais modelos se espera valores intermediários a esses para o período futuro.

Na bacia do rio São Francisco o modelo CanESM apresenta maior aumento da temperatura, variando de aproximadamente 25°C em 2015 para 32,5°C em 2100 para o cenário SSP5-8.5.

O modelo INM se apresenta com os menores valores de acréscimo na temperatura média da superfície, saindo de algo em torno de 24,5°C em 2015 chegando a 26°C em 2100.

Analisando as Figura 44 e Figura 45 observa-se que no geral a temperatura segue tendência de aumento para todos os modelos climáticos e, consequentemente, o mesmo ocorre para a evapotranspiração.

Nota-se também que alguns modelos projetam maiores acréscimos na temperatura, por exemplo, o CanESM e o IPSL, e outros como o INM e o MPI projetam menores acréscimos na temperatura média até o final do século.

O modelo ACCESS para a bacia do rio Paraná apresenta uma exceção, onde são esperados os maiores aumentos de temperatura quando comparados com os outros modelos, porém, para as demais bacias os aumentos projetados são menores.

Outra observação a se fazer é que as projeções dos modelos climáticos para a temperatura para o cenário SSP5-8.5, no geral, apontam para aumentos maiores do que o cenário SSP2-4.5, o que era de se esperar, conforme proposta dos cenários, ou seja, o SSP2-4.5 sendo um cenário de moderado de emissões e de crescimento econômico e o SSP5-8.5 o cenário mais pessimista nos dois aspectos.

Porém, há grande variabilidade observada nos modelos de ano a ano, como se observa nas figuras, mas o resultado mais importante nesse caso é que todos os apontamentos confirmam as projeções anteriores de que a temperatura da superfície terrestre tende a aumentar até 2100.

A análise da chuva pode ser realizada de maneira um pouco diferente. No trabalho avalia-se a variação da precipitação em termos da anomalia de chuva para os dois períodos futuros (2015-2060 e 2061-2100) em relação ao período histórico (1970-2014). A separação no período futuro será utilizada posteriormente para as análises de vazão e energética.

As anomalias da precipitação são apresentadas para as bacias hidrográficas dos rios Doce, Madeira, São Francisco e Uruguai, ressaltando-se novamente que a escolha destas foi feita em função da importância para o SIN e pela região em que estão localizadas no Brasil.

Com isso, espera-se evidenciar as variações na chuva para todas as regiões do país em decorrência das mudanças climáticas. As Figura 46**Erro! Fonte de referência não encontrada.** a

Figura 49 apresentam esses resultados e, posteriormente, é feita uma análise dos principais aspectos observados.

Nas figuras a coloração avermelhada representam as anomalias negativas de chuva, os tons de azul representam as anomalias positivas e branca representa anomalia neutra (zero).

Figura 46 Anomalia de precipitação da bacia do rio Doce.

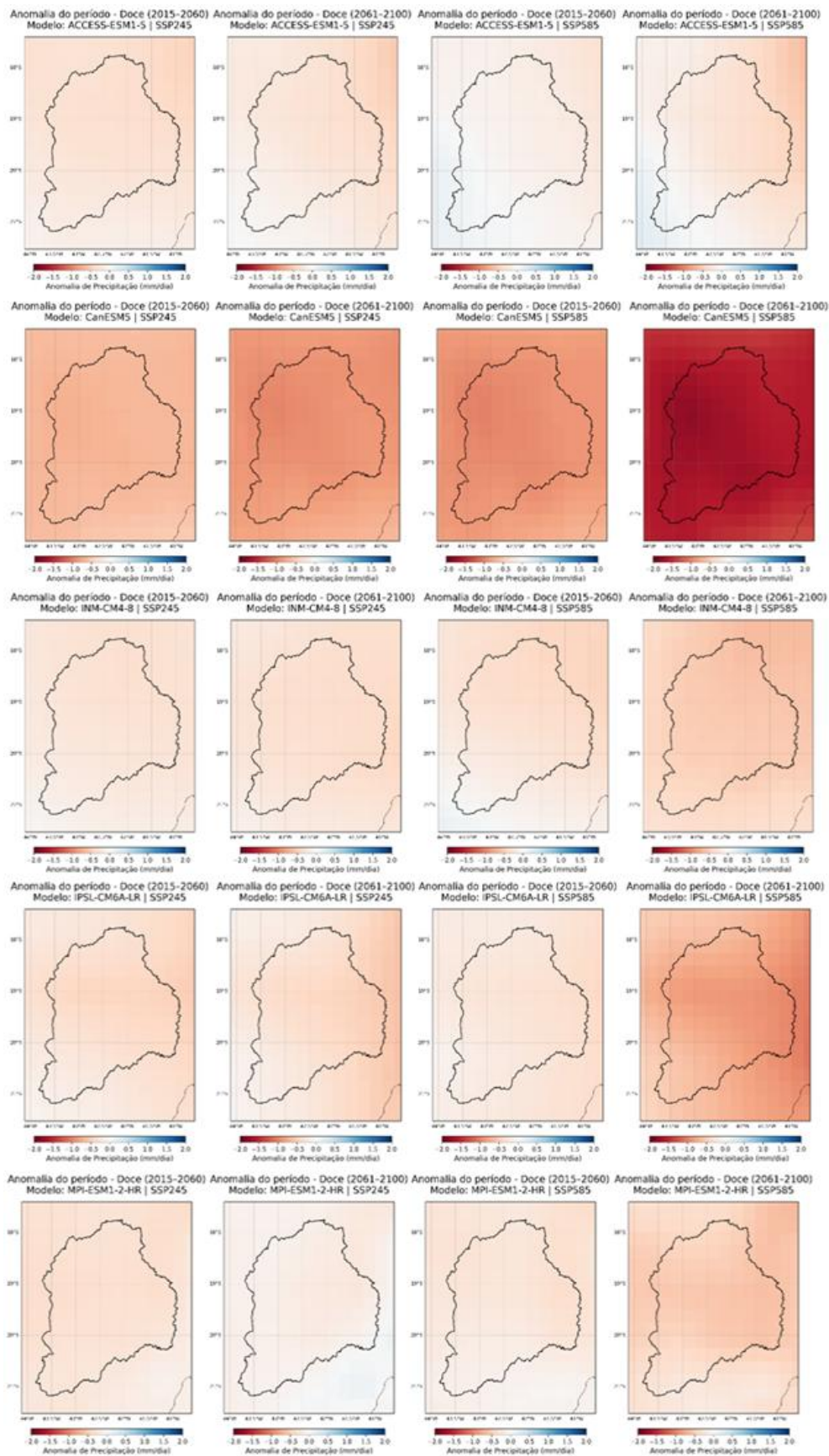


Figura 47 Anomalia de precipitação da bacia do rio Madeira.

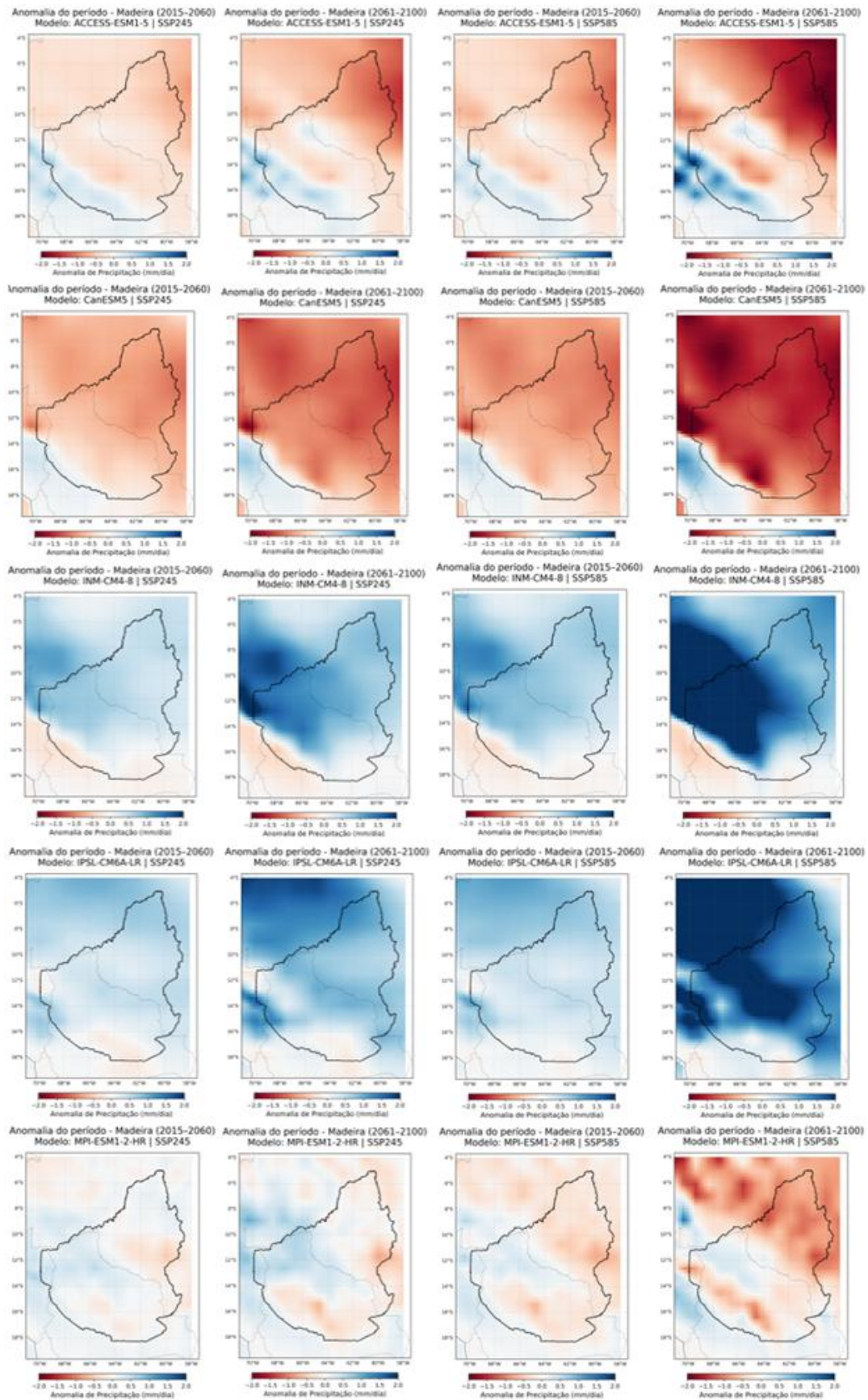


Figura 48 Anomalia de precipitação da bacia do rio São Francisco.

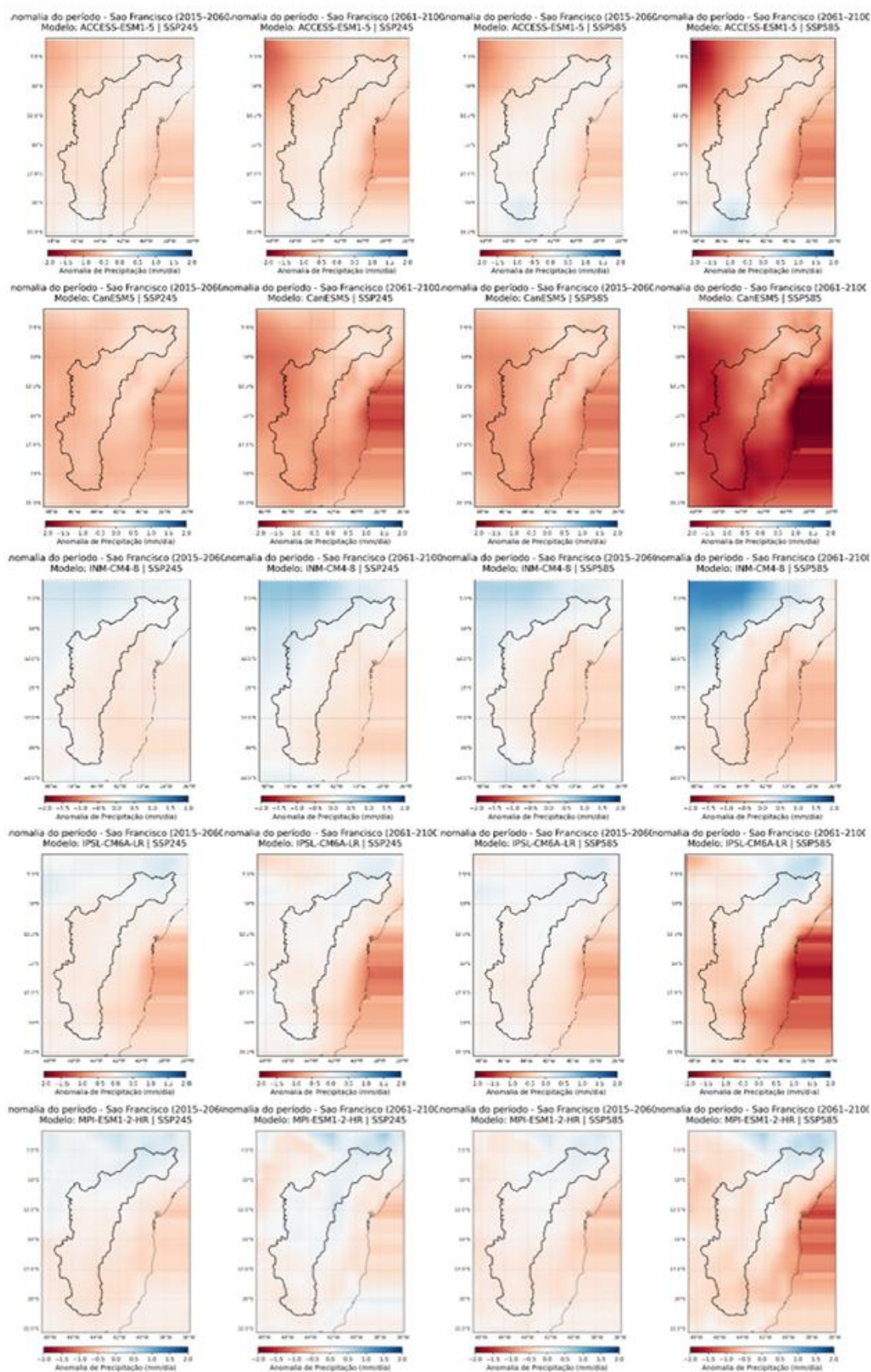
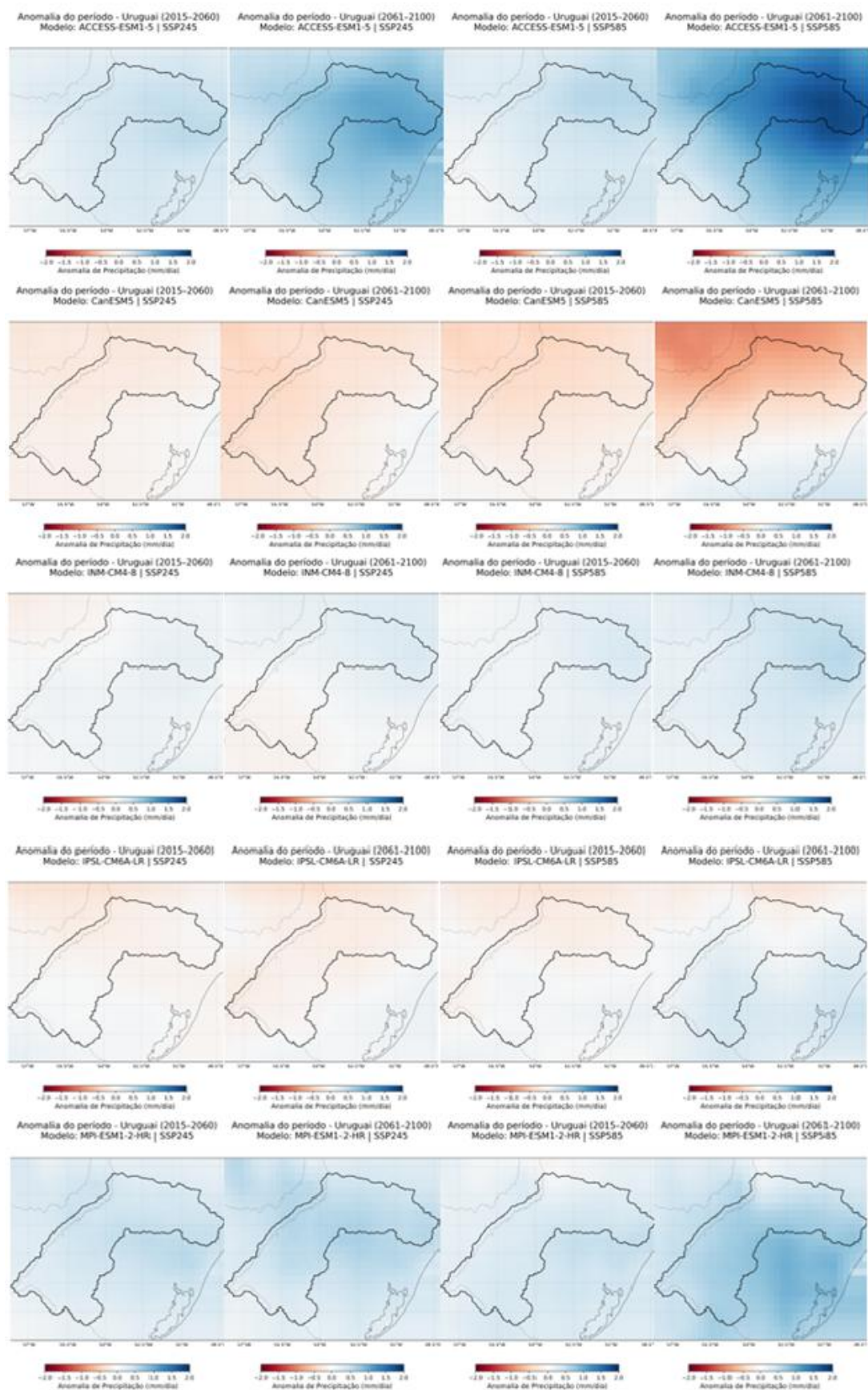


Figura 49 Anomalia de precipitação da bacia do rio Uruguai.



5.5. Projeções de usos consuntivos da água para os aproveitamentos hidrelétricos

Os resultados aqui apresentados se referem a coluna de consumo total de água em m^3/s (dados mensais), a montante de aproveitamentos hidrelétricos, que resulta da subtração dos volumes retirados pelos volumes que retornam aos corpos hídricos.

As Figura 50 a

Figura 54 apresentam a evolução do consumo por sub-bacia, para os anos de 1940, 1980, 2021 do diagnóstico e o ano de 2040 do prognóstico para as bacias hidrográficas dos rios Doce, Madeira, Paraná, São Francisco e Uruguai.

Figura 50 Evolução do consumo total de água por sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Doce.

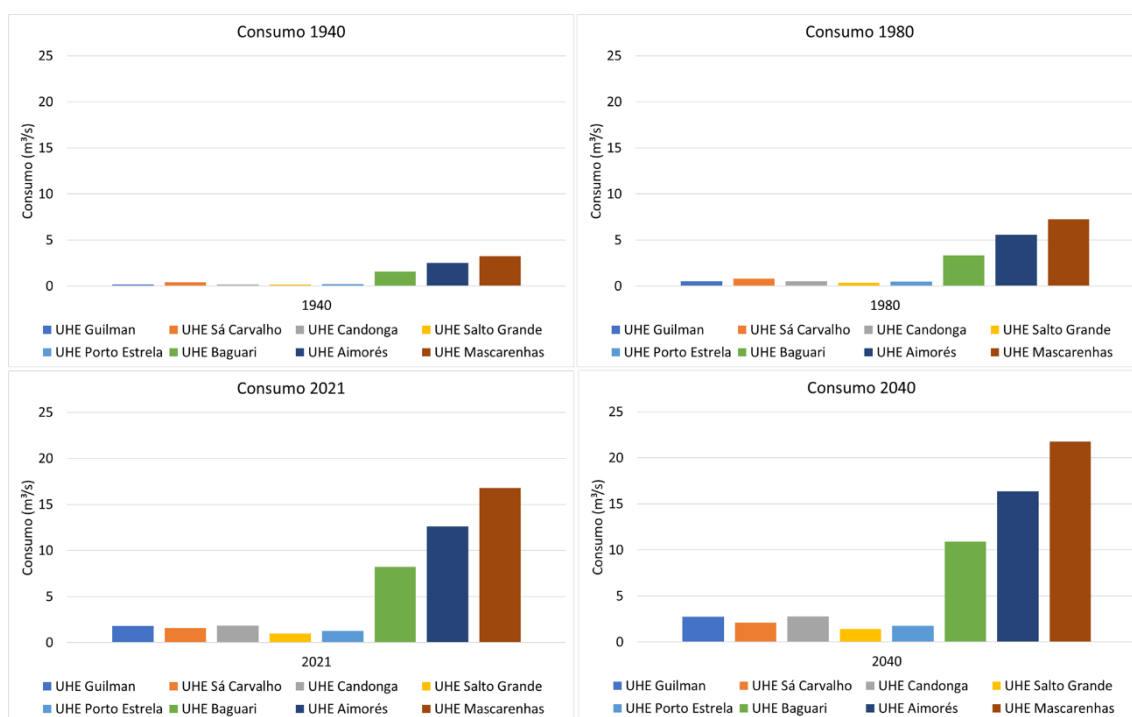


Figura 51 Evolução do consumo total de água por sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Madeira.

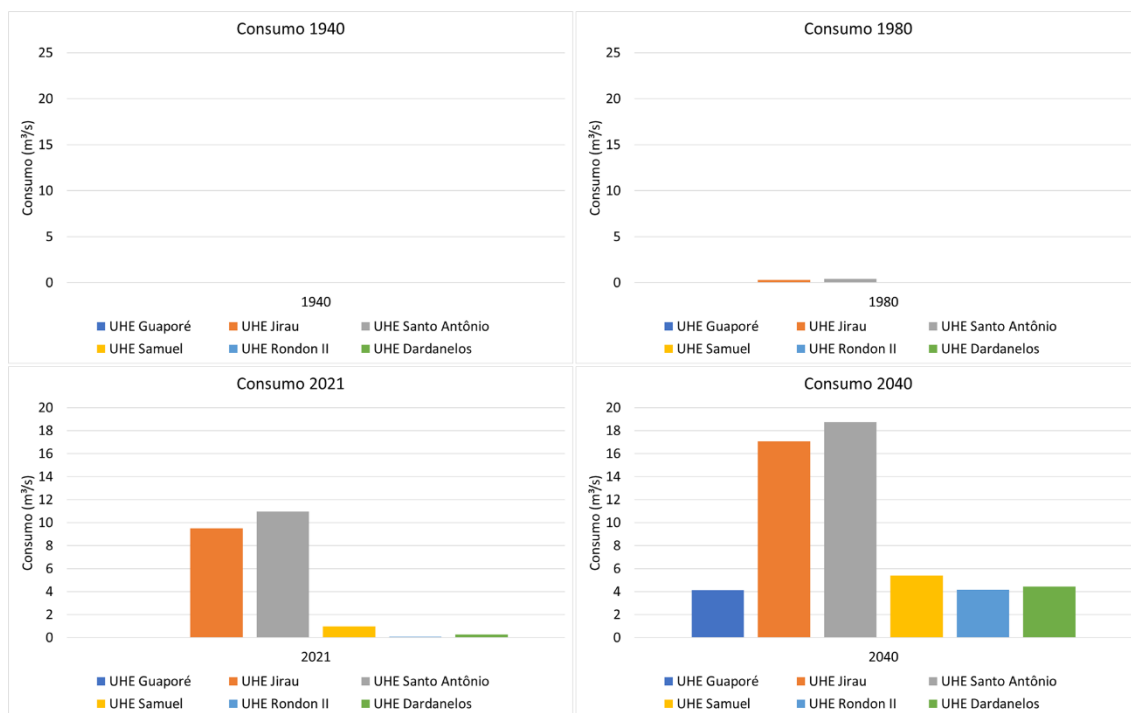


Figura 52 Evolução do consumo total de água por sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Paraná.



Figura 53 Evolução do consumo total de água por sub-bacia da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

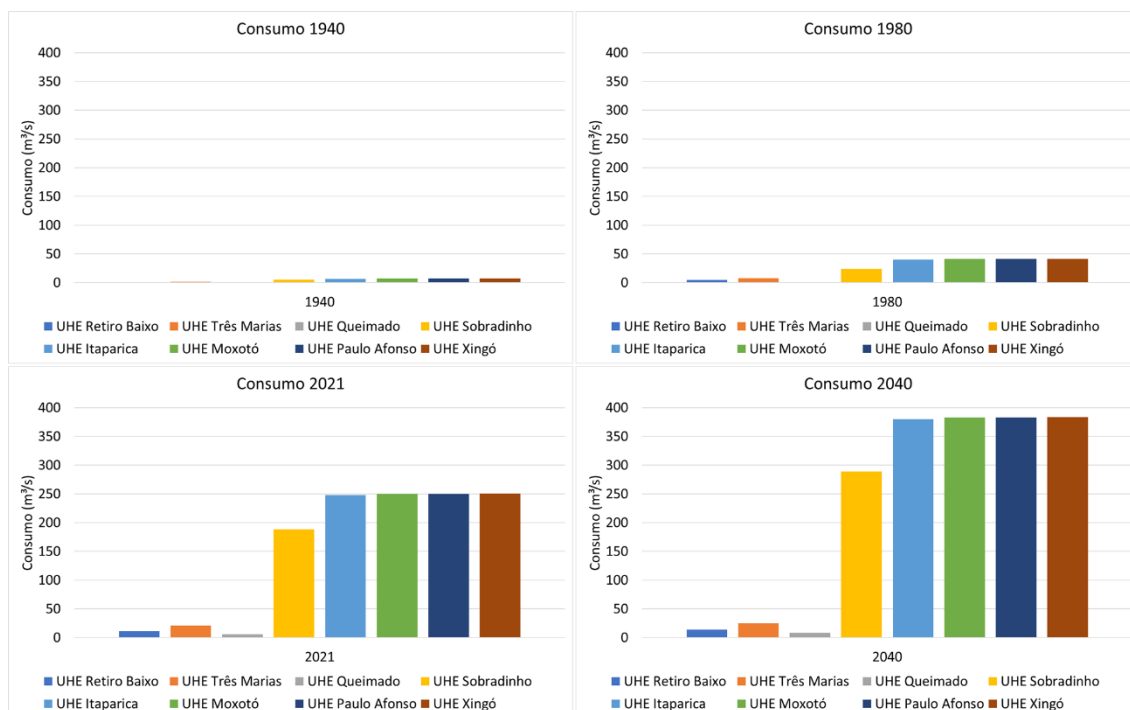
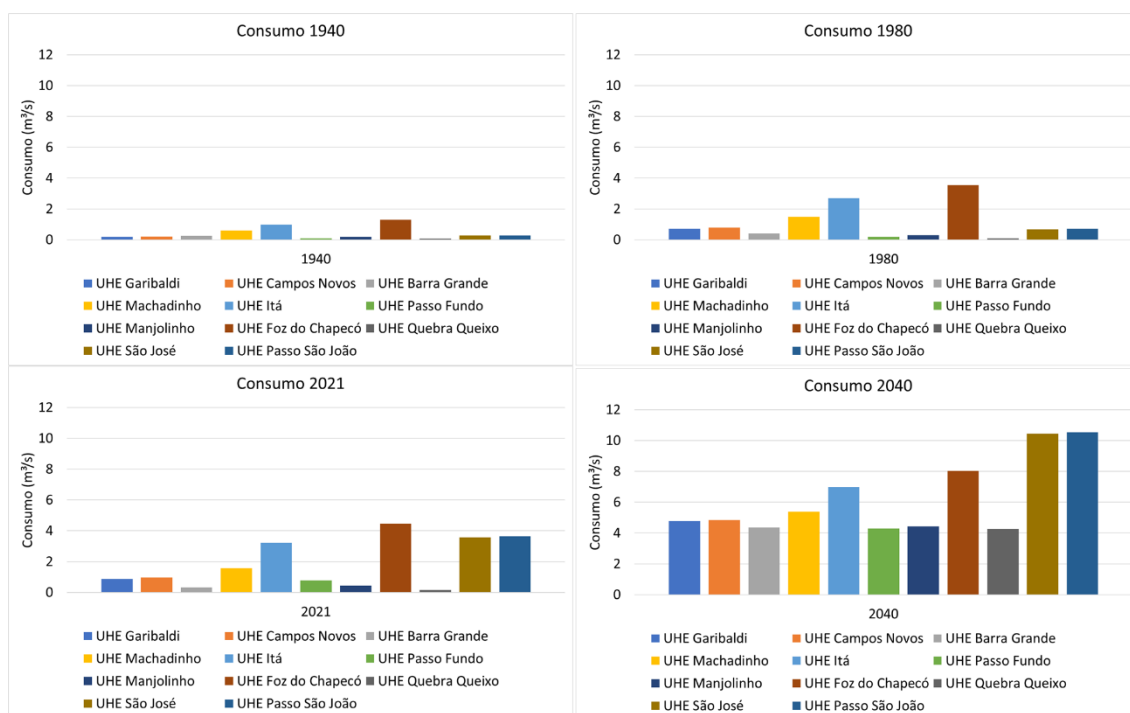


Figura 54 Evolução do consumo total de água por sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Uruguai.



Como se observa das Figura 50 a Figura 54 os consumos de água são inicialmente muito pequenos na década de 40 e vão crescendo significativamente em 1980 e 2021 ainda no período diagnóstico.

As projeções em 2040 apresentam quantidade elevadas de consumo total de água em todas as bacias avaliadas, sendo então um indicativo que no final do século os valores tendem a ser ainda maiores.

Para a bacia do rio Doce os consumos de água na última usina (UHE Mascarenhas), se apresentou como os maiores valores. A evolução dos consumos de água para os anos de 1940, 1980, 2021 e 2040, cresceram de 3 m³/s, 7,5 m³/s, 17 m³/s com a projeção em 22 m³/s.

Os valores de vazões de consumo total da bacia do rio Doce aumentam de 8 m³/s em 1940, 19 m³/s no ano de 1980, 45 m³/s em 2021 e a projeção para o ano de 2040 as vazões consumidas chegam a cerca de 60 m³/s.

Para a bacia do rio Madeira os consumos de água para a terceira usina e mais importante (UHE Santo Antônio), se apresentou como os maiores valores demandados. A evolução dos consumos de água para os anos de 1940, 1980, 2021 e 2040, cresceram de 0 m³/s, 0,5 m³/s, 11 m³/s com projeção de 19 m³/s em 2040.

Os valores de vazões de consumo total da bacia do Madeira são incrementados lentamente de 0,1 m³/s em 1940 a 0,7 m³/s no ano de 1980, saltando para 22 m³/s em 2021 e sendo projetada para o ano de 2040 a vazão consumida de 54 m³/s.

Para a bacia hidrográfica do rio Paraná os valores consumidos de água na última usina e mais importante do território nacional (UHE Itaipu), foram os maiores da bacia e um dos maiores dos empreendimentos avaliados.

A evolução dos consumos de água para os anos de 1940, 1980, 2021 e 2040, cresceram de 20 m³/s, 85 m³/s, 285 m³/s com a projeção em 355 m³/s aproximadamente.

Como a bacia do Paraná é uma das maiores em extensão e a maior no número de aproveitamentos hidrelétricos (60 no total), somando-se os valores demandados da bacia como um todo, as vazões consumidas para os mesmos anos aumentam rapidamente de 146 m³/s, 580 m³/s, 1950 m³/s com a projeção em 2440 m³/s.

Para a bacia do rio São Francisco o consumo de água na quarta usina a mais importantes da bacia (UHE Sobradinho), se apresentou com valores elevados de consumo.

A evolução das vazões consumidas para os anos de 1940, 1980, 2021 e 2040, cresceram de 3 m³/s, 7,5 m³/s, 17 m³/s com a projeção em 22 m³/s. Os totais consumidos evoluem de 35 m³/s em 1940 para 200 m³/s em 1980, crescendo exponencialmente para 1220 m³/s no ano de 2021 e sendo projetado o consumo de quase 1900 m³/s no ano de 2040.

Para a bacia de drenagem do rio Uruguai os consumos de água na última usina (UHE Passo São João), se apresentaram como os maiores valores dos aproveitamentos hidrelétricos da bacia. Os consumos de água para os anos de 1940, 1980, 2021 e 2040, foram de 0,3 m³/s, 0,7 m³/s, 3,6 m³/s e as vazões de consumo projetados para pouco mais de 10 m³/s.

Os totais consumidos na bacia do Uruguai evoluem de 4 m³/s em 1940 quase triplica chegando a 11 m³/s em 1980, em 2021 os valores consumidos chegam a 20 m³/s, sendo projetado o consumo de quase 70 m³/s no ano de 2040.

Na Figura 55 apresenta-se a evolução das vazões de consumo de todas as bacias avaliadas para o ano de 2021, último ano da série histórica ou prognóstico, e as projeções obtidas pela metodologia proposta nos anos de 2050, 2080 e 2100.

Na sequência são apresentados alguns resultados das projeções para os principais aproveitamentos hidrelétricos contidos nas bacias dos rios Doce, Madeira, Paraná, São Francisco e Uruguai. Dessas bacias escolheu-se a usina considerada a mais importante dentre as usinas da bacia, seja pelo tamanho da área de drenagem ou pela capacidade de geração.

Nas Figura 56 a Figura 60 são mostrados os valores de consumos anuais de água para o período histórico ou diagnóstico de 1931 a 2021 (linha azul) e a projeção dos consumos anuais obtidos a partir da aplicação do método proposto para o período de 2022 a 2100 (linha laranja).

Os resultados indicam os consumos anuais de água a montante dos aproveitamentos hidrelétricos para os seis setores analisados, a saber, abastecimento humano urbano (HR), abastecimento humano rural (HR), indústria (IND), mineração (MIN), dessedentação animal (ANI) e irrigação (IRR) e um sétimo gráfico que apresentando os valores totais anuais de consumo para o aproveitamento hidrelétrico selecionado.

Foram calculados os valores anuais acumulando-se os valores médios mensais do respectivo ano, posteriormente, os valores das projeções anuais de consumo são desagregados em valores médios mensais a partir da proporção média mensal do último ano do período prognóstico (2021), ou seja, obtendo-se para cada mês um valor de proporção em relação ao total anual, aplicando-se a toda a série de projeções de consumo.

Figura 55 Evolução da projeção dos consumos de água para os anos de a) 2021, b) 2050, c) 2080 e d) 2100.

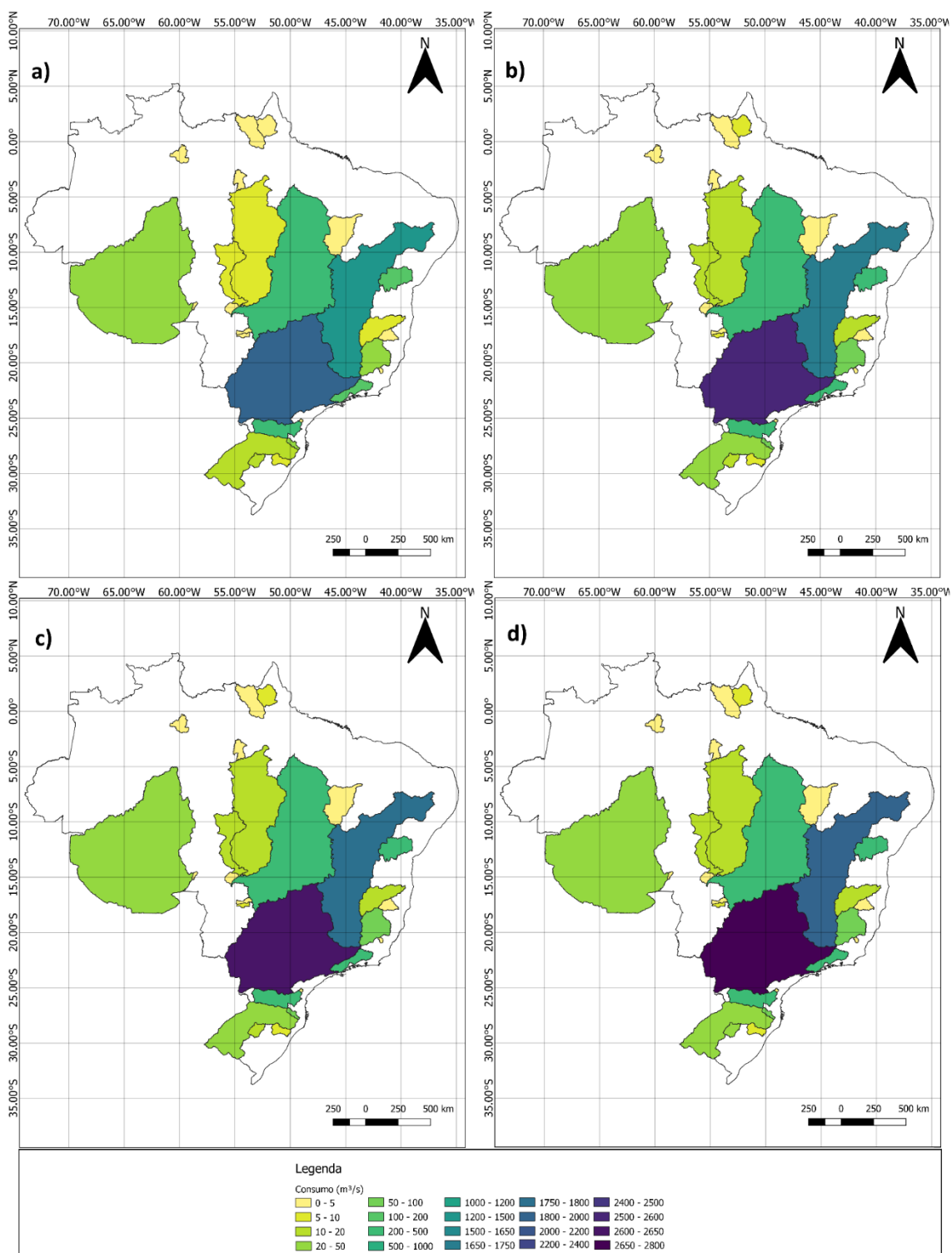


Figura 56 Projeções anuais de usos consuntivos da água por setor e projeção do total anual da UHE Mascarenhas (Doce).

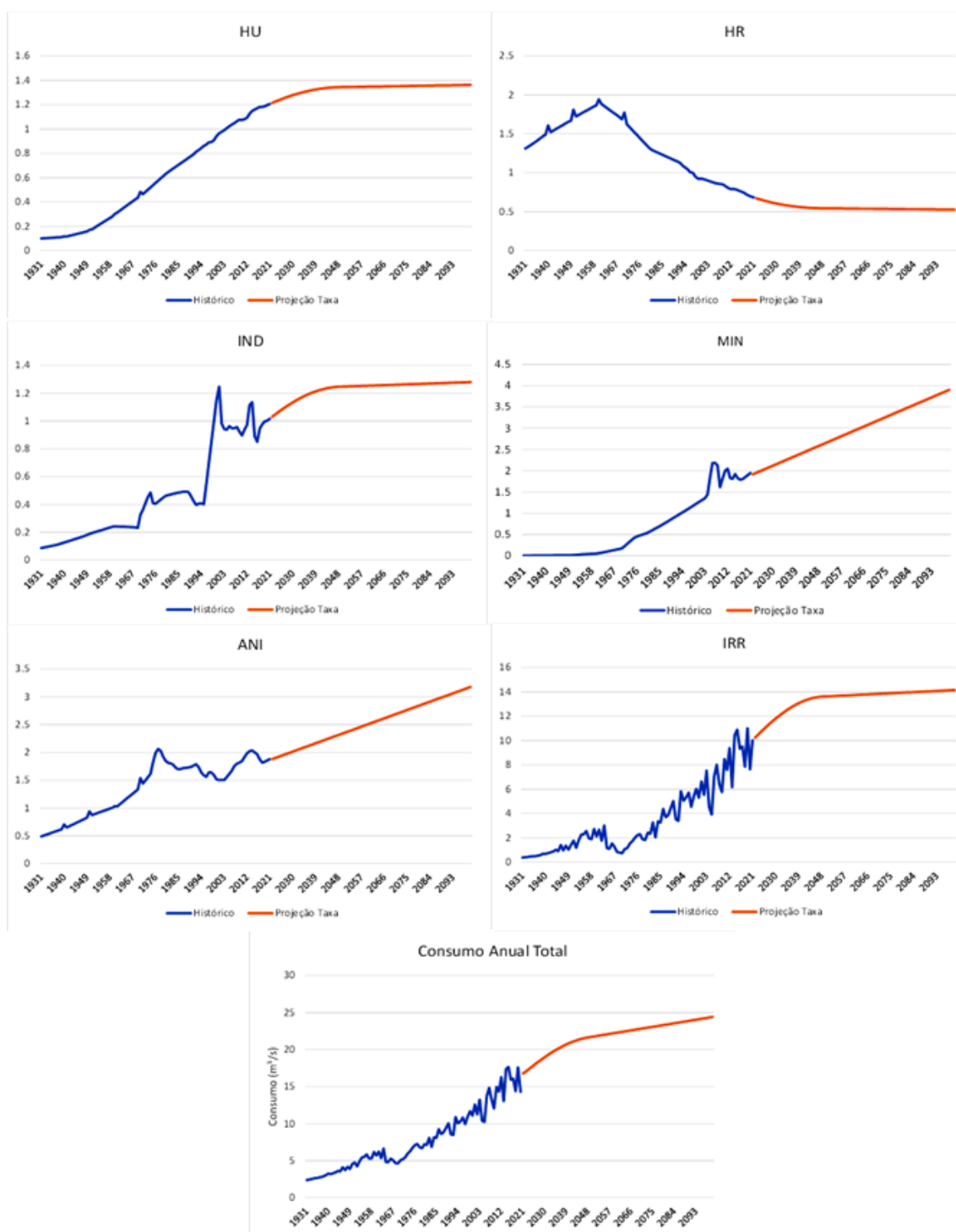


Figura 57 Projeções anuais de usos consuntivos da água por setor e projeção do total anual da UHE Santo Antônio (Madeira).

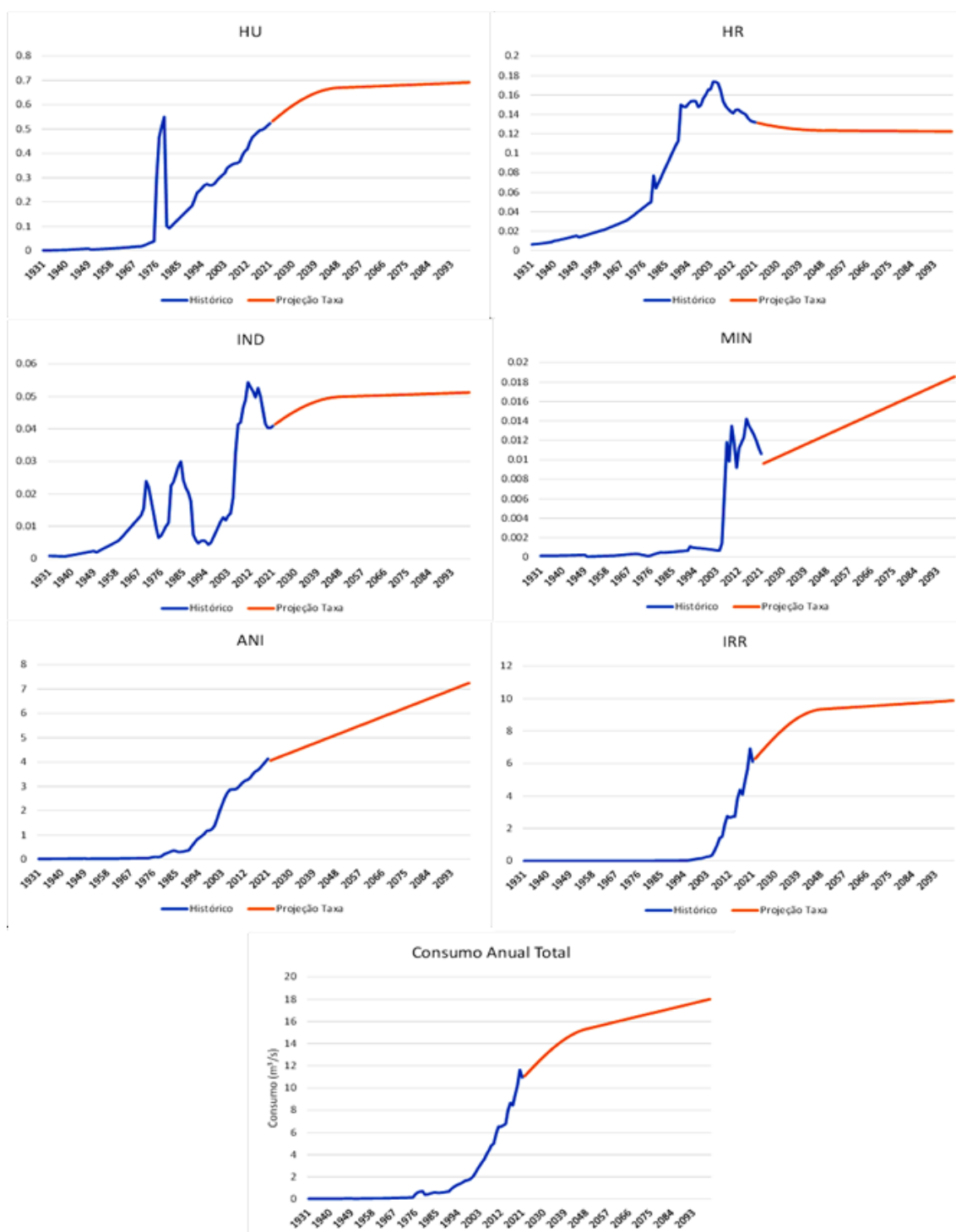


Figura 58 Projeções anuais de usos consuntivos da água por setor e projeção do total anual da UHE Itaipu (Paraná).

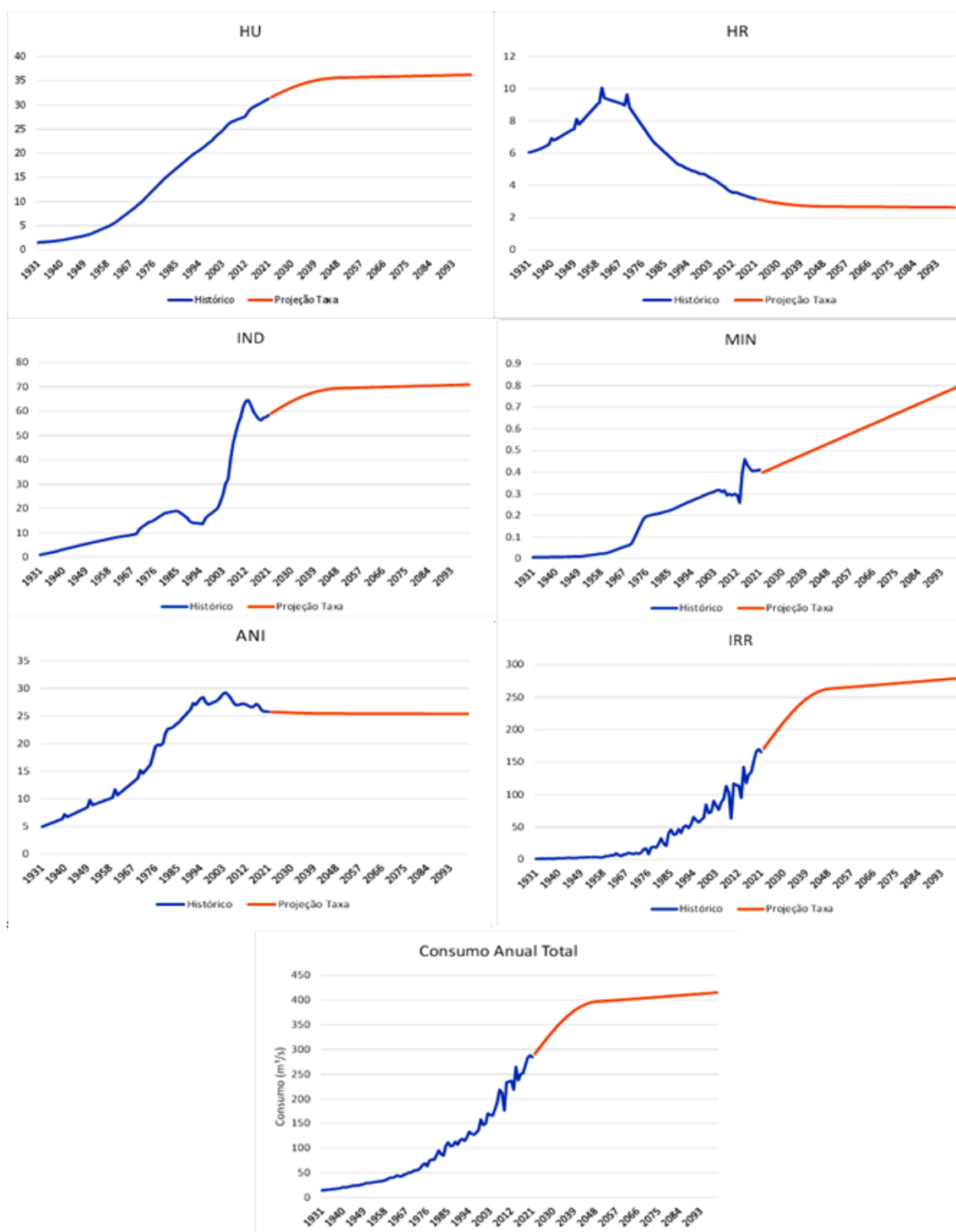


Figura 59 Projeções anuais de usos consuntivos da água por setor e projeção do total anual da UHE Sobradinho (São Francisco).

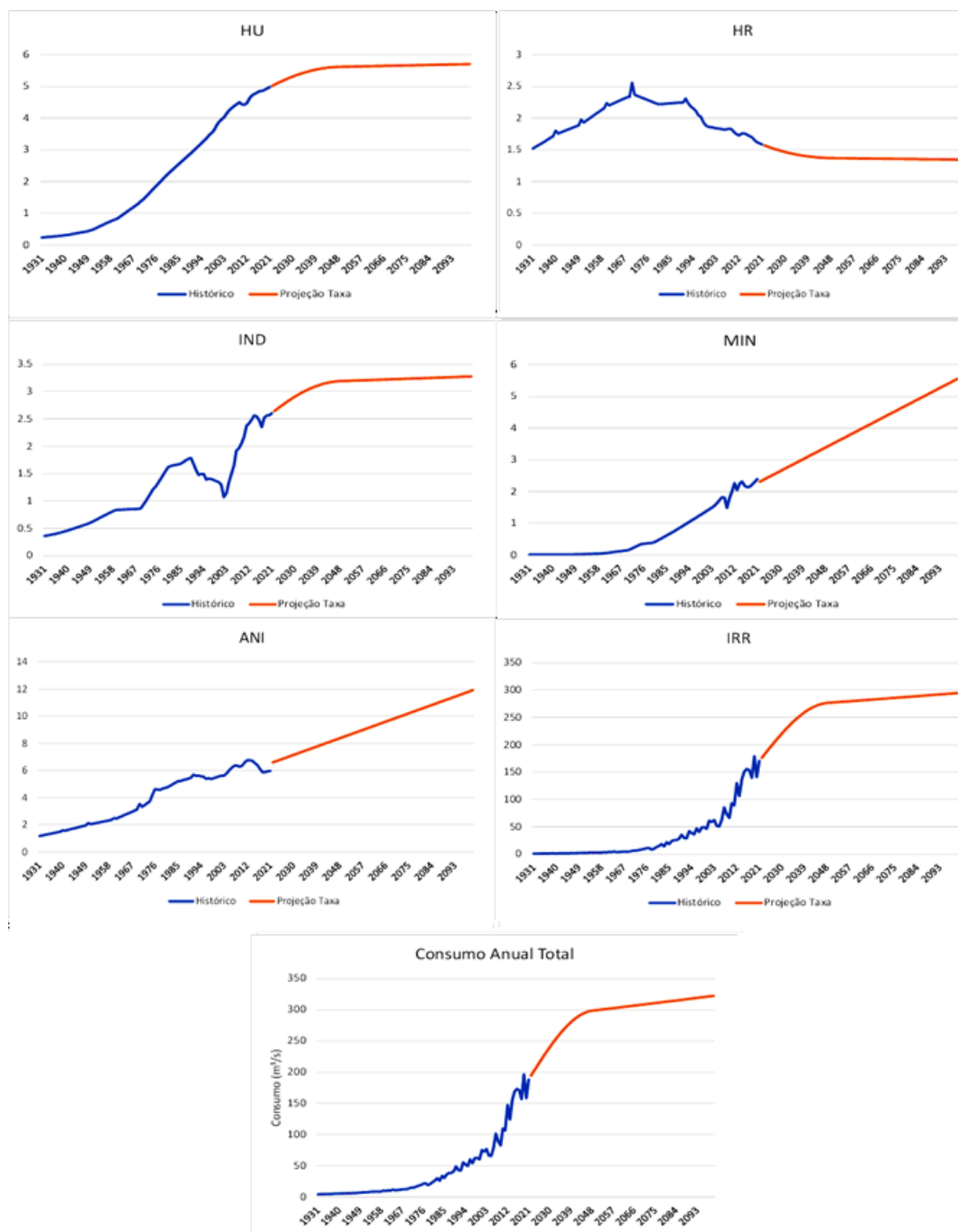
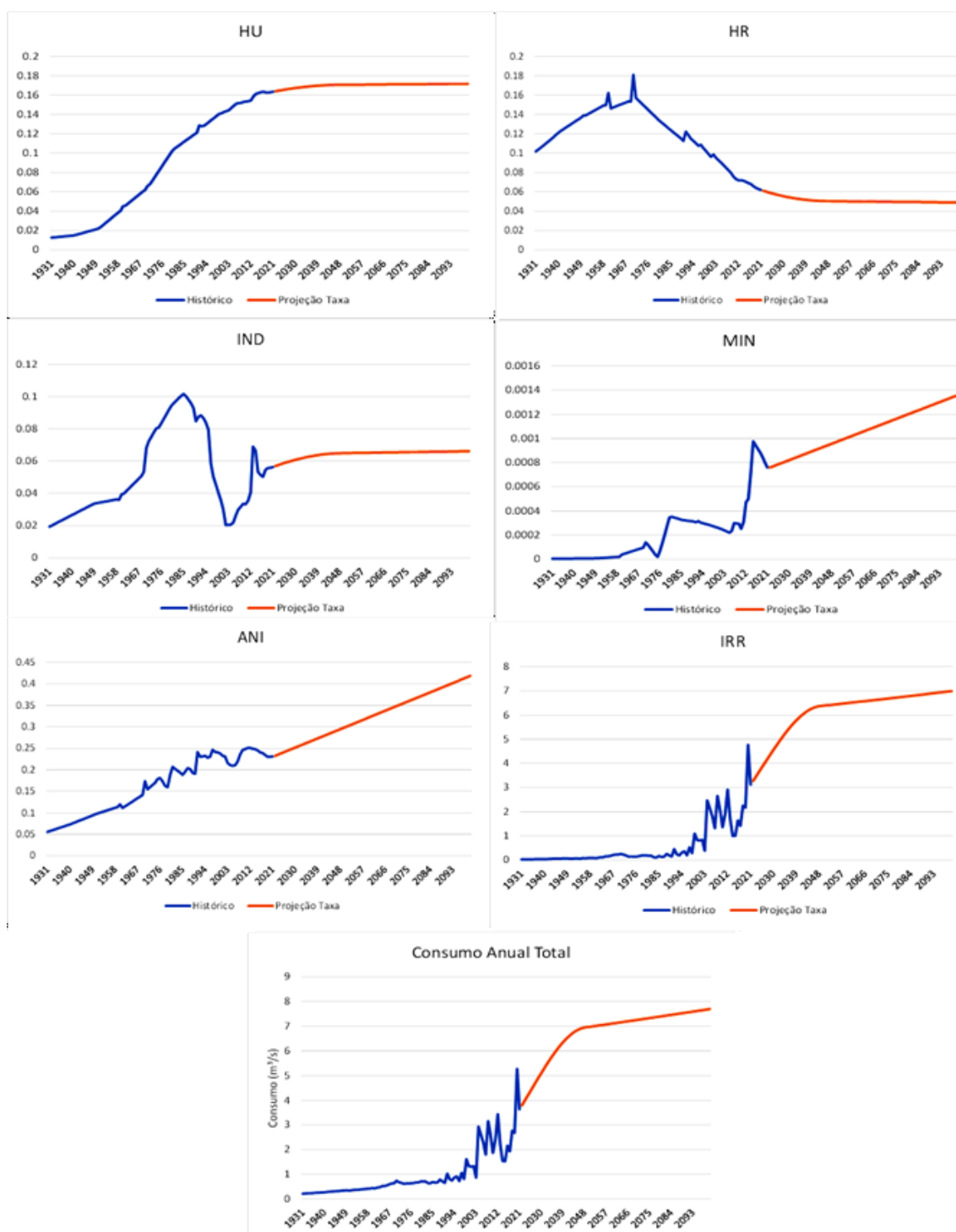


Figura 60 Projeções anuais de usos consuntivos da água por setor e projeção do total anual da UHE Passo São João (Uruguai).



Para a UHE Mascarenhas na bacia do rio Doce, o setor com maior demanda de água é o de irrigação, em que se projeta a vazão de consumo de água de 14 m³/s, seguido de mineração com 4 m³/s e dessedentação animal com pouco mais de 3 m³/s, os demais setores não possuem demandas projetadas muito altas, variando entre 0,5 m³/s e 2 m³/s.

Os outros aproveitamentos da bacia do rio Doce seguem o mesmo padrão, com a irrigação sendo o setor de maior consumo, com a exceção da UHE Guilman em que a mineração é o setor com maior demanda de água ao final do século.

Para a UHE Santo Antônio na bacia do rio Madeira, o setor com maior demanda de água é o de irrigação, em que se projeta a vazão de consumo de água de 10 m³/s, seguido de dessedentação animal com pouco mais de 7 m³/s, os demais setores não possuem demandas projetadas muito altas, variando entre 0,01 m³/s e 1 m³/s.

As outras usinas não seguem o mesmo padrão, sendo o setor de dessedentação animal o maior consumo, com a exceção da UHE Jirau em que a irrigação também é o setor com maior demanda de água ao final do século com projeções em torno de 12 m³/s.

Para a UHE Itaipu na bacia do rio Paraná, o setor com maior demanda de água também é o de irrigação, em que se projeta no ano de 2100 a vazão de consumo de água de quase 280 m³/s, seguido do setor industrial com 70 m³/s, abastecimento humano urbano com pouco mais de 35 m³/s e dessedentação animal que se estabiliza em 25 m³/s, os demais setores não possuem demandas projetadas muito altas, variando entre 0,5 m³/s e 2,5 m³/s.

Os aproveitamentos restantes seguem padrão semelhante, com algumas exceções como na UHE Mauá em que a dessedentação animal e indústria são os setores de maiores consumo com cerca de 0,7 m³/s ao final do século, UHE São Domingos com projeção de dessedentação animal em torno de 0,7 m³/s ao final do século e UHE Barra Bonita em que as projeções apontam para maiores valores para o setor de abastecimento humano urbano de mais de 17 m³/s próximo a 2100.

Para a UHE Sobradinho na bacia do rio São Francisco, o setor com maior demanda de água é o de irrigação, em que se projeta a vazão de consumo de quase 300 m³/s, seguido de dessedentação animal em torno de 12 m³/s, abastecimento humano urbano em mineração em torno de 6 m³/s, os demais setores não possuem demandas projetadas muito elevadas, variando entre 1,5 m³/s e 3 m³/s.

Os demais aproveitamentos hidrelétricos da bacia do rio São Francisco seguem o mesmo padrão, com a irrigação sendo o setor de maior consumo, com a exceção da UHE Três Marias em que o setor de abastecimento humano urbano é projetado com maior demanda de água ao final do século com valores próximos a 12 m³/s seguido de agricultura irrigada com cerca de 10 m³/s.

Para a UHE Passo São João na bacia do rio Uruguai, o setor com projeção de maior demanda de água é o de irrigação, com vazão de consumo de água de 8 m³/s,

seguido de dessedentação animal com pouco mais de 0,45 m³/s, os demais setores não possuem demandas projetadas baixas, variando entre 0,014 m³/s e 0,2 m³/s ao final de 2100.

Os demais aproveitamentos da bacia hidrográfica do rio Uruguai seguem o mesmo padrão, com a irrigação sendo o setor de maior consumo, com a exceção da UHE Passo Fundo em que o abastecimento urbano é o setor com maior demanda de água ao final do século com projeção de aproximadamente 1 m³/s.

No geral as outras bacias hidrográficas e seus aproveitamentos apresentam comportamento bastante parecido com os apresentados nas Figura 56 a Figura 60, sendo o setor de irrigação com os maiores valores projetados ao final do século, com algumas exceções como apresentado anteriormente.

A depender da região e das características de uso e ocupação dos solos das bacias hidrográficas avaliadas, o que varia nas projeções são as segunda e terceira posições de consumo de água que estão entre os setores de abastecimento humano urbano ou de indústrias. Em casos de bacias com predominância rural, os setores de dessedentação animal e mineração aparecem como relevantes quanto aos volumes demandados de água.

Nas Figura 61 e Figura 62, observa-se que a maioria dos modelos projeta aumentos no Fcc devido a aumentos na ET, que ocorre em função do aumento de temperatura logo nos primeiros anos de projeção, com isso, os valores de Fcc calculados são maiores do que 1, acarretando correções positivas nos consumos.

Nota-se que os valores apresentam uma dispersão significativa entre os diferentes modelos e cenários, mas que pode ser considerada normal devido a características de concepção de cada um.

O ANEXO III apresenta valores calculados do Fcc anuais calculados a partir da ET e da temperatura média para cada modelo climático do NEX-GDDP e cenário de emissão SSP2-4.5 e SSP5-8.5, obtidos a partir da Equação 16 para o período de 2022 a 2100 para as bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraná.

O fator de correção foi calculado para cada bacia hidrográfica analisada e aplicado as séries projetadas de consumo de água para o período futuro, agregando os efeitos das mudanças climáticas.

Figura 61 Valores de Fcc obtidos a partir da temperatura média e da evapotranspiração para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para a bacia do rio Doce.

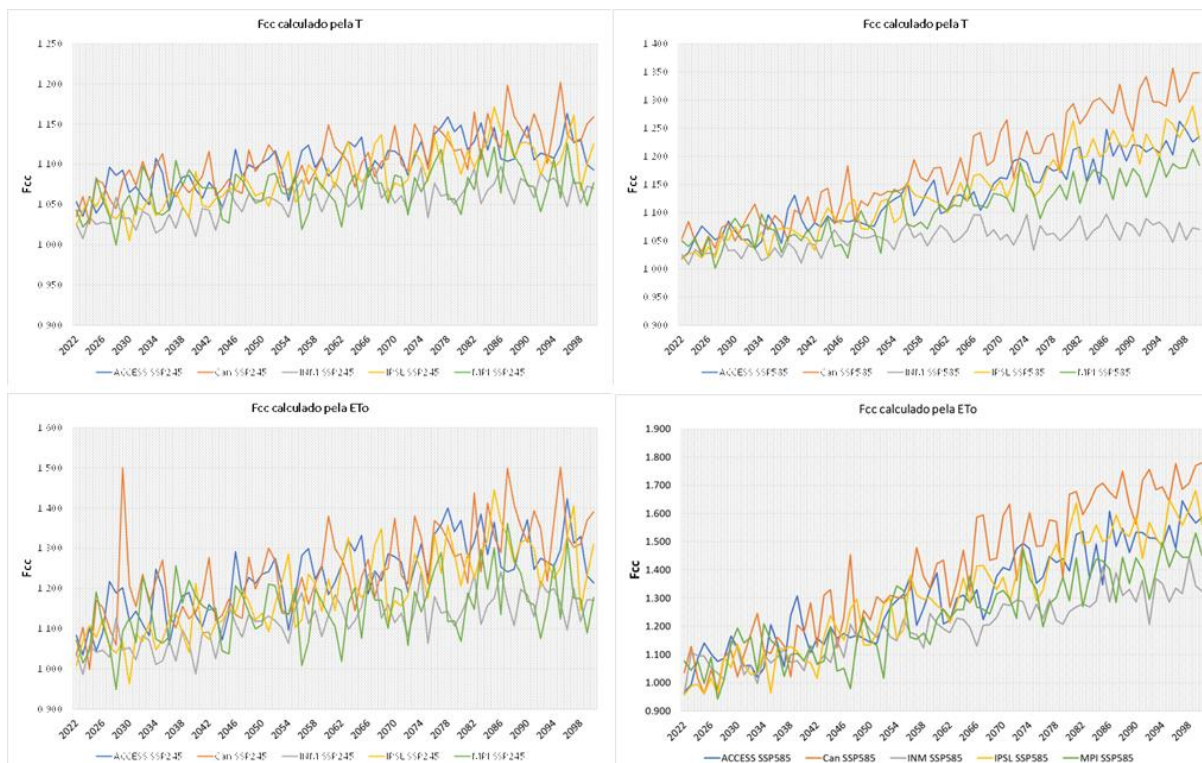
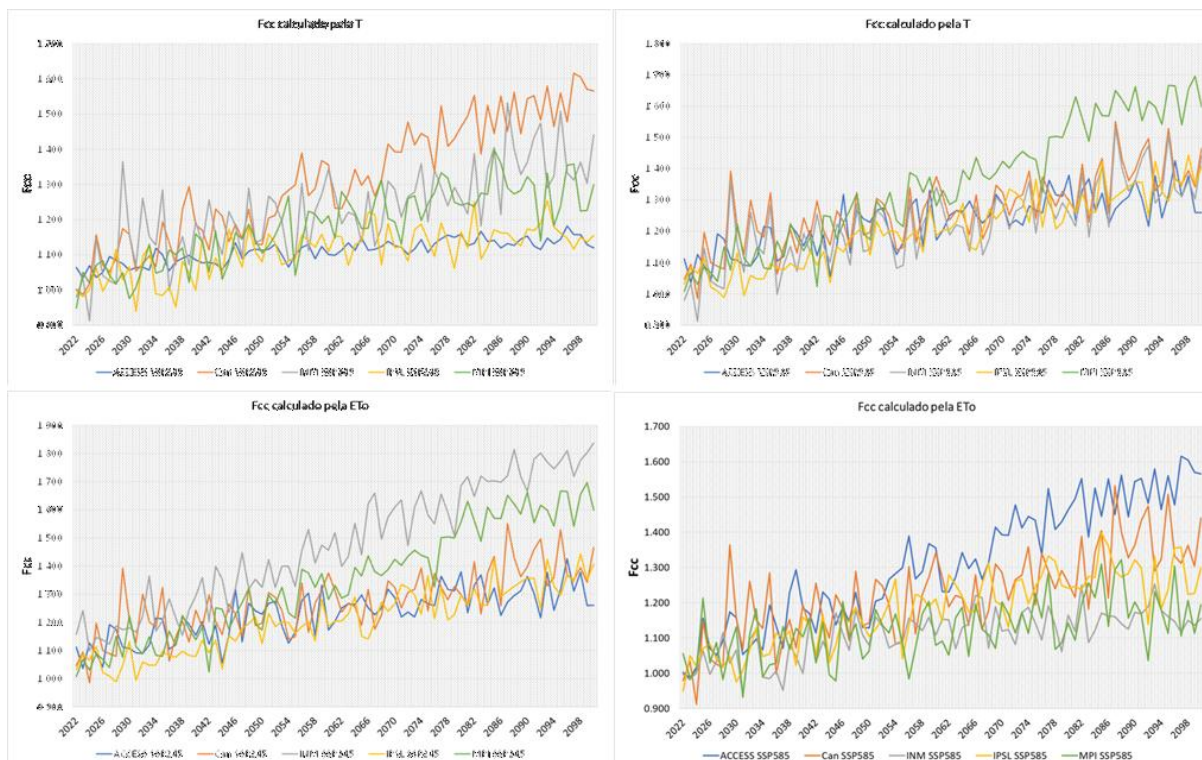


Figura 62 Valores de Fcc obtidos a partir da temperatura média e da evapotranspiração para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para a bacia do rio Paraná.



As Figura 61 e Figura 62 apresenta os resultados para as bacias incrementais da UHE Mascarenhas oitava usina da bacia hidrográfica do rio Madeira e UHE Itaipu sexagésima usina da bacia do rio Paraná.

A linha na cor preta representa o cenário de referência, sem mudanças climáticas, e as demais representam esse mesmo cenário agora com a influência das mudanças climáticas nas projeções de usos consuntivos para cada um dos modelos do NEX-GDDP.

De onde se observa que as vazões de consumos projetadas podem ser aumentadas significativamente quando aplicado o efeito das mudanças climáticas a partir do fator Fcc. Em alguns casos os aumentos podem ser na ordem de 80% ou mais ao final do século, a depender do modelo climático. Por exemplo, o modelo INM para a bacia do rio Paraná no cenário de emissão SSP5-8.5.

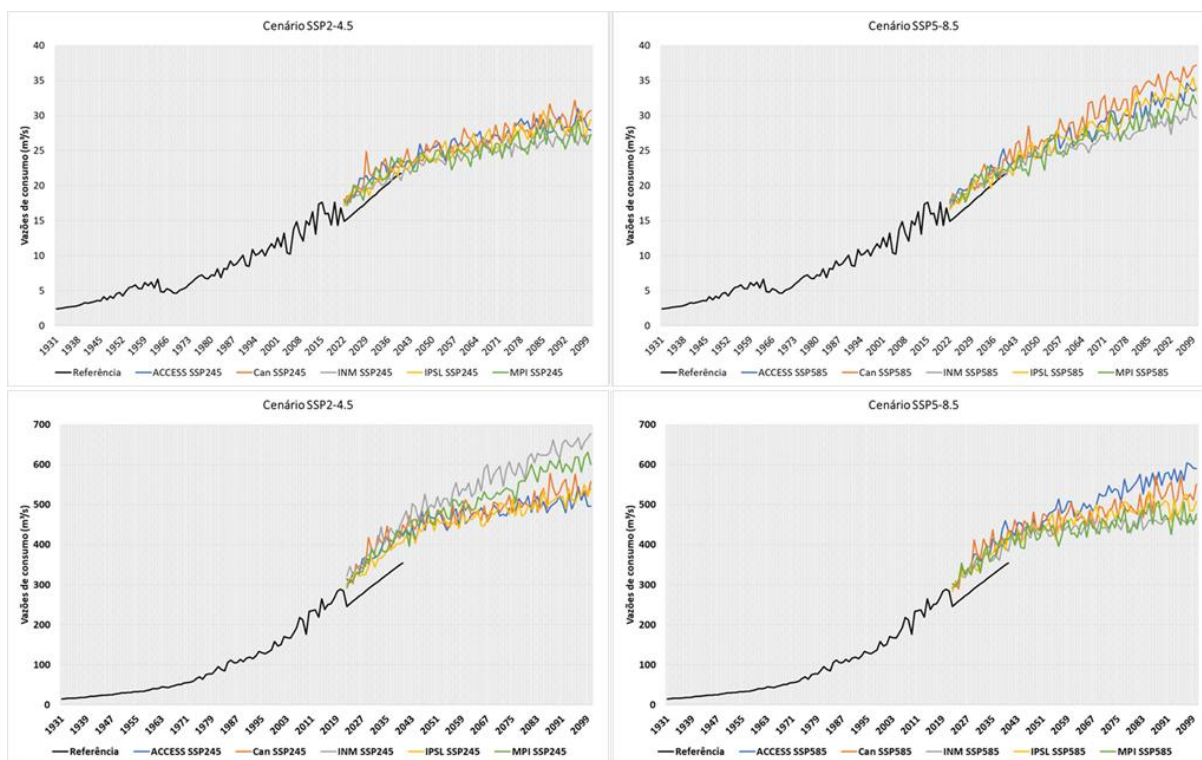
Poucos são os casos em que o Fcc representa redução nas vazões consumo, e isso só ocorre nos primeiros anos das projeções, mas logo os valores de Fcc passam a ser maiores do que a unidade acarretando aumentos nas projeções.

Em alguns casos as vazões de consumo poderiam inviabilizar os aproveitamentos hidrelétricos, principalmente àqueles de pequeno porte em que vazões médias disponíveis do curso d'água para a geração hidrelétrica não são muito grandes e o desconto da parcela de usos consuntivos acarretaria alguns meses ao final da série em vazões nulas.

Observa-se da Figura 63 que os modelos climáticos e cenários de emissão apresentam grande variabilidade, sendo que alguns deles geram aumentos mais significativos do que outros, porém todos convergem para a mesma indicação de que as mudanças climáticas incorporadas as projeções de consumo de água.

Tanto os Fcc calculados pela temperatura quanto os calculados pela evapotranspiração levam em consideração as variações na temperatura, seja a média ou os extremos mínimos e máximos.

Figura 63 projeções de vazões de usos consuntivos das bacias dos rios Doce e Paraná com efeito de mudanças climáticas.



Na Figura 63 verifica-se que para a Bacia do rio Doce onde analisou-se os resultados das vazões de consumo projetadas para a UHE Mascarenhas, que fica próxima ao exutório da bacia, no cenário SSP2-4.5, as vazões de consumo podem chegar a 32 m³/s próximo a 2095 sendo ligeiramente reduzidas até 2100 para o modelo CanESM (linha vermelha) e algo em torno de 31 m³/s para o modelo ACCESS (linha azul). Os demais modelos não ficam atrás, variando em torno de 25 m³/s e 30 m³/s ao final do século.

Para o cenário de emissão SSP5-8.5, a situação é um pouco mais agravada, o que era de se esperar, uma vez que, esse cenário é o mais pessimista projetado pelos modelos climáticos, as vazões de consumo ao final do século chegam a aproximadamente 37 m³/s para o modelo CanESM e modelo IPSL (linha amarela) com consumo pouco superior a 35 m³/s. Os demais modelos variam entre 29 m³/s e 35 m³/s ao final do século.

Analisando a UHE Itaipu na bacia do rio Paraná, que também é o último aproveitamento da bacia, para o cenário SSP2-4.5, as maiores projeções de consumo são para o modelo INM (linha cinza), chegando a quase 680 m³/s em 2100 e o modelo MPI (linha verde) chegando a mais de 630 m³/s a vazão de usos consuntivos. As projeções de consumo para os outros modelos variam entre 500 m³/s e 580 m³/s ao final do período futuro.

No cenário SSP5-8.5, as vazões de usos consuntivos ao final do século variam de 480 m³/s a 590 ao final do século, onde se observa que, nesse caso, o cenário mais pessimista não projetou vazões de maiores do que o cenário intermediário (SSP2-4.5). Esse fato também é observado em outras bacias, porém, não é muito frequente, no geral as projeções de vazões de consumo para o cenário intermediário são superadas pelo cenário pessimista.

A bacia do Paraná e, especificamente, a UHE Itaipu ficam em uma zona de transição para as projeções, pois o aproveitamento fica ao sul da bacia, já na região sul do Brasil, onde os modelos climáticos projetam, em alguns casos, aumentos na chuva e aumentos menores para a temperatura. Esse pode ser um fator que contribui para essa inversão, mas é somente uma hipótese.

As demais bacias hidrográficas e aproveitamentos avaliados seguem um comportamento semelhante, em todos os casos as projeções de usos consuntivos da água, aprontam para aumentos substanciais ao final do século para todos os modelos nos dois cenários.

A variabilidade ocorre na magnitude das projeções de consumo e para qual modelo as projeções são maiores, ou seja, qual modelo climático projeta maiores consumos. O que se observa que a depender da região do país, o modelo pode projetar maiores ou menores vazões, não se podendo identificar claramente um modelo que projete maiores vazões de consumo e um que projete menores vazões de consumo.

O que se conseguiu identificar foi que para aproveitamentos hidrelétricos que estão localizados nas regiões norte e nordeste, espera-se um aumento maior no consumo proporcionalmente, uma vez que, o aumento da temperatura projetado pelos modelos climáticos para essas regiões tende a ser maiores, quando comparados com os aumentos da temperatura nas regiões sul e sudeste.

O sudeste pode ser considerado uma zona de transição, podendo ser maiores ou menores as projeções a depender da região do sudeste que o aproveitamento está localizado, do cenário e, principalmente, do modelo climático.

5.6. Projeção de Vazões com Incorporação de Mudanças Climáticas e Usos Consuntivos da Água

Nas Figura 64 a Figura 68 são escolhidas cinco usinas hidrelétricas, onde são apresentadas as médias mensais das vazões do período histórico e as médias mensais

projetadas para os cinco modelos climáticos e dois cenários de emissão. Vale ressaltar que nesses resultados o período futuro não está dividido.

Foram mantidas as escalas dos gráficos quando se analisou uma usina, para que se pudesse fazer melhor comparação dos resultados e da variação no período futuro em termos de vazões médias. Nesse caso, inicialmente não foram consideradas as vazões dos usos consuntivos da água que serão analisadas posteriormente.

Nas Tabelas 12 a 16 são apresentados os valores das vazões médias de longo termo para os períodos histórico (1970-2014) e períodos futuros (2015-2060 e 2061-2100), além disso, são indicadas as variações percentuais médias de cada um dos períodos futuros em relação ao período histórico para os dois cenários dos modelos climáticos (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

Figura 64 Vazões médias mensais da UHE Mascarenhas na BH Doce, cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.



Tabela 12 - Resumo das variações da QMLT das vazões médias UHE Mascarenhas

Modelo	QMLT (m³/s)			Variação	
	Histórico	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
ACCESS	756	657	682	-13%	-10%
CanESM	703	440	309	-37%	-56%
INM	752	625	585	-17%	-22%
IPSL	713	603	514	-15,4	-27%
MPI	737	620	564	-16%	-23%

A partir da Figura 64 e dos resultados apresentados na Tabela 12, observa-se uma redução consistente das vazões médias de longo prazo (QMLT) para a UHE Mascarenhas em todos os modelos climáticos avaliados e em ambas as disposições de emissão consideradas.

Essa convergência entre os modelos é um resultado relevante, pois indica que, independentemente das diferenças inerentes às parametrizações e representações dos processos climáticos de cada modelo, existe um sinal concreto de diminuição da disponibilidade hídrica futura na bacia do rio Doce.

Considerando que a geração hidrelétrica é diretamente dependente das vazões afluentes, tais reduções podem resultar na diminuição do potencial de geração de energia, afetando a segurança energética regional e aumentando a vulnerabilidade do sistema elétrico diante de períodos de escassez hídrica.

As reduções foram projetadas pelo modelo CanESM, que apresentaram decréscimos de 37% no cenário SSP2-4.5 e de 56% no cenário SSP5-8.5 em relação ao período histórico. Nessas condições, a vazão média de longo prazo seria reduzida de 703 m³/s para apenas 440 m³/se 309 m³/s, respectivamente.

Caso essas projeções se concretizem, os impactos sobre a operação da UHE Mascarenhas seriam extremamente severos, podendo comprometer significativamente sua capacidade de geração. Embora os resultados do CanESM se destaquem pela magnitude das reduções, não é interessante descartá-los, uma vez que representam uma das possíveis trajetórias de evolução climática simuladas pelos modelos globais utilizados, embora pouco provável.

Por outro lado, os modelos ACCESS, INM, IPSL e MPI apresentaram reduções mais moderadas, porém ainda expressivas. No cenário SSP2-4.5, as diminuições variaram entre 13% e 17%, enquanto no SSP5-8.5 variaram entre 10% e 27%.

Esses valores sugerem uma tendência mais conservadora quando comparado ao CanESM, mas ainda assim indicam perdas significativas na disponibilidade hídrica da bacia.

Mesmo reduções da ordem de 10% a 20% podem produzir impactos relevantes na geração hidrelétrica, especialmente em sistemas cuja operação depende da regularização de vazões e da manutenção dos níveis de armazenamento dos reservatórios ao longo do ano.

Um aspecto importante a ser destacado é que o agravamento das reduções no cenário SSP5-8.5 em praticamente todos os modelos reforça a influência das emissões de

gases de efeito estufa sobre a disponibilidade hídrica futura, o que vem de encontro com as projeções do IPCC (2023).

Assim, os resultados obtidos sugerem que cenários de maiores emissões tendem a produzir impactos mais severos sobre as vazões afluentes e, conseqüentemente, sobre a geração hidrelétrica.

Portanto, embora exista variabilidade na magnitude das reduções projetadas pelos diferentes modelos climáticos, o principal resultado deste conjunto de simulações é a concordância quanto à tendência de diminuição das vazões médias de longo prazo na bacia do rio Doce.

Figura 65 Vazões médias mensais da UHE Jirau na BH Madeira, cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

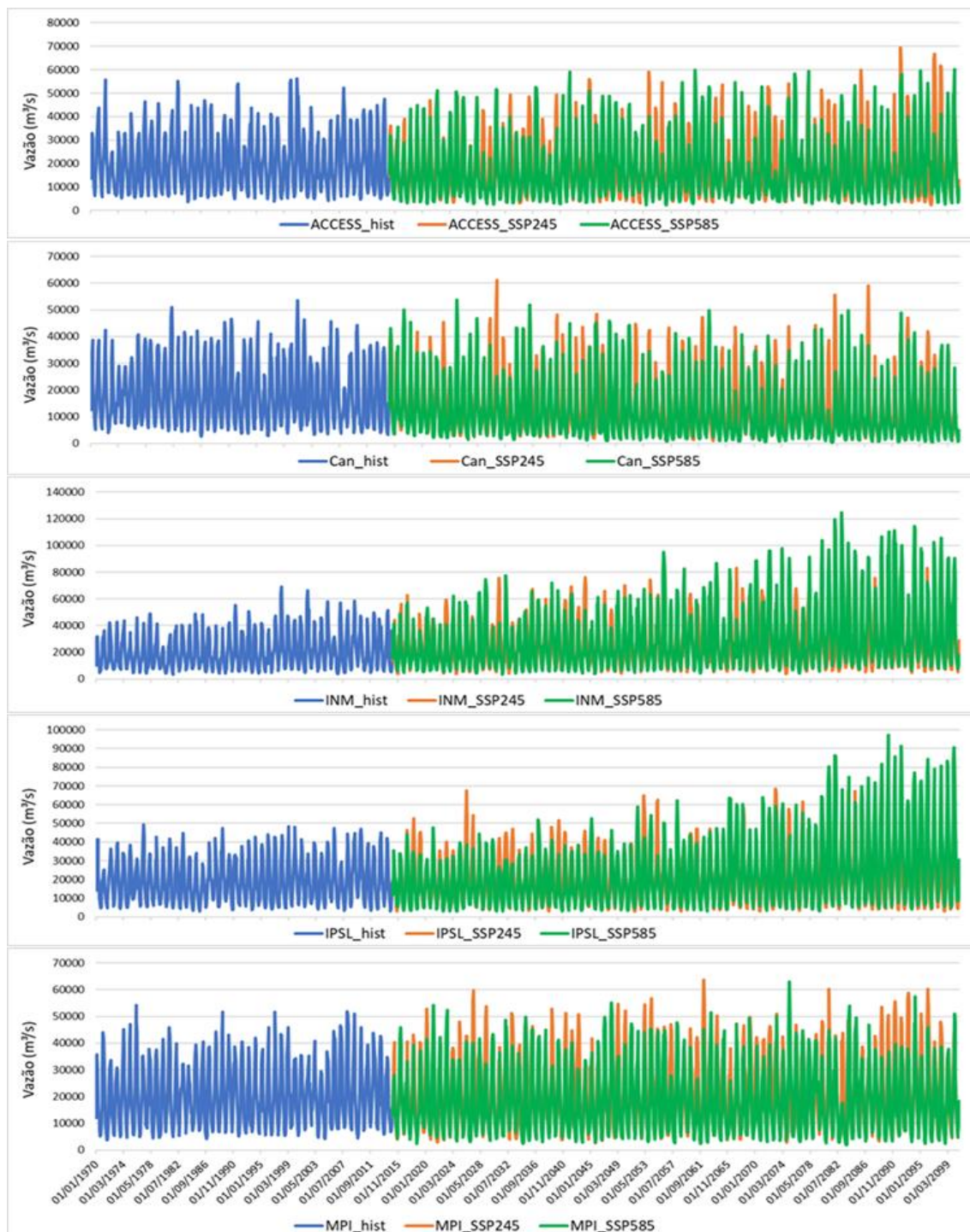


Tabela 13 - Resumo das variações da QMLT das vazões médias UHE Jirau.

Modelo	QMLT (m³/s)			Variação	
	Histórico	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
ACCESS	20651	18816	18198	-9%	-12%
CanESM	18754	14564	12971	-22%	-30%
INM	21056	26501	30701	+26%	+46%
IPSL	19621	21364	23716	+9%	+21%
MPI	20775	21175	19379	+2%	-7%

Da Figura 65 e Tabela 13 observa-se uma elevada variabilidade nas projeções de vazões médias de longo prazo (QMLT) para a UHE Jirau, localizada na bacia hidrográfica do rio Madeira. Os resultados para a bacia do Madeira apresentam respostas divergentes, com projeções tanto de aumento quanto de redução da disponibilidade hídrica.

Essa diferença evidencia a complexidade dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos brasileiros, uma vez que os efeitos podem variar significativamente entre as diferentes regiões do país em função de suas características climáticas e hidrológicas.

Os modelos ACCESS e CanESM indicam reduções nas vazões médias de longo prazo para ambos os cenários avaliados. O ACCESS projeta diminuições de 9% no cenário SSP2-4.5 e de 12% no SSP5-8.5, enquanto o CanESM apresenta reduções mais expressivas, de 22% e 30%, respectivamente.

Caso as projeções se concretizem, poderá ocorrer uma diminuição da disponibilidade hídrica para geração de energia na UHE Jirau, reduzindo o potencial de produção hidrelétrica e aumentando a vulnerabilidade do sistema a períodos de menor afluência. Assim como observado em outras bacias, as reduções tornam-se mais intensas no cenário SSP5-8.5, fazendo com que maiores níveis de emissões tendam a potencializar os impactos sobre o regime hidrológico.

Por outro lado, os modelos INM e IPSL projetam aumentos consideráveis das vazões futuras. O INM apresenta os maiores incrementos entre todos os modelos, com aumentos de 26% no cenário SSP2-4.5 e de 46% no SSP5-8.5.

Embora esses valores possam parecer elevados quando comparados com demais resultados, eles demonstram a incerteza relacionada às projeções climáticas e hidrológicas de longo prazo. O IPSL também aponta para aumentos relevantes, da ordem de 9% e 21%, respectivamente.

O modelo MPI apresenta comportamento intermediário quando comparado aos demais. No cenário SSP2-4.5 é projetado um pequeno aumento de 2% nas vazões médias, enquanto no cenário SSP5-8.5 ocorre uma redução de 7%. Esse resultado demonstra que pequenas alterações nos padrões climáticos futuros podem ser suficientes para modificar o sinal das projeções, reforçando a elevada sensibilidade da bacia do rio Madeira às incertezas presentes nos modelos climáticos globais.

Um aspecto importante observado é que cinco indicam aumento das vazões futuras e cinco apontam redução. Isso demonstra que não existe um sinal predominante de mudança para a bacia do Madeira e em todos os casos, quando o modelo projetado de

redução das vazões, a magnitude da redução é maior no cenário SSP5-8.5 em comparação ao SSP2-4.5.

Dessa forma, os resultados para a UHE Jirau reforçam a importância de considerar múltiplos modelos climáticos em estudos de impactos das mudanças climáticas sobre a geração hidrelétrica.

Além disso, a incorporação de projeções climáticas e hidrológicas em estudos de longo prazo torna-se fundamental para subsidiar decisões relacionadas à expansão do sistema elétrico e à gestão integrada dos recursos hídricos.

Figura 66 Vazões médias mensais da UHE Itaipu na BH Paraná, cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

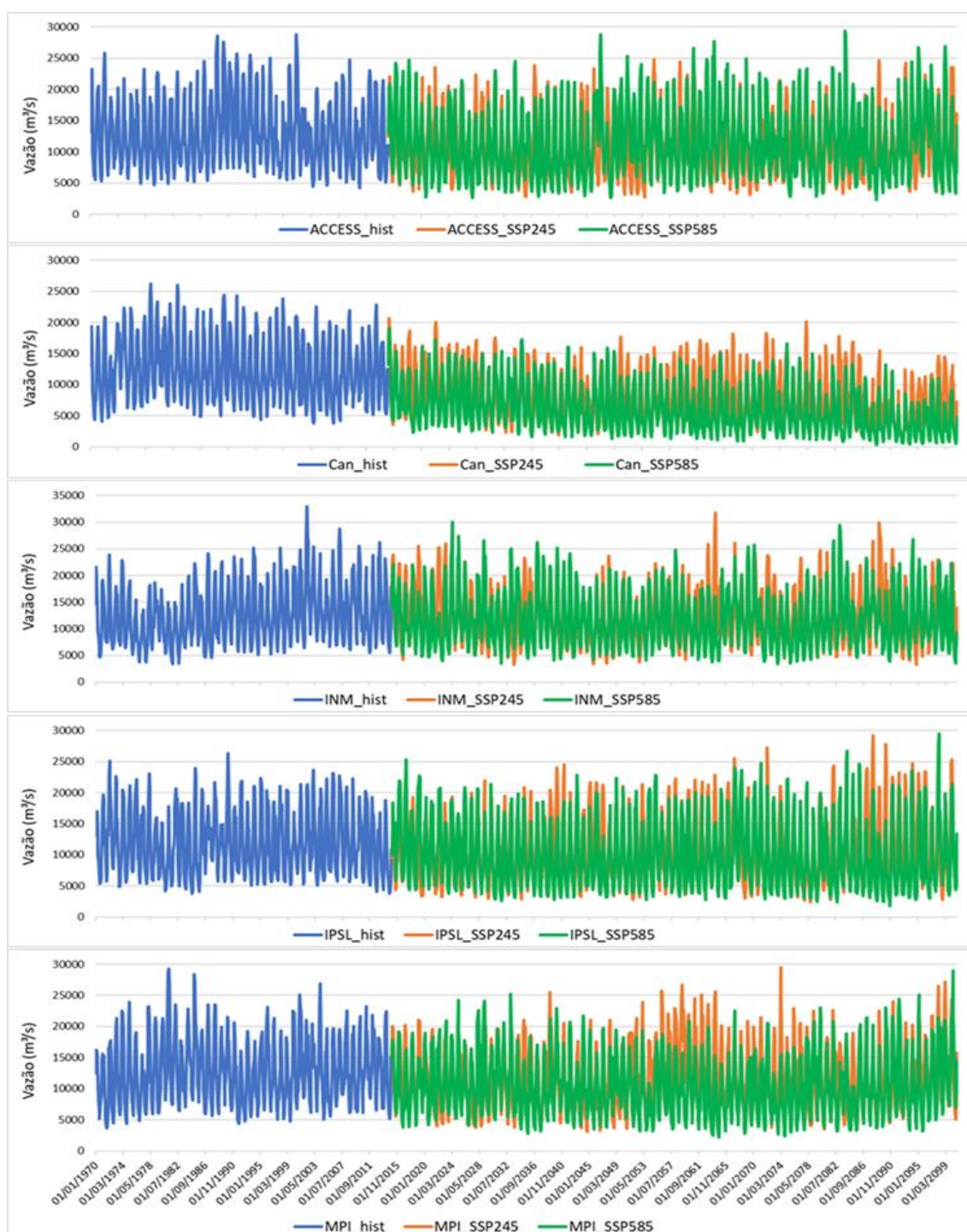


Tabela 14 - Resumo das variações da QMLT das vazões médias da UHE Itaipu.

Modelo	QMLT (m³/s)			Variação	
	Histórico	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
ACCESS	13026	11034	11549	-15%	-11%
CanESM	12503	8130	6149	-35%	-51%
INM	12750	12268	11850	-4%	-7%
IPSL	12030	10599	10212	-12%	-15%
MPI	12788	11738	10595	-8%	-17%

Com base nos resultados apresentados na Figura 66 e na Tabela 14, observa-se que as projeções da QMLT para a UHE Itaipu indicam uma tendência de redução das vazões futuras em relação ao período histórico, independentemente do modelo climático utilizado. Esse comportamento reforça o padrão já observado para outras usinas da bacia do rio Paraná, evidenciando que as mudanças climáticas podem provocar a diminuição da disponibilidade hídrica na região Sul e Sudeste do Brasil ao longo das próximas décadas.

Os resultados mostram que a variação histórica do QMLT entre aproximadamente 12.000 e 13.000 m³/s entre os modelos analisados. No entanto, para os cenários futuros SSP2-4.5 e SSP5-8.5, todos os modelos apontam redução das vazões médias.

O modelo CanESM é o que apresenta as maiores reduções entre todos os modelos avaliados. Para esse modelo, a vazão média passa de 12.503 m³/s no período histórico para 8.130 m³/s no cenário SSP2-4.5 e para apenas 6.149 m³/s no cenário SSP5-8.5. Isso representa reduções de 35% e 51%, respectivamente.

Por outro lado, os modelos INM, IPSL, MPI e ACCESS apresentam reduções mais moderadas. O modelo INM, por exemplo, indica as menores variações entre todos os modelos desenvolvidos, com redução de apenas 4% no cenário SSP2-4.5 e 7% no SSP5-8.5. Os modelos IPSL e MPI apresentam comportamento semelhante, projetando reduções entre 8% e 17%, dependendo do cenário escolhido. Esses resultados sugerem que, embora a tendência de diminuição das vazões seja comum entre os modelos, a magnitude dessa redução ainda possui variabilidade específica.

O modelo ACCESS apresenta um comportamento interessante quando comparado aos demais. A vazão histórica simulada é de 13.026 m³/s, diminuindo para 11.034 m³/s no cenário SSP2-4.5 e para 11.549 m³/s no cenário SSP5-8.5. Isso corresponde a reduções de 15% e 11%, respectivamente. Nesse caso, ocorre uma inversão em relação ao comportamento normalmente esperado, pois o cenário SSP5-8.5, associado às maiores emissões de gases de efeito estufa, apresenta uma redução menor que a observada no SSP2-4.5.

De maneira geral, os resultados indicam que a UHE Itaipu poderá enfrentar condições de menor disponibilidade hídrica no futuro, o que poderá impactar diretamente a geração de energia da usina. Como Itaipu é uma das principais fontes de energia hidrelétrica do Brasil e da América do Sul, reduções persistentes nas vazões podem influenciar o planejamento e a operação do sistema elétrico.

Figura 67 Vazões médias mensais da UHE Moxotó na BH São Francisco, cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

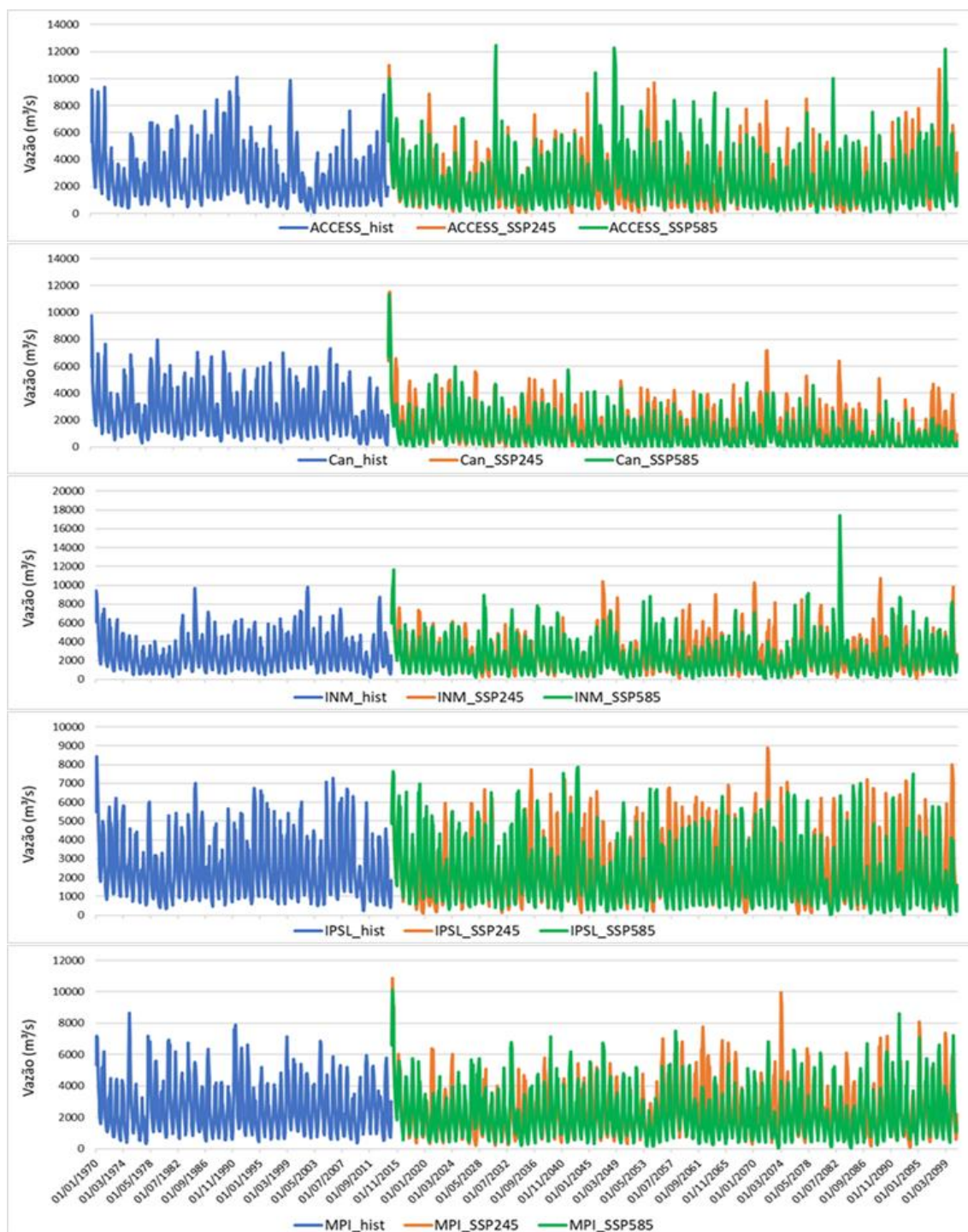


Tabela 15 - Resumo das variações da QMLT das vazões médias UHE Moxotó.

Modelo	QMLT (m³/s)			Variação	
	Histórico	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
ACCESS	2869	2309	2511	-19%	-12%
CanESM	2673	1499	1089	-44%	-59%
INM	2821	2600	2501	-8%	-11%
IPSL	2630	2431	2269	-7%	-14%
MPI	2691	2458	2257	-9%	-16%

Com base nos resultados apresentados na Figura 67 e na Tabela 15, observa-se que as projeções de vazão média de longo prazo (QMLT) para a UHE Moxotó indicam uma redução das vazões futuras em todos os modelos climáticos analisados.

Existe concordância entre os modelos quanto ao sinal de mudança, ou seja, todos apontam para uma diminuição da disponibilidade hídrica na bacia do rio São Francisco ao longo do período futuro. Entretanto, a intensidade dessas reduções varia entre os modelos, evidenciando as incertezas específicas às projeções climáticas.

Nos cenários futuros SSP2-4.5 e SSP5-8.5, todos os modelos indicam redução das vazões em comparação ao período histórico. Esse resultado é particularmente relevante para a bacia do rio São Francisco, que já convive com períodos frequentes de estiagem e apresenta elevada vulnerabilidade à deficiência hídrica.

Entre os modelos avaliados, o CanESM se destaca por apresentar as maiores reduções projetadas. A QMLT passou de 2.673 m³/s no período histórico para 1.499 m³/s no cenário SSP2-4.5 e para apenas 1.089 m³/s no cenário SSP5-8.5. Essas alterações tiveram reduções de 44% e 59%, respectivamente, indicando um cenário bastante crítico para a disponibilidade de água na bacia do São Francisco caso projeções semelhantes venham a se concretizar.

Os demais modelos apresentam reduções mais moderadas, mas ainda assim significativas. O modelo INM projeta as menores variações, com reduções de 8% no cenário SSP2-4.5 e 11% no SSP5-8.5. Os modelos IPSL e MPI apresentam resultados intermediários, diminuindo reduções que variam entre 7% e 16%, dependendo do cenário escolhido. Já o modelo ACCESS projeta reduções de 19% para o cenário SSP2-4.5 e 12% para o SSP5-8.5, apresentando novamente uma inversão entre os cenários, com uma redução mais acentuada no cenário de menor emissão.

De forma geral, observa-se que o cenário SSP5-8.5 tende a apresentar reduções mais intensas que o SSP2-4.5 para a maioria dos modelos, especialmente no caso do CanESM, IPSL e MPI.

Os resultados são particularmente preocupantes a bacia do rio São Francisco que está inserida no semiárido nordestino, área historicamente marcada pela irregularidade das chuvas e pela ocorrência frequente de secas prolongadas.

Portanto, os resultados evidenciam um cenário de atenção para a bacia do rio São Francisco. Embora exista variabilidade entre os modelos climáticos, todos indicam redução das vazões médias futuras na UHE Moxotó.

Figura 68 Vazões médias mensais da UHE Foz do Capecó na BH Uruguai, cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

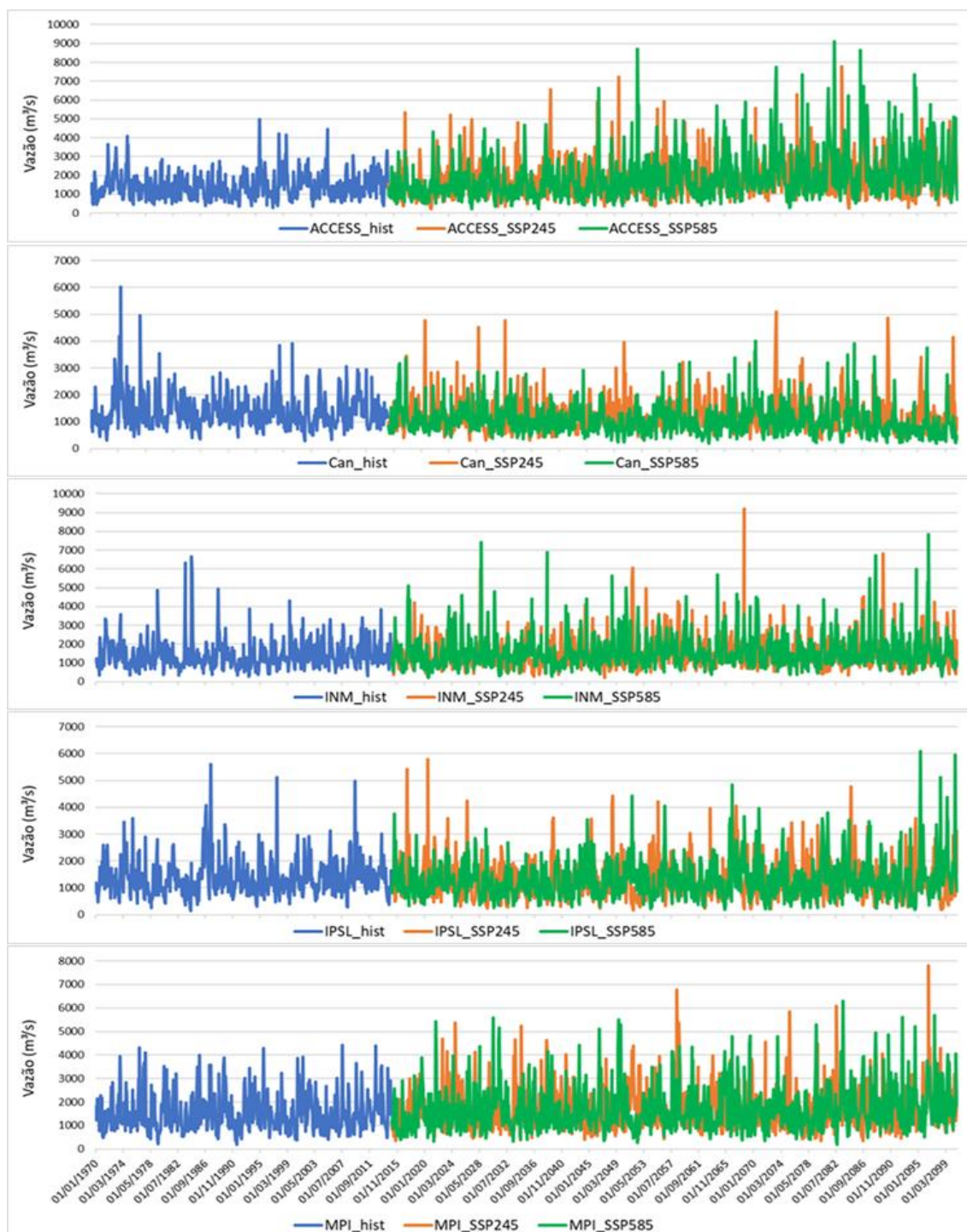


Tabela 16 - Resumo das variações da QMLT das vazões médias da UHE Foz do Chapecó.

Modelo	QMLT (m³/s)			Variação	
	Histórico	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
ACCESS	1438	1768	1917	+23%	+33%
CanESM	1390	1219	1045	-12%	-25%
INM	1430	1510	1591	+6%	+11%
IPSL	1382	1279	1284	-7,4%	-7%
MPI	1512	1723	1692	+14%	+12%

Com base nos resultados apresentados na Figura 68 e na Tabela 16 Tabela, observa-se que as projeções de QMLT para a UHE Foz do Chapecó apresentam um comportamento diferente daquele observado em outras usinas demonstradas. Enquanto em grande parte dos casos predominam reduções nas vazões futuras, nesta usina há uma tendência de aumento das vazões projetadas na maioria dos modelos climáticos. Esse resultado está associado às características climáticas da região Sul do Brasil.

Os resultados mostram que três dos cinco modelos climáticos projetam aumentos nas vazões médias em pelo menos um dos cenários. Os maiores acréscimos são observados no modelo ACCESS, que apresentam aumento de 23% no cenário SSP2-4.5 e de 33% no SSP5-8.5, elevando a QMLT de 1.438 m³/s no período histórico para 1.768 m³/se 1.917 m³/s, respectivamente.

Os modelos INM e MPI também indicam aumentos nas vazões, embora de menor magnitude. No caso do INM, os acréscimos são de 6% e 11%, enquanto o MPI projeta aumentos de 14% no SSP2-4.5 e 12% no SSP5-8.5.

Por outro lado, os modelos CanESM e IPSL apontam reduções nas vazões futuras. Novamente, o CanESM apresenta as maiores reduções entre os modelos avaliados, com diminuição de 12% no cenário SSP2-4.5 e 25% no SSP5-8.5. Apesar de expressivas, essas reduções são menos severas do que aquelas observadas para usinas localizadas em outras bacias hidrográficas, especialmente na região Nordeste.

No modelo MPI, embora ambos os cenários indiquem aumento das vazões, o crescimento projetado para o cenário SSP5-8.5 (+12%) é reduzido ao encontrado no SSP2-4.5 (+14%). Esse comportamento demonstra que a resposta hidrológica da bacia não depende apenas da intensidade dos cenários de emissões, mas também das particularidades de cada modelo climático.

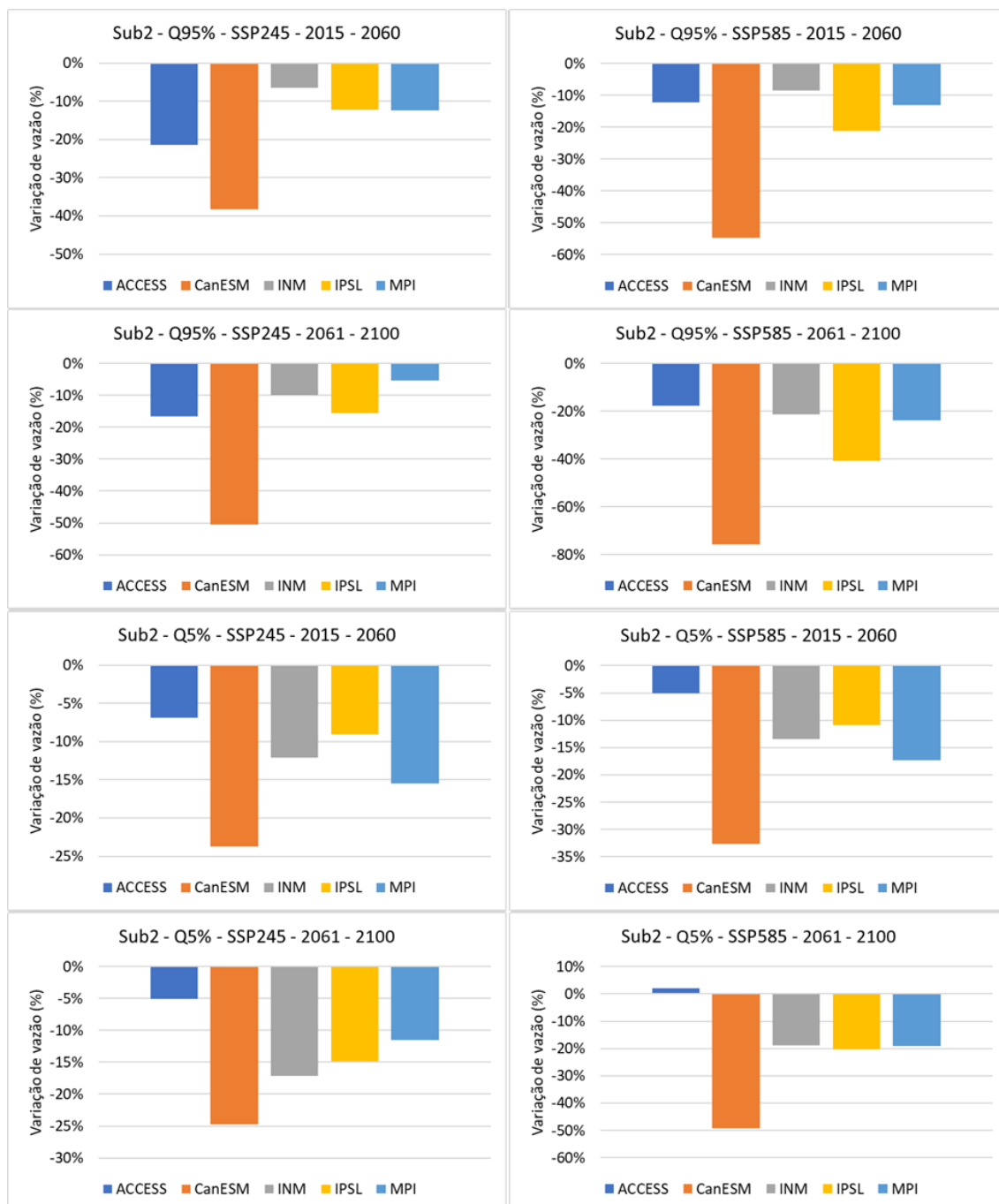
De forma geral, os resultados sugerem um cenário de variações positivas da QMLT para a UHE Foz do Chapecó quando comparado a demais usinas avaliadas. Embora existam incertezas e divergências entre os modelos, a predominância de especificações positivas indica a possibilidade de manutenção ou até aumento da disponibilidade hídrica futura na bacia do rio Uruguai.

Outra análise relevante a se fazer das variações das projeções de vazão é com relação às vazões extremas. Pode-se colocar o enfoque da apresentação dos resultados das vazões de cheia (Q5%) e vazões de estiagem ou de seca (Q95%), esta última muito importante, pois a partir dela são fornecidas as outorgas de usos da água.

Nas Figura 69 a Figura 73 são apresentados gráficos com as variações percentuais das vazões extremas para os dois períodos futuros e dois cenários. À esquerda nas figuras, são apresentadas a variação do cenário SSP2-4.5 e à direita o cenário SSP5-8.5.

Após cada figura são discutidos os principais resultados para cada modelo em termos das variações das vazões extremas do futuro em relação as vazões extremas do período histórico.

Figura 69 Curvas de permanência da UHE Sá Carvalho na bacia do rio Doce para os períodos futuros e cenários.



Analizando a Figura 69, que apresenta as variações das vazões extremas da UHE Sá Carvalho na bacia hidrográfica do rio Doce, para os dois períodos futuros e dois cenários de em comparação com o período histórico.

Verifica-se que com exceção dos resultados do modelo climático CanESM que projeta grande redução para toda a curva nos dois cenários, a maior diferença observada nas curvas de permanência está nas vazões extremas (mínimas e máximas), onde se verifica maior descolamento entre as curvas.

Explorando isoladamente os resultados dos modelos climáticos em termos de variações médias das vazões extremas Q5% (máxima) e Q95% (mínima) pode-se apresentar a Tabela 17:

Tabela 17 - Variação percentual das vazões extremas da UHE Sá Carvalho.

Período/cenário	Vazões mínimas (Q95%)				
	ACCESS	CanESM	INM	IPSL	MPI
2015-2060 SSP2-4.5	-21,45%	-38,22%	-6,57%	-12,24%	-12,47%
2015-2060 SSP5-8.5	-12,31%	-54,71%	-8,56%	-21,07%	-13,08%
2061-2100 SSP2-4.5	-16,67%	-50,54%	-9,99%	-15,52%	-5,23%
2061-2100 SSP5-8.5	-17,61%	-75,75%	-21,35%	-40,67%	-23,92%
Período/cenário	Vazões máximas (Q5%)				
	ACCESS	CanESM	INM	IPSL	MPI
2015-2060 SSP2-4.5	-6,90%	-23,74%	-12,07%	-9,04%	-15,47%
2015-2060 SSP5-8.5	-5,05%	-32,64%	-13,38%	-10,88%	-17,28%
2061-2100 SSP2-4.5	-5,05%	-24,79%	-17,11%	-14,86%	-11,49%
2061-2100 SSP5-8.5	1,97%	-49,35%	-18,78%	-20,25%	-19,01%

A Tabela 17 indica reduções consistentes das vazões mínimas (Q95%) em praticamente todos os modelos climáticos, períodos e cenários analisados. As quedas variam de aproximadamente -6,6% a -77,6%, com maior severidade projetada pelos modelos CanESM e IPSL.

O comportamento geral sugere intensificação da estimativa hidrológica e redução da disponibilidade de água em períodos críticos, especialmente no cenário SSP5-8.5 e no horizonte mais distante (2061–2100).

Para a geração hidrelétrica, isso implica menor energia firme, maior risco de redução de despacho em períodos secos e necessidade de maior cooperação com outras fontes de geração.

No período 2015–2060 sob o cenário SSP2-4.5, observa-se redução moderada a forte das vazões mínimas. O ACCESS projeta queda de -21,45%, o CanESM de -38,22%, o INM de -6,57%, o IPSL de -12,24% e o MPI de -12,47%.

Embora exista dispersão entre os modelos, a direção do sinal é predominantemente negativa. Em sistemas hidrelétricos, esse comportamento tende a

reduzir a confiabilidade da geração durante os meses secos, exigindo maior preservação de armazenamento e possivelmente aumentando a dependência de fontes complementares.

Quando se considera o mesmo período (2015–2060) sob SSP5-8.5, o impacto sobre as vazões mínimas torna-se mais intenso. O CanESM projeta redução de -54,71% e o IPSL de -21,07%, enquanto ACCESS, INM e MPI indicam quedas entre aproximadamente -8,6% e -13,1%.

No horizonte 2061–2100 sob SSP2-4.5, as reduções permanecem relevantes. O CanESM indica -50,54%, o ACCESS -16,67%, o IPSL -15,52%, o MPI -5,23% e o INM -9,99%. Em comparação com o período anterior, nota-se persistência de condições mais secas e, em alguns modelos, intensificação das reduções.

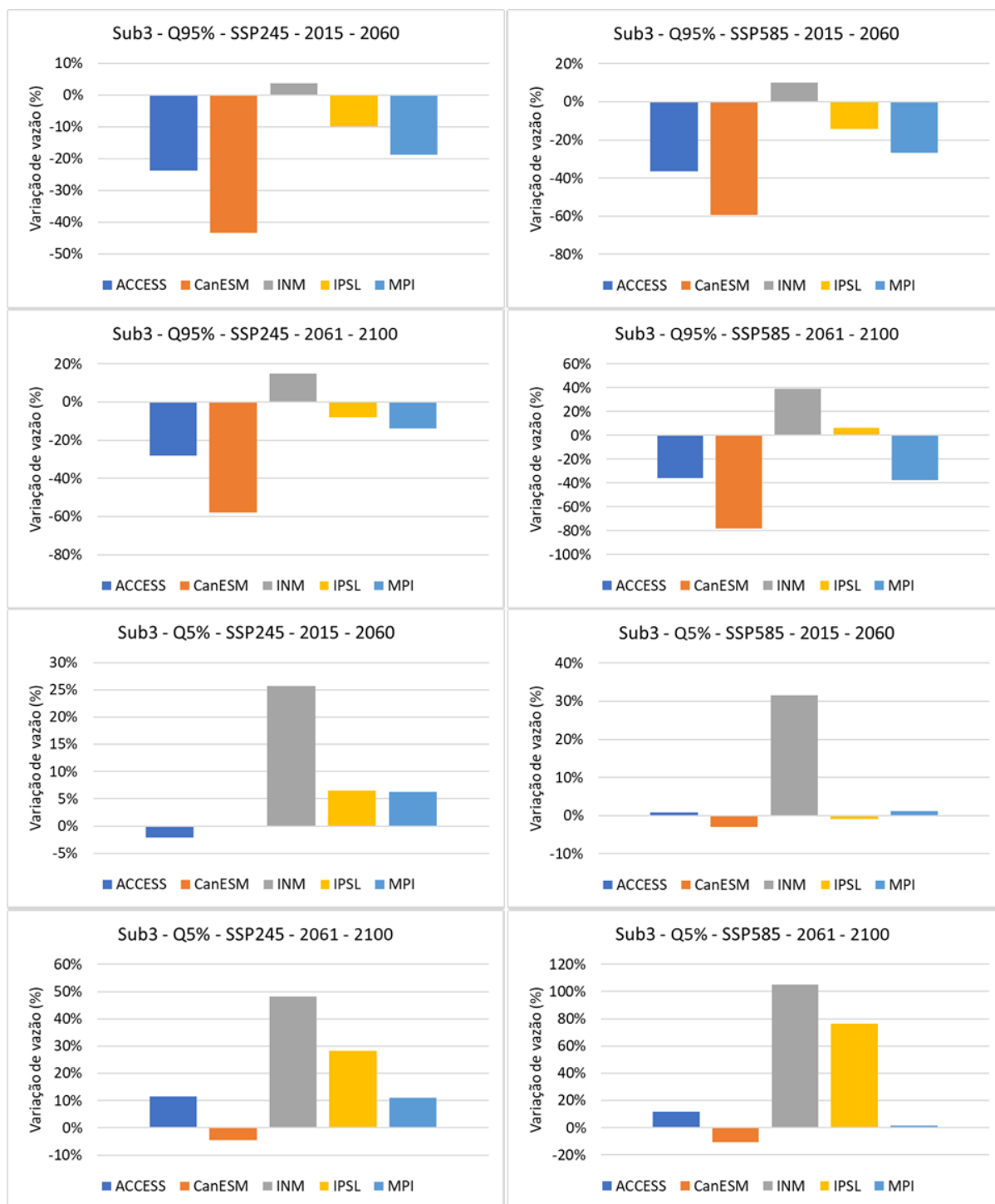
O cenário mais crítico é 2061–2100 sob SSP5-8.5. O CanESM projeta redução extrema de -77,55%, o IPSL de -40,67%, o MPI de -23,92%, o INM de -21,35% e o ACCESS de -17,61%. A convergência entre modelos na direção negativa, associada à magnitude das reduções, aponta para um aumento expressivo da severidade das estiagens.

Comparando os quatro casos, observa-se um padrão claro: as reduções das vazões mínimas tendem a aumentar tanto com o avanço temporal (de 2015–2060 para 2061–2100) quanto com o agravamento do cenário climático (de SSP2-4.5 para SSP5-8.5).

Em termos da análise energética, esse cenário implica forte comprometimento da capacidade de geração nos períodos de baixa afluência, necessidade de expansão de armazenamento energético e provável aumento da participação de fontes térmicas, eólicas e solares para garantir a segurança energética.

Assim, os resultados reforçam a necessidade de incorporar cenários climáticos nas análises de expansão e operação do setor elétrico, especialmente em sistemas fortemente dependentes da disponibilidade hídrica.

Figura 70 Curvas de permanência da UHE Santo Antônio na bacia do rio Madeira para os períodos futuros e cenários.



Analisando a Figura 70, que apresenta as curvas de permanência para a UHE Santo Antônio na bacia hidrográfica do rio Doce, para os dois períodos futuros e dois cenários de emissão em comparação com o período histórico.

Analisando apenas os resultados dos modelos climáticos em termos de variações médias das vazões extremas Q5% (máxima) e Q95% (mínima) pode-se apresentar a Tabela 18.

Tabela 18 - Variação percentual das vazões extremas da UHE Santo Antônio.

Período/cenário	Vazões mínimas (Q95%)				
	ACCESS	CanESM	INM	IPSL	MPI
2015-2060 SSP2-4.5	-23,84%	-43,46%	3,68%	-9,92%	-18,73%
2015-2060 SSP5-8.5	-36,54%	-59,26%	10,24%	-14,21%	-26,63%
2061-2100 SSP2-4.5	-28,21%	-57,81%	14,80%	-8,12%	-13,75%
2061-2100 SSP5-8.5	-35,95%	-78,23%	39,04%	6,34%	-37,75%
Período/cenário	Vazões máximas (Q5%)				
	ACCESS	CanESM	INM	IPSL	MPI
2015-2060 SSP2-4.5	-2,09%	0,05%	25,69%	6,50%	6,30%
2015-2060 SSP5-8.5	0,91%	-2,98%	31,56%	-0,92%	1,24%
2061-2100 SSP2-4.5	11,40%	-4,50%	48,29%	28,27%	10,96%
2061-2100 SSP5-8.5	11,89%	-10,73%	104,97%	76,49%	1,37%

A análise da Tabela 18 revela um comportamento contrastante entre os modelos climáticos para as vazões mínimas (Q95%) e máximas (Q5%). De modo geral, os modelos ACCESS, CanESM e MPI apresentam reduções expressivas das vazões mínimas em praticamente todos os cenários futuros, enquanto o INM projeta aumentos progressivos e o IPSL apresenta uma tendência de reduções na maior parte dos cenários e aumento apenas no horizonte mais distante no cenário SSP5-8.5.

No período de 2015–2060 sob o cenário SSP2-4.5, as projeções de vazões mínimas indicam reduções de 23,84% (ACCESS), 43,46% (CanESM), 9,92% (IPSL) e 18,73% (MPI), enquanto o modelo INM projeta um pequeno aumento de 3,68%. A predominância de reduções sugere menor disponibilidade hídrica durante os períodos críticos do ano, com potencial comprometimento da regularização natural dos cursos d'água.

Sob o cenário SSP5-8.5 para 2015–2060, observa-se uma intensificação das reduções nas vazões mínimas. O ACCESS passa a indicar redução de 36,54%, o CanESM de 59,26%, o IPSL de 14,21% e o MPI de 26,63%, enquanto o INM projeta aumento de 10,24%. Comparativamente ao SSP2-4.5, a maior parte dos modelos aponta agravamento das condições de estimativa, evidenciando o efeito de um cenário de maiores emissões sobre o regime hidrológico.

No horizonte de 2061–2100 sob SSP2-4.5, as reduções permanecem para a maioria dos modelos. O CanESM projeta queda de 57,81%, o ACCESS de 28,21%, o MPI de 13,75% e o IPSL de 8,12%, enquanto o INM indica aumento de 14,80%. A

persistência dessa tendência ao longo do século sugere que mesmo em um cenário intermediário de emissões há impactos relevantes sobre a disponibilidade hídrica.

O cenário mais severo ocorre em 2061–2100 sob SSP5-8.5, quando são observadas as maiores reduções das vazões mínimas. O CanESM projetou redução de 78,23%, o MPI de 37,75% e o ACCESS de 35,95%, enquanto o IPSL e o INM indicam aumentos de 6,34% e 39,04%, respectivamente.

A análise das vazões máximas (Q5%) reforça a percepção de aumento da variabilidade hidrológica futura. Enquanto alguns modelos apresentam alterações discretas, destacam-se os aumentos expressivos projetados pelo INM, que variação de 25,69% a 104,97%, e pelo IPSL, que alcança 76,49% no cenário SSP5-8.5 para 2061–2100. Esse comportamento indica maior ocorrência de eventos de vazão elevada e possivelmente de cheias mais intensas.

Para a geração hidrelétrica, o aumento das vazões máximas pode representar oportunidades de maior produção em determinados períodos, mas também aumenta os riscos de vertimento, perdas de potencial energético e pressão sobre a infraestrutura hidráulica. Assim, a combinação entre redução das vazões mínimas e aumento das vazões máximas sugere um regime hidrológico mais extremo e irregular, exigindo estratégias de adaptação que contemplem tanto a gestão da escassez hídrica quanto o controle dos eventos de cheia.

Figura 71 Curvas de permanência da UHE Chavantes na bacia do rio Paraná para os períodos futuros e cenários.



Analisando a Figura 71, que apresenta as curvas de permanência para a UHE Chavantes na bacia hidrográfica do rio Paraná, para os dois períodos futuros e dois cenários de emissão em comparação com o período histórico.

Avaliando os resultados dos modelos climáticos em termos de variações médias das vazões extremas Q5% (máxima) e Q95% (mínima) pode-se apresentar a Tabela 19:

Tabela 19 - Variação percentual das vazões extremas da UHE Chavantes.

Período/cenário		Vazões mínimas (Q95%)				
		ACCESS	CanESM	INM	IPSL	MPI
2015-2060	SSP2-4.5	-29,16%	-62,12%	-8,84%	-34,43%	-18,24%
2015-2060	SSP5-8.5	-35,43%	-81,11%	-13,21%	-34,93%	-16,24%
2061-2100	SSP2-4.5	-18,36%	-68,04%	8,62%	-41,82%	-3,10%
2061-2100	SSP5-8.5	-11,91%	-100%	-2,83%	-57,16%	-30,59%
Período/cenário		Vazões máximas (Q5%)				
		ACCESS	CanESM	INM	IPSL	MPI
2015-2060	SSP2-4.5	-15,12%	-23,82%	-5,51%	-13,35%	11,00%
2015-2060	SSP5-8.5	-11,19%	-33,90%	-3,85%	-12,41%	-3,39%
2061-2100	SSP2-4.5	-2,45%	-30,19%	0,10%	-7,22%	10,77%
2061-2100	SSP5-8.5	14,04%	-49,37%	-2,78%	-9,35%	14,87%

A análise das projeções de vazões mínimas (Q95%) demonstra uma tendência predominante de redução da disponibilidade hídrica em praticamente todos os cenários e modelos climáticos avaliados. Os maiores decréscimos são observados no modelo CanESM, que projeta reduções superiores a 60% em todos os cenários e ultrapassa 100% no período 2061–2100 sob SSP5-8.5.

Os modelos ACCESS, IPSL e MPI também apresentam reduções expressivas na maior parte das projeções, enquanto o INM apresenta comportamento menos severo e, em alguns casos, sinalizando pequenas elevações. De maneira geral, os resultados sugerem um cenário futuro caracterizado por menor disponibilidade de água nos períodos críticos.

No período de 2015 a 2060 no cenário SSP2-4.5, as projeções apontam reduções relevantes das vazões mínimas em todos os modelos, com exceção do INM, que apresenta decréscimos menores. As reduções variam de -8,84% (INM) a -62,12% (CanESM), passando por -29,16% (ACCESS), -34,43% (IPSL) e -18,24% (MPI). Esses resultados indicam que mesmo em um cenário intermediário de emissões há tendência de agravamento das condições de estimativa.

Quando se analisa o período de 2015 a 2060 sob SSP5-8.5, verifica-se uma intensificação dos impactos em praticamente todos os modelos. O CanESM projeta redução de 81,11%, enquanto ACCESS e IPSL indicam quedas de 35,43% e 34,93%, respectivamente. O MPI apresenta redução de 16,24% e o INM de 13,21%. Em comparação com o cenário SSP2-4.5 demonstra que o aumento das emissões potencializa a redução das vazões mínimas, tornando os períodos de baixa disponibilidade hídrica ainda mais severos.

No horizonte de 2061 a 2100 sob SSP2-4.5, os resultados mostram a continuidade da tendência de redução das vazões mínimas, embora com algumas diferenças entre os

modelos. O CanESM permanece decrescente a maior redução (-68,04%), seguido pelo IPSL (-41,82%), MPI (-3,10%) e ACCESS (-18,36%) e o INM, por sua vez, projeta aumento de 8,62%. A persistência de reduções expressivas até o final do século sugere que os efeitos das mudanças climáticas sobre o regime hidrológico poderão se tornar estruturais.

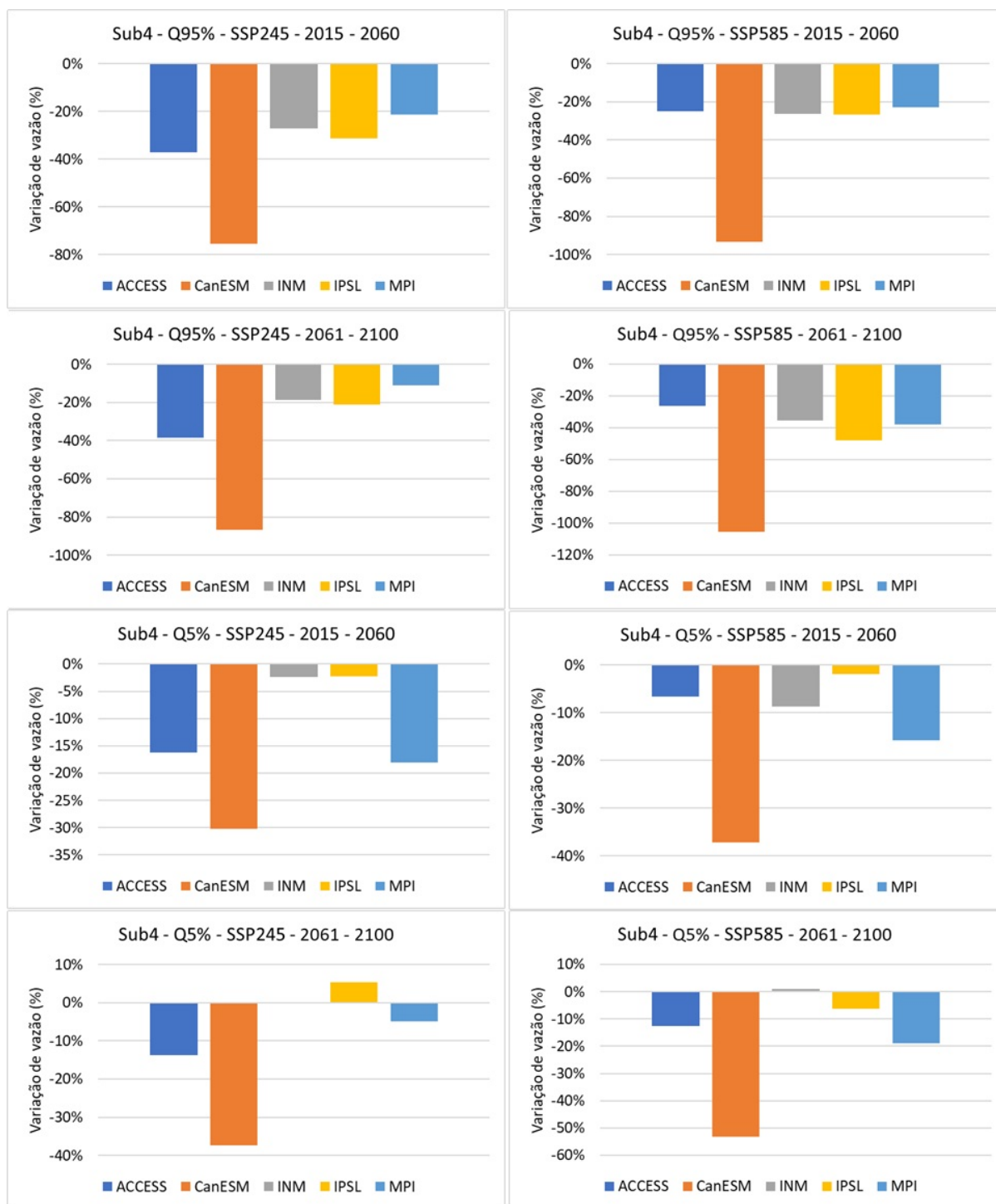
O cenário mais crítico é apresentado no período de 2061 a 2100 sob SSP5-8.5, em que ocorrem as maiores reduções das vazões mínimas. O CanESM projeta uma redução extrema de 100%, enquanto o IPSL indica queda de 57,16%, o MPI de 30,59%, o ACCESS de 11,91% e o INM de 2,83%. Embora exista variabilidade entre os modelos, o sinal predominante continua sendo de redução da disponibilidade hídrica.

A análise das vazões máximas (Q5%) complementa esse diagnóstico ao indicar reduções na maior parte dos cenários e modelos, especialmente para CanESM, ACCESS e IPSL. Entretanto, alguns modelos projetam aumentos, como o MPI, que apresenta incrementos de 11,00%, 10,77% e 14,87% em diferentes cenários, e o ACCESS, que indica aumento de 14,04% no final do século sob SSP5-8.5.

A combinação entre reduções acentuadas das vazões mínimas e alterações menos consistentes nas vazões máximas sugere uma possível redução da disponibilidade hídrica média associada a uma redistribuição temporal das vazões.

Para a geração hidrelétrica, esse comportamento tende a resultar em menor confiabilidade operacional, redução da energia firme e maior necessidade de planejamento adaptativo para garantir a segurança energética em um contexto de mudanças climáticas progressivamente mais intensas.

Figura 72 Curvas de permanência da UHE Sobradinho na bacia do rio São Francisco para os períodos futuros e cenários.



Analisando a Figura 72, que apresenta as curvas de permanência para a UHE Sobradinho na bacia hidrográfica do rio São Francisco, para os dois períodos futuros e dois cenários de emissão em comparação com o período histórico.

Verifica-se que com exceção dos resultados do modelo climático CanESM que projeta grande redução para toda a curva nos dois cenários, a maior diferença observada

nas curvas de permanência está nas vazões extremas (mínimas e máximas), onde se verifica maior descolamento entre as curvas.

Avaliando os resultados das projeções do MGB para os modelos climáticos em termos de variações médias das vazões extremas Q5% (máxima) e Q95% (mínima) pode-se apresentar a Tabela 20.

Tabela 20 - Variação percentual das vazões extremas da UHE Sobradinho.

Período/cenário	Vazões mínimas (Q95%)				
	ACCESS	CanESM	INM	IPSL	MPI
2015-2060 SSP2-4.5	-37.22%	-75.52%	-27.18%	-31.37%	-21.35%
2015-2060 SSP5-8.5	-25.03%	-93.39%	-26.19%	-26.61%	-23.01%
2061-2100 SSP2-4.5	-38.58%	-86.67%	-18.59%	-21.19%	-11.10%
2061-2100 SSP5-8.5	-26.41%	-100%	-35.27%	-47.91%	-37.81%
Período/cenário	Vazões máximas (Q5%)				
	ACCESS	CanESM	INM	IPSL	MPI
2015-2060 SSP2-4.5	-16.28%	-30.19%	-2.41%	-2.28%	-18.11%
2015-2060 SSP5-8.5	-6.67%	-37.18%	-8.71%	-1.97%	-15.85%
2061-2100 SSP2-4.5	-13.72%	-37.30%	0.11%	5.36%	-4.82%
2061-2100 SSP5-8.5	-12.51%	-53.09%	0.98%	-6.30%	-18.96%

Os resultados das vazões mínimas (Q95%) indicam uma tendência consistente de redução da disponibilidade hídrica em todos os modelos climáticos estudados, tanto para o período de 2015–2060 quanto para 2061–2100.

Como a Q95 representa condições de estimativa e é amplamente utilizado para avaliação da disponibilidade hídrica e da geração de energia em períodos críticos, as reduções observadas sugerem uma intensificação dos eventos de baixa vazão ao longo do século XXI.

Para o período de 2015–2060 no cenário SSP2-4.5, observa-se redução das vazões mínimas em todos os modelos, variando entre -21,35% (MPI) e -75,52% (CanESM). O modelo ACCESS projeta redução de -37,22%, enquanto o INM e o IPSL apresentam reduções de -27,18% e -31,37%, respectivamente. Os resultados apontam para uma diminuição significativa da disponibilidade hídrica durante os períodos futuros.

No cenário mais pessimista, para o período de 2015–2060, as reduções das vazões mínimas tornam-se ainda mais expressivas em alguns modelos. Destacam-se as projeções do CanESM (-93,39%) e do ACCESS (-25,03%), enquanto INM, IPSL e MPI apresentam reduções próximas de -23% a -27%.

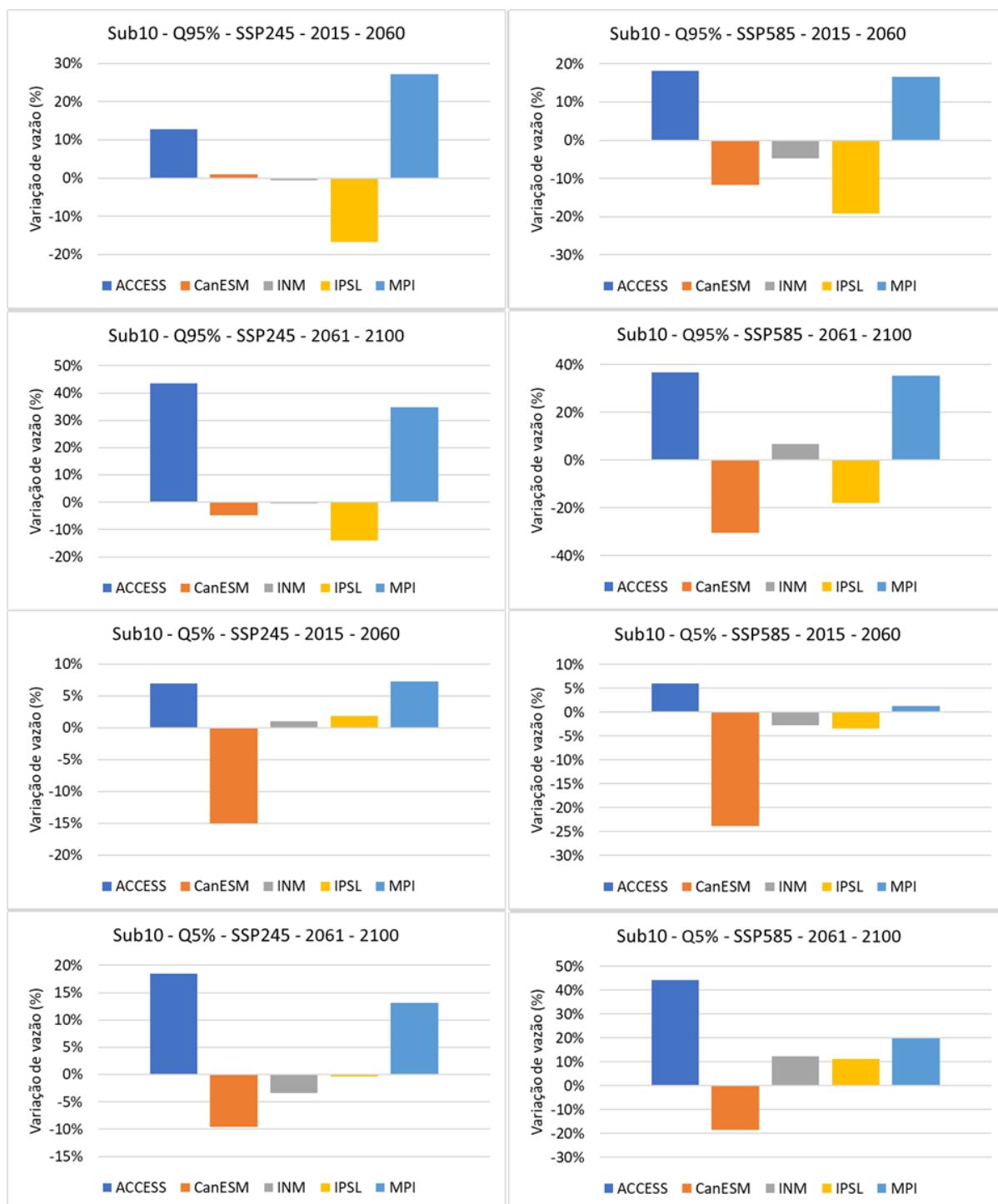
A magnitude dessas reduções indica um agravamento das condições de escassez hídrica, refletindo o impacto das maiores concentrações de gases de efeito estufa sobre os regimes hidrológicos.

As projeções para o período de 2061–2100 sob o cenário SSP2-4.5 mostram a continuidade da tendência de redução das vazões mínimas. As maiores reduções são observadas no CanESM (-86,67%) e no ACCESS (-38,58%), enquanto o INM apresenta redução de -18,59%, o IPSL de -21,19% e o MPI de -11,10%.

O cenário SSP5-8.5 para 2061–2100 apresenta as projeções mais críticas entre todas as estimativas avaliadas. O CanESM projeta uma redução extrema de -100%, enquanto o IPSL indica queda de -47,91%, o ACCESS de -26,41%, o INM de -35,27% e o MPI de -37,81%.

Uma análise conjunta dos cenários e períodos futuros demonstra que as vazões mínimas são particularmente sensíveis às mudanças climáticas, com reduções generalizadas independentemente do modelo utilizado. Além disso, observa-se uma tendência de agravamento dos impactos no cenário SSP5-8.5 e no horizonte mais distante (2061–2100), reforçando a influência do aumento das emissões sobre a disponibilidade hídrica.

Figura 73 Curvas de permanência da UHE São José na bacia do rio Uruguai para os períodos futuros e cenários.



Analisando a Figura 73, que apresenta as curvas de permanência para a UHE São José na bacia hidrográfica do rio Uruguai, para os dois períodos futuros e dois cenários de emissão em comparação com o período histórico.

Verifica-se que as projeções dos períodos futuros estão bastante aderentes às simulações do histórico, o que pode ser identificado uma vez que há apenas alguns

descolamentos entre as curvas principalmente nos modelos ACCESS e CanESM. Existem diferenças nas vazões extremas (mínimas e máximas), onde se verifica extensão das curvas principalmente nas vazões máximas.

Avaliando os resultados das projeções do MGB para os modelos climáticos em termos de variações médias das vazões extremas Q5% (máxima) e Q95% (mínima) pode-se apresentar a Tabela 21:

Tabela 21 - Variação percentual das vazões extremas da UHE São José.

Período/cenário	Vazões mínimas (Q95%)				
	ACCESS	CanESM	INM	IPSL	MPI
2015-2060 SSP2-4.5	12.83%	-13.15%	-0.11%	-16.70%	12.63%
2015-2060 SSP5-8.5	18.12%	-24.58%	-0.11%	-19.09%	5.77%
2061-2100 SSP2-4.5	43.52%	-17.61%	0.75%	-13.99%	17.28%
2061-2100 SSP5-8.5	36.63%	-28.85%	8.35%	-17.87%	21.83%
Período/cenário	Vazões máximas (Q5%)				
	ACCESS	CanESM	INM	IPSL	MPI
2015-2060 SSP2-4.5	6.97%	0.87%	-0.61%	1.81%	27.14%
2015-2060 SSP5-8.5	6.02%	-11.69%	-4.70%	-3.47%	16.58%
2061-2100 SSP2-4.5	18.44%	-4.73%	-0.33%	-0.36%	34.71%
2061-2100 SSP5-8.5	44.28%	-30.61%	6.72%	11.22%	35.43%

Os resultados projetados para as vazões mínimas (Q95%) e máximas (Q5%) indicam alterações importantes no regime hidrológico futuro, evidenciando tanto mudanças na disponibilidade hídrica durante os períodos de estimativa quanto às modificações na ocorrência de eventos de vazões altas.

As projeções mostram respostas distintas entre os modelos climáticos, porém revelam uma tendência geral de aumento das vazões mínimas em parte dos modelos e intensificação das vazões máximas em diversos cenários.

Para o período de 2015–2060 sob o cenário SSP2-4.5, as projeções de vazões mínimas apresentam comportamento heterogêneo entre os modelos. O ACCESS e o MPI indicam aumentos de 12,83% e 12,63%, respectivamente, enquanto o CanESM projeta redução de 13,15%, o IPSL de 16,70% e o INM praticamente não apresenta alteração (-0,11%). Esse resultado sugere que, apesar da tendência de melhoria das condições em alguns modelos, permanece uma incerteza específica quanto à evolução futura das vazões mínimas.

No cenário SSP5-8.5 para 2015–2060, observa-se um aumento das divergências entre os modelos. O ACCESS projeta aumento de 18,12% nas vazões mínimas, enquanto o MPI indica crescimento mais moderado de 5,77%. Em contrapartida, o CanESM apresenta grande redução de 24,58% e o IPSL de 19,09%, enquanto o INM permanece praticamente neutro (-0,11%).

As projeções para 2061–2100 sob o cenário SSP2-4.5 indicam uma tendência mais consistente de aumento das vazões mínimas. O modelo ACCESS projeta elevação de 43,52%, seguido pelo MPI com 17,28%, enquanto o INM apresenta aumento discreto de 0,75%. Apenas CanESM (-17,61%) e IPSL (-13,99%) apresentam reduções nas projeções.

No período de 2061–2100 no cenário SSP5-8.5, os aumentos das vazões mínimas tornam-se ainda mais expressivos em alguns modelos, alcançando 36,63% no ACCESS, 21,83% no MPI e 8,35% no INM. Entretanto, o CanESM (-28,85%) e o IPSL (-17,87%) continuam a diminuir reduções significativas.

Embora os resultados sugiram uma possível elevação da disponibilidade hídrica durante períodos de baixa vazão em parte das projeções, a persistência de cenários de redução em outros modelos evidencia a necessidade de cautela na interpretação dos resultados.

Em relação às vazões máximas (Q5%), os resultados apontam para uma tendência predominante de aumento dos eventos de alta vazão, especialmente nos modelos ACCESS e MPI. No cenário SSP2-4.5, os aumentos atingiram 27,14% (MPI) e 6,97% (ACCESS) no período 2015–2060, ampliando-se para 34,71% e 18,44%, respectivamente, em 2061–2100.

No cenário SSP5-8.5, os aumentos tornam-se ainda maiores, alcançando 44,28% no ACCESS e 35,43% no MPI no período final do século. O aumento das vazões máximas pode representar maior potencial de geração de energia em períodos chuvosos, porém também eleva os riscos de cheias e pressão sobre as estruturas hidráulicas.

Dessa forma, os resultados sugerem que as futuras condições hidrológicas poderão ser caracterizadas por maior variabilidade e intensificação dos extremos, exigindo estratégias de operação mais flexíveis e sistemas de gestão capazes de conciliar o aproveitamento energético com a segurança hídrica e estrutural dos empreendimentos hidrelétricos.

5.7. Projeção da Energia Natural Afluentes dos Aproveitamentos Hidrelétricos

A análise energética no trabalho é feita a partir da Energia Natural Afluentes (ENA) das usinas hidrelétricas avaliadas. A ENA pode ser calculada para o aproveitamento hidrelétrico, para a bacia hidrográfica ou para o submercado.

As análises a partir da ENA serão feitas por aproveitamento hidrelétrico, conforme apresentado nas Figura 74 a Figura 78. São analisados os resultados de ENA para os cinco

modelos climáticos, dois cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) e dois períodos futuros (2015 a 2060 e 2061 a 2100) em relação ao histórico (1970 a 2014).

O cálculo envolve as vazões naturais afluentes aos aproveitamentos e o fator de produtibilidade da usina (p). A primeira variável foi obtida das simulações de vazões do modelo hidrológico MGB tratadas e apresentadas nos capítulos anteriores e a produtibilidade pode ser verificada junta ao ONS.

A Tabela 22 apresenta os valores obtidos da produtibilidade das 145 usinas avaliadas, onde se verifica que alguns valores de produtibilidade são nulos, ocasionando em valores nulos de ENA calculada para o aproveitamento.

Nota-se também que a maioria dos casos em que a produtibilidade é igual a zero, são para reservatórios como os casos dos reservatórios de Billings e Guarapiranga na bacia do rio Paraná e reservatório de Tocos na bacia do rio Paraíba do Sul.

Existem alguns casos em que usinas que também apresentam valores de produtibilidade nulos, como nas bacias dos rios Paraná, Iguaçu, Paraíba do Sul, etc. No total, 9 dos 145 aproveitamentos tem o fator de produtibilidade iguais a 0, porém, não impede e nem invalida as análises energéticas analisadas a seguir.

Tabela 22 Valores do fator de produtibilidade dos aproveitamentos hidrelétricos.

Aproveitamento Hidrelétrico	p	Aproveitamento Hidrelétrico	p
UHE Cachoeira Caldeirão	0,1406	UHE Funil Grande	0.3549
UHE Coaracy Nunes	0,1795	UHE Furnas	0.8130
UHE Ferreira Gomes	0,1499	UHE Mascarenhas Moraes	0.3471
UHE Capivari Cachoeira	6,3542	UHE Estreito Grande	0.5437
UHE Ponte de Pedra	2,2106	UHE Jaguará	0.3944
UHE Curuá-Una	0,1679	UHE Igarapava	0.1523
UHE Guilman	1,0066	UHE Volta Grande	0.2482
UHE A. Dias + Sá Carvalho	0,9364	UHE Porto Colômbia	0.2012
UHE Candonga	0,2711	UHE Caconde	0.8259
UHE Salto Grande	0,8020	UHE Euclides Cunha	0.7502
UHE Porto Estrela	0,4155	UHE A. S. Oliveira	0.2209
UHE Baguari	0,1698	UHE Marimbondo	0.5183
UHE Aimorés	0,2558	UHE Água Vermelha	0.4625
UHE Mascarenhas	0,1989	UHE Ilha Solteira	0.3869
UHE Santa Clara	0,8126	UHE Ponte Nova	0
UHE Fundão	0,8307	Reservatório Billings	0
UHE Jordão	0	Reservatório Guarapiranga	0
UHE GB Munhoz	1,0938	UHE Edgar Souza	0

UHE Segredo	1,0401	UHE Barra Bonita	0
UHE Salto Santiago	0,8921	UHE Álvaro Souza Lima	0.1702
UHE Salto Osório	0,5747	UHE Ibitinga	0.1583
UHE Salto Caxias	0,5596	UHE Promissão	0.1894
UHE Rosal	1,6903	UHE Nova Avanhandava	0.2516
UHE Salto Pilão	1,7641	UHE Três Irmãos	0.3988
UHE Itiquira I	0,7685	UHE Jupia	0.1797
UHE Ernestina	0	UHE São Domingos	0.3071
UHE Passo Real	0,3682	UHE Porto Primavera	0.1751
UHE Jacuí	0,7951	UHE A. A. Laydner	0.2907
UHE Itauba	0,7554	UHE Piraju	0.2306
UHE Dona Francisca	0,3356	UHE Chavantes	0.6177
UHE Santo Antônio do Jari	0,2315	UHE Ourinhos	0.0962
UHE Jauru	0,9297	UHE Lucas Nogueira Garcez	0.1483
UHE Irapé	1,4533	UHE Canoas II	0.1288
UHE Itapebi	0,7150	UHE Canoas I	0.1489
UHE Guaporé	1,5452	UHE Mauá	1.0494
UHE Jirau	0,1550	UHE Capivara	0.3744
UHE Santo Antônio	0,1589	UHE Taquaruçu	0.2221
UHE Samuel	0,2762	UHE Rosana	0.1841
UHE Rondon II	0,5244	UHE Itaipu	1.0228
UHE Dardanelos	0,8689	UHE Boa Esperança	0.3784
UHE Manso	0,5080	UHE Retiro Baixo	0.3346
UHE Santa Clara MG	0,4495	UHE Três Marias	0.4360
UHE Pedra do Cavalo	0,9483	UHE Queimado	1.6404
UHE Paraibuna	0,7007	UHE Sobradinho	0.2449
UHE Santa Branca	0,3679	UHE Itaparica	0.4425
UHE Jaguarí	0,5163	UHE Moxotó	0.3800
UHE Funil Resende RJ	0,5575	UHE Paulo Afonso	0.5439
Reservatório de Tocos	0	UHE Xingó	1.0781
UHE Santa Cecília	0	UHE Teles Pires	0.5054
UHE Picada	1,1546	UHE Castro Alves	0.7676
UHE Sobragi	0,7164	UHE Monte Claro	0.3541
UHE Ilha dos Pombos	0,2370	UHE 14 de Julho	0.3016
UHE Corumbá IV	0,5836	UHE Serra da Mesa	1.0404
UHE Corumbá III	0,3471	UHE Cana Brava	0.3868
UHE Corumbá I	0,6294	UHE São Salvador	0.2149
UHE Batalha	0,3551	UHE Peixe Angical	0.2408
UHE Serra Facão	0,6489	UHE Lajeado	0.3315

UHE Emborcação	1,1582	UHE Estreito Tocantins	0.2110
UHE Nova Ponte	0,9669	UHE Tucuruí	0.5496
UHE Miranda	0,6195	UHE Balbina	0.2080
UHE Capim Branco I	0,5114	UHE Garibaldi	0.3691
UHE Capim Branco II	0,4169	UHE Campos Novos	1.6063
UHE Itumbiara	0,7027	UHE Barra Grande	1.4153
UHE Cachoeira Dourada	0,2702	UHE Machadinho	0.8779
UHE São Simão	0,6355	UHE Itá	0.9097
UHE Caçu	0,2442	UHE Passo Fundo	2.2252
UHE Barra dos Coqueiros	0,3214	UHE Manjolinho	0.5400
UHE Foz do Rio Claro	0,2395	UHE Foz do Chapecó	0.4506
UHE Salto	0,4502	UHE Quebra Queixo	1.0350
UHE Salto Verdinho	0,3742	UHE São José	0.1878
UHE Espora	0,4021	UHE Passo São João	0.2545
UHE Camargos	0,2076	UHE Pimental	0.0232
UHE Itutinga	0,2437		

São analisados também os resultados das projeções das ENAs por bacia hidrográfica, utilizando a Equação 8, onde os valores de ENA por bacia são respectivos ao somatório das ENAs dos aproveitamentos pertencentes àquela bacia hidrográfica.

As análises realizadas são em termos médios, ou seja, comparando a variação entre os períodos futuros com o histórico como realizado para as vazões e, ainda, evolução anual da ENA por sub-bacia.

Figura 74 Variações médias da ENA por aproveitamento hidrelétrico para o modelo ACCESS.

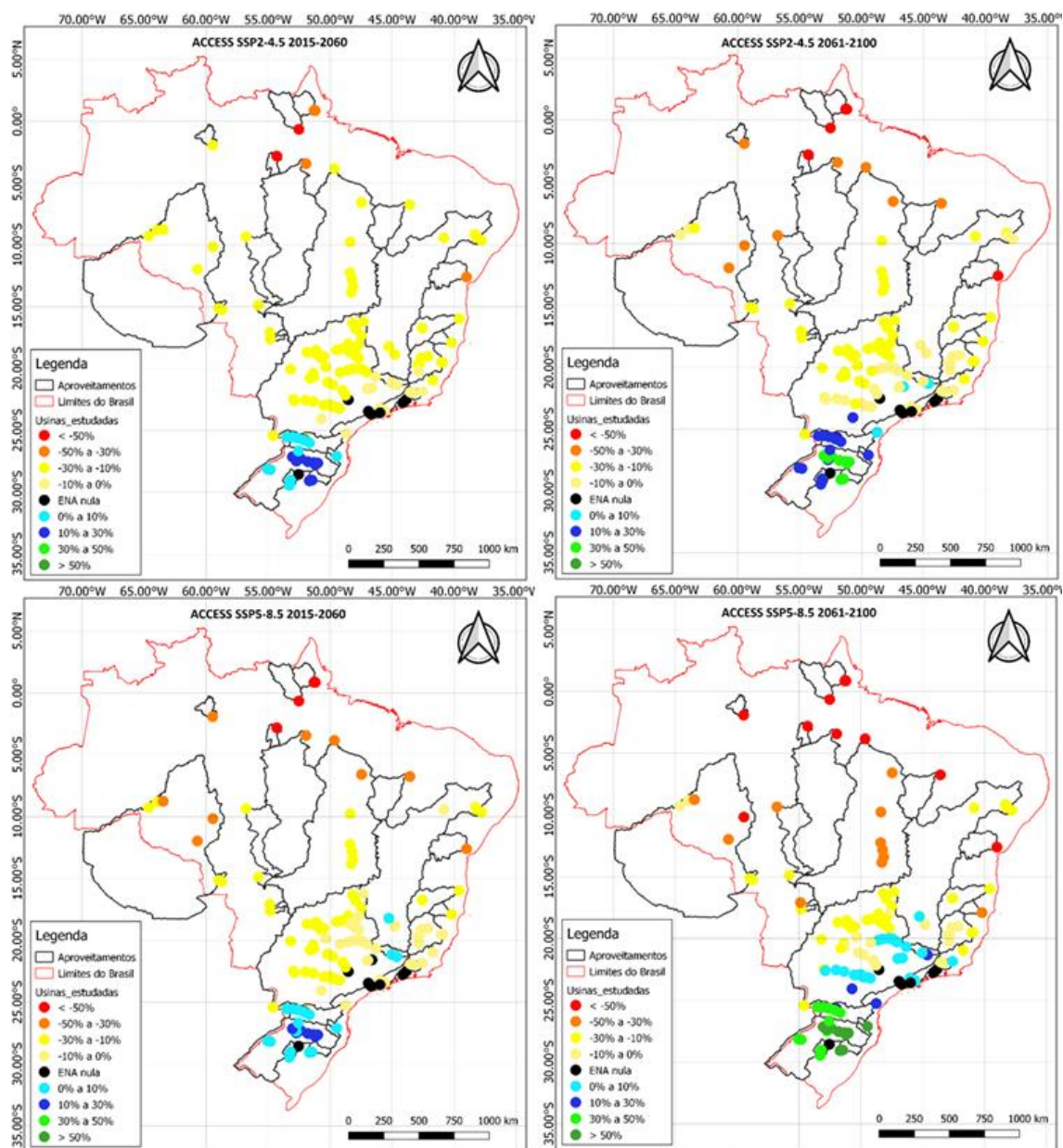


Figura 75 Variações médias da ENA por aproveitamento hidrelétrico para o modelo CanESM.

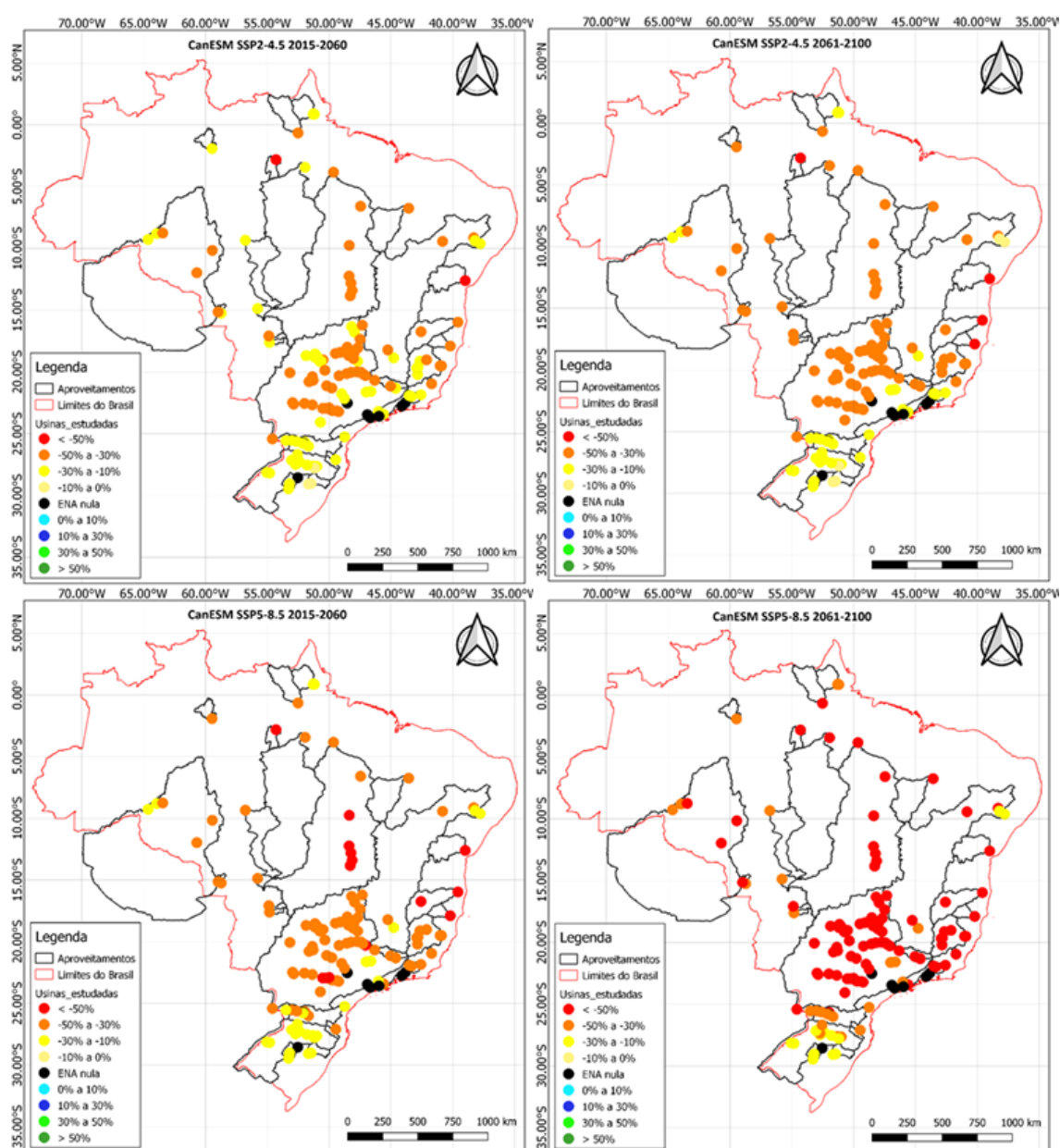


Figura 76 Variações médias da ENA por aproveitamento hidrelétrico para o modelo INM.

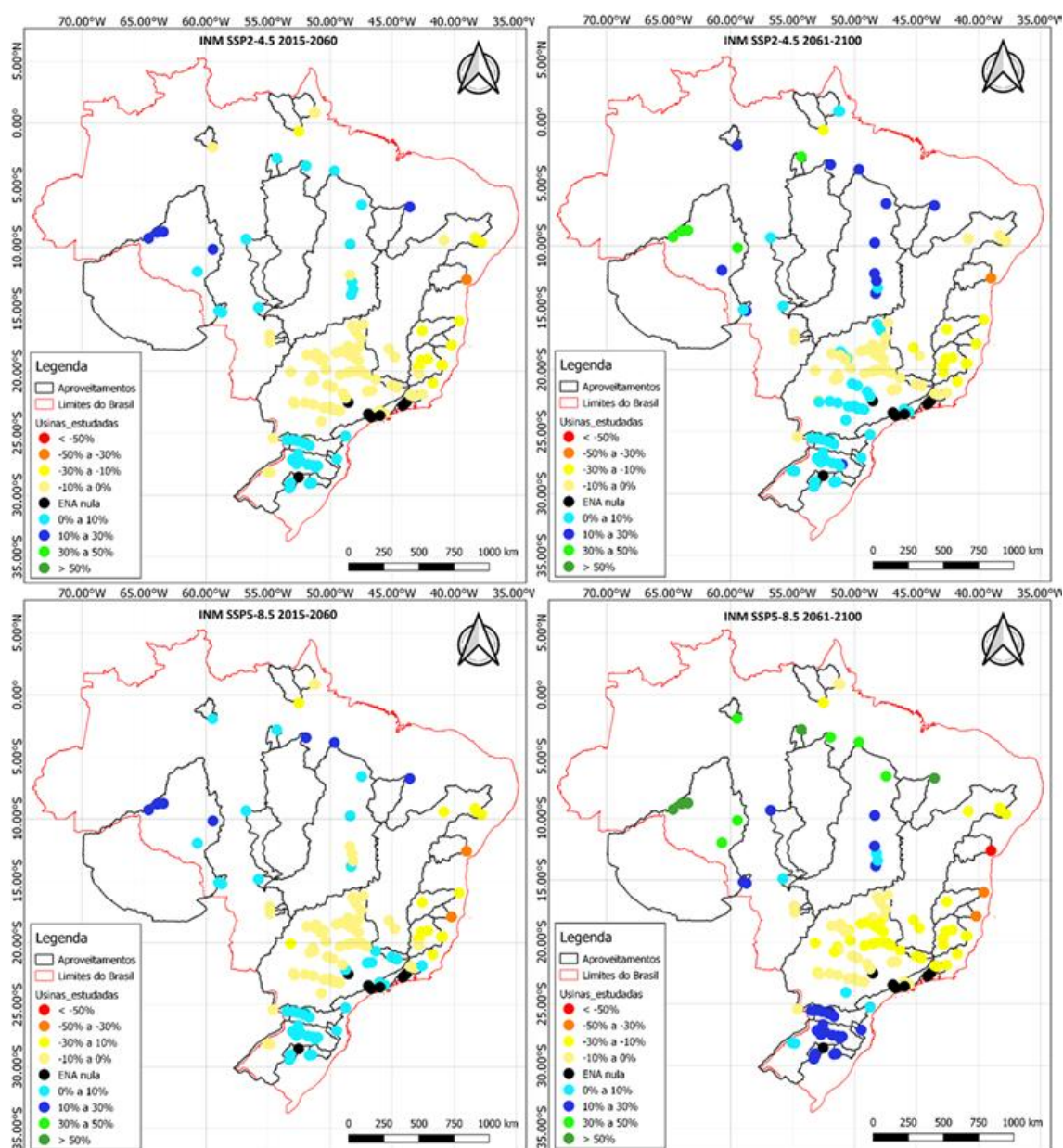


Figura 77 Variações médias da ENA por aproveitamento hidrelétrico para o modelo IPSL.

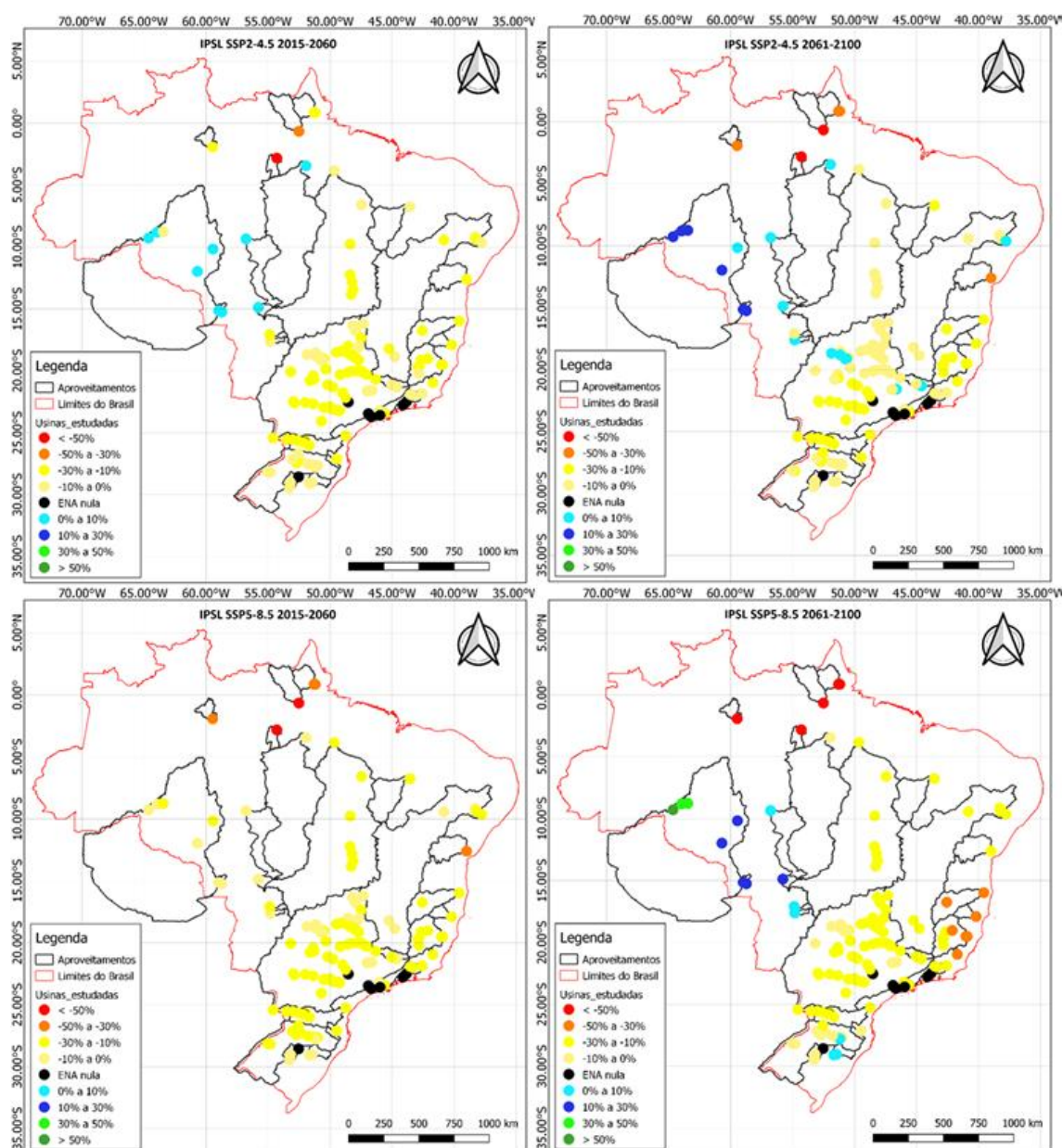
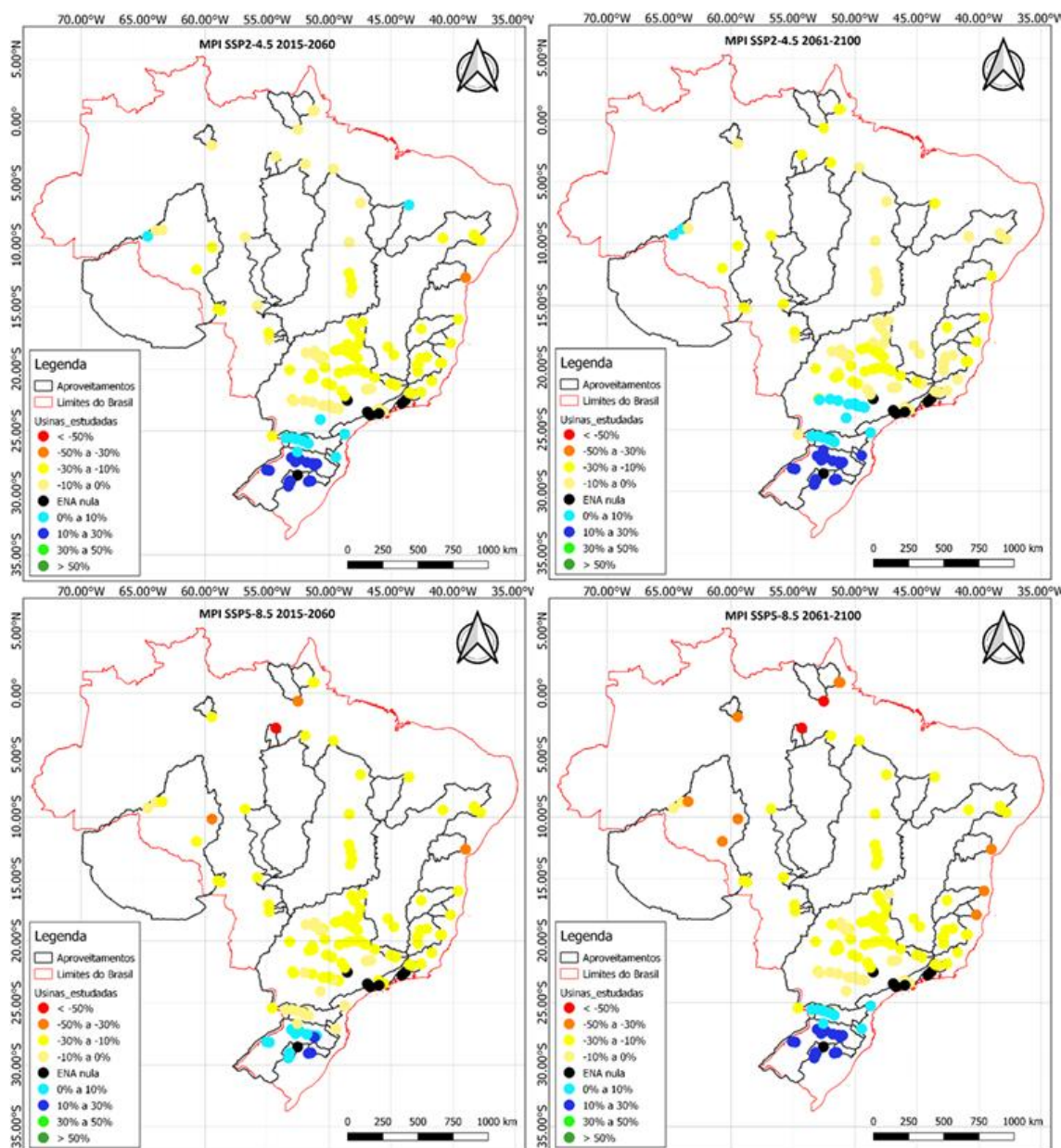


Figura 78 Variações médias da ENA por aproveitamento hidrelétrico para o modelo MPI.



Analisando as Figura 74 a Figura 78, onde são apresentados os resultados das variações nas projeções da ENA para o modelo ACCESS, no geral os apontamentos são para reduções nas ENAs para a maioria dos aproveitamentos hidrelétricos. Porém, verifica-se alguns aproveitamentos, principalmente na região sul do país, onde os apontamentos são para acréscimos nas ENAs.

Analisando o cenário SSP2-4.5, o primeiro período futuro (2015-2060), verifica-se reduções em 77,24% dos aproveitamentos analisados enquanto no segundo período futuro (2061-2100) os apontamentos de reduções da ENA são para 72,41% dos aproveitamentos. Onde o apontamento era negativo as projeções apontavam para menores

reduções para o segundo período e para maiores acréscimos nas ENAs onde o apontamento era positivo.

No cenário SSP5-8.5, movimentos semelhantes são observados nas projeções da ENA, com destaque para a região sul do país que no segundo período futuro os apontamentos são para aumentos na ENA na ordem de 30% a 50% e superiores a 50% nas bacias dos rios Iguaçu e Uruguai e na bacia do Paraná onde alguns dos aproveitamentos que no primeiro período futuro o apontamento das ENAs era de reduções passam a ter apontamentos positivos de 2061 a 2100.

Para o modelo CanESM, os apontamentos são para reduções nas projeções de ENAs para todos os aproveitamentos hidrelétricos analisados com exceção apenas para os aproveitamentos em que a ENA é nula.

Analisando os dois cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e os dois períodos futuros (2015-2060) e (2061-2100) os apontamentos de reduções da ENA são para 93,79% dos aproveitamentos. Onde a alteração ocorre entre as faixas de variações das reduções, com agravamento das reduções verificadas na faixa de redução superior a 50%, indo nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, de 1,38% e 9,66%, para 2,76% e 64,14%, do primeiro para o segundo período futuro.

O modelo INM, os apontamentos são para reduções nas ENAs para a maioria dos aproveitamentos hidrelétricos. Porém, verifica-se uma exceção no cenário SSP2-4.5, onde o apontamento de variação positiva supera a variação negativa no segundo período futuro. Os apontamentos de variações positivas das ENAs aparecem nos aproveitamentos de todas as regiões do país com exceção da região nordeste onde são projetados apenas variações negativas.

Analisando o cenário SSP2-4.5, o primeiro período futuro (2015-2060), verifica-se reduções em 65,52% dos aproveitamentos analisados enquanto no segundo período futuro (2061-2100) os apontamentos de reduções da ENA são para 42,56% dos aproveitamentos. Verifica-se que o apontamento de variação negativa é diminuído do primeiro período futuro para o segundo período, enquanto há um aumento do apontamento de variação positiva de 28,28% para 51,03%.

No cenário SSP5-8.5, observa-se aumento nos apontamentos de reduções de ENA de um período para o outro de 55,86% para 60,69%. As reduções são potencializadas principalmente na bacia do rio Paraná em que as reduções passam da classe de reduções de 10% a 0% para 30% a 10% de um período a outro. Os apontamentos positivos também

são potencializados nas usinas da região sul do primeiro período para o segundo de variações positivas de 0% a 10% para variações de 10% a 30%.

Para o modelo IPSL as reduções na ENA prevalecem em todos os cenários e períodos. Porém de um período a outro para o mesmo cenário de emissão elas são reduzidas, ou seja, um número menor de aproveitamentos apresenta variações negativas nas projeções de ENA.

No cenário SSP2-4.5 do primeiro para o segundo período, em algumas usinas em que o apontamento era de reduções na ENA o apontamento foi invertido, como nos casos de usinas da bacia do Paraná e do São Francisco e apontamentos de variações positivas da ENA foram potencializadas como nos casos de usinas do rio Madeira que mudaram da classe de 0% a 10% de aumento para 10% a 30% de aumento.

No cenário SSP5-8.5 do primeiro para o segundo período futuro, houve alteração de classe de redução de 0% a 10% para 10% a 30% nas bacias do sudeste, como nos casos usinas do rio Doce, Paraíba do Sul e Mucuri e alternância de apontamentos negativos para positivos de bacias da região centro-oeste e norte, como na bacia do Madeira, com exemplos de acréscimos de 30% a 50% e superiores a 50%. Para o modelo MPI os apontamentos de variações negativas também prevalecem independente do cenário e período. Porém, as variações negativas são reduzidas do primeiro período futuro para o segundo período futuro.

No cenário SSP2-4.5, as variações negativas vão de 73,10% dos aproveitamentos para 66,21% dos aproveitamentos. Observa-se mudanças nos apontamentos de algumas usinas da bacia do rio Paraná, saindo de apontamentos de variações negativas para positivas e em alguns casos as variações negativas mudam de valores entre -30% a -10% para -10% a 0%.

No cenário SSP5-8.5, também há redução no número de aproveitamentos com variações negativas de 82,07% para 76,55%. Porém, há o agravamento de reduções em algumas usinas nas regiões norte e sudeste, como nas usinas do rio Madeira, Araguari e Doce. Na região sul, a bacia do Iguaçu o apontamento de variação negativa para positiva de um período a outro e usinas do Uruguai apresentam maiores variações positivas.

No geral os modelos possuem indicativos de reduções nas projeções da ENA, independentemente dos cenários de emissão e do período futuro analisado. O que é um bom indicativo pois todos convergem para o mesmo apontamento. O que difere cada modelo é a magnitude das reduções esperadas com destaque para o modelo CanESM em que não houve nenhum indicativo de variações positivas.

As Figura 79 a

Figura 83 apresentam as variações percentuais das projeções por modelo climático, cenários de emissão e por período. Portanto, foram calculados os valores médios de variações dos aproveitamentos das respectivas bacias.

Figura 79 Variação média da ENA por bacia hidrográfica para o modelo ACCESS.

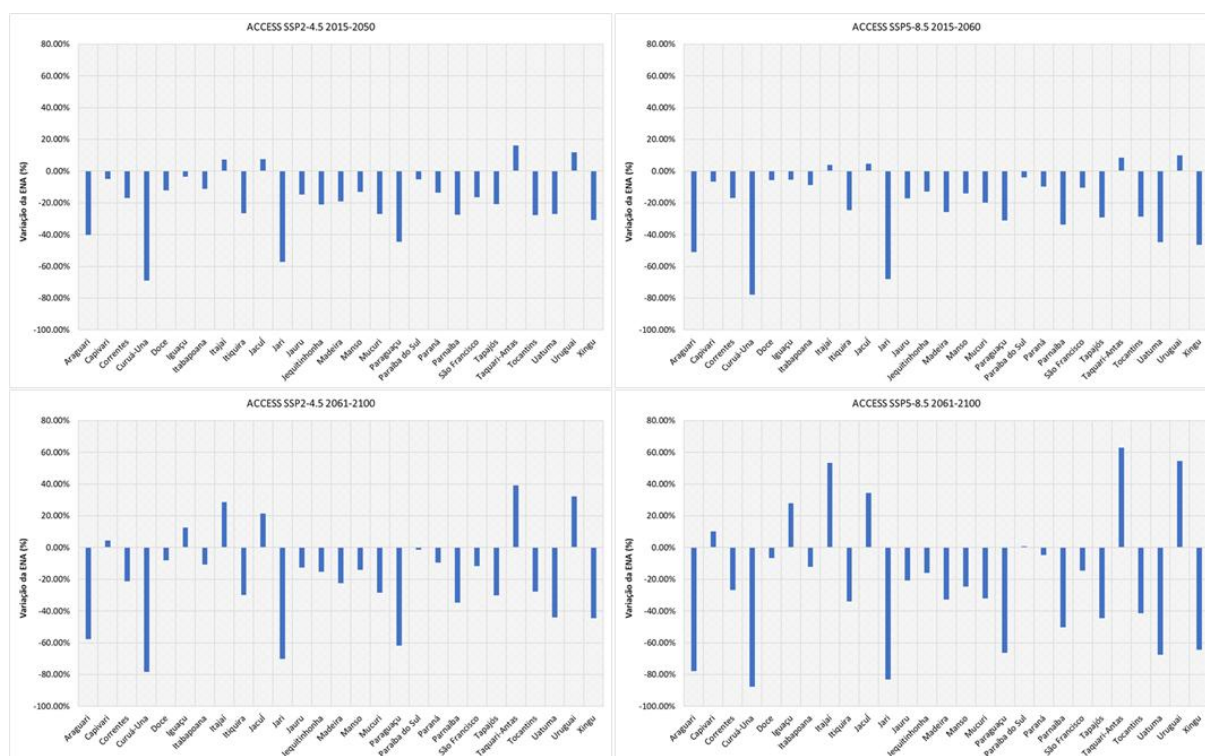


Figura 80 Variação média da ENA por bacia hidrográfica para o modelo CanESM.

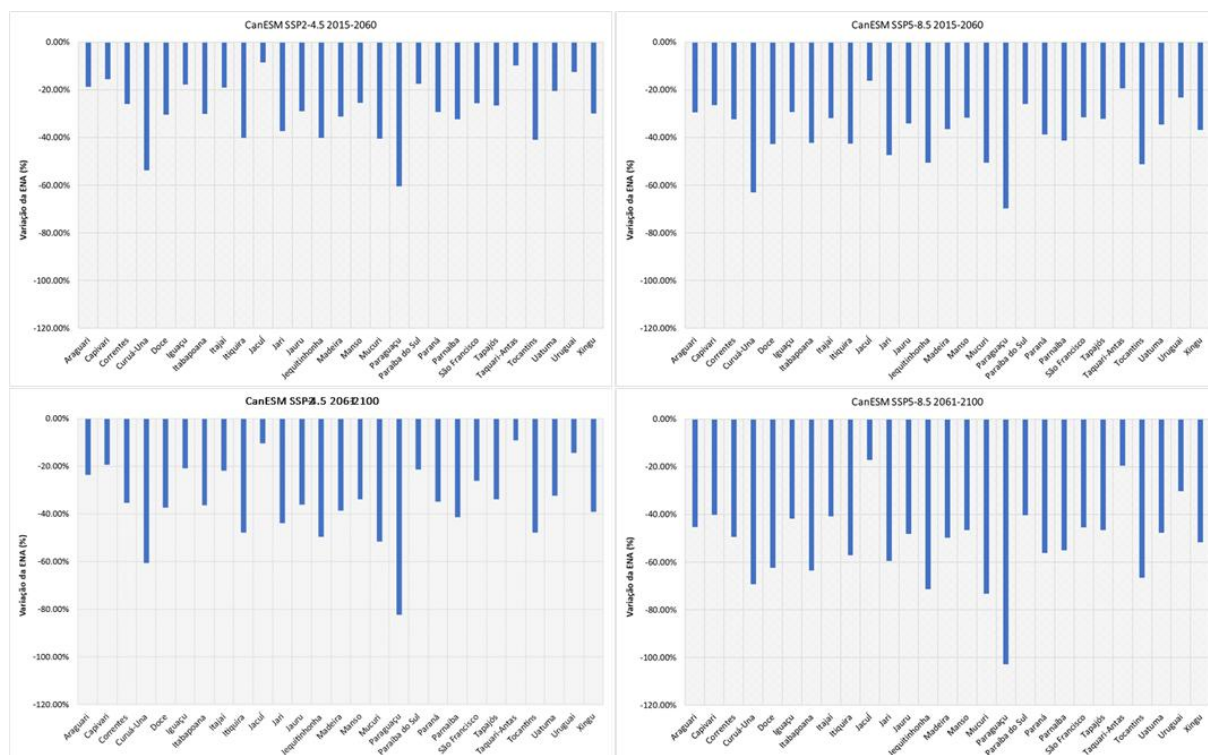
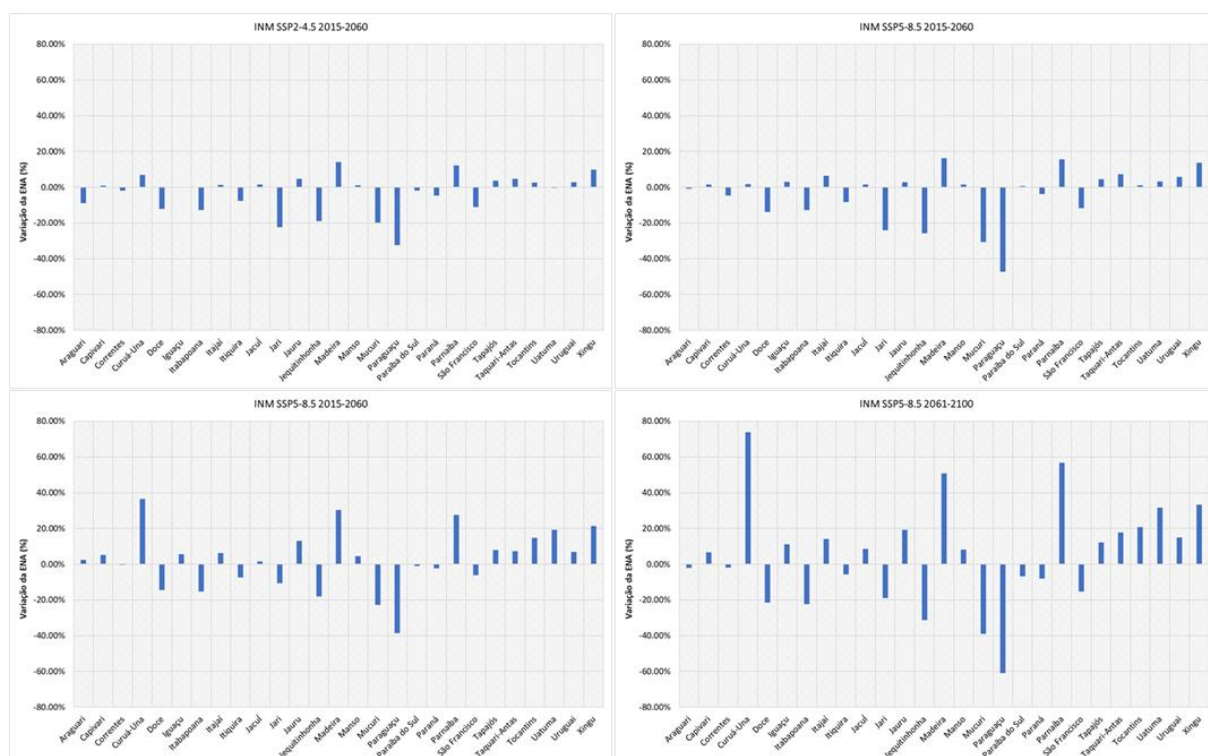
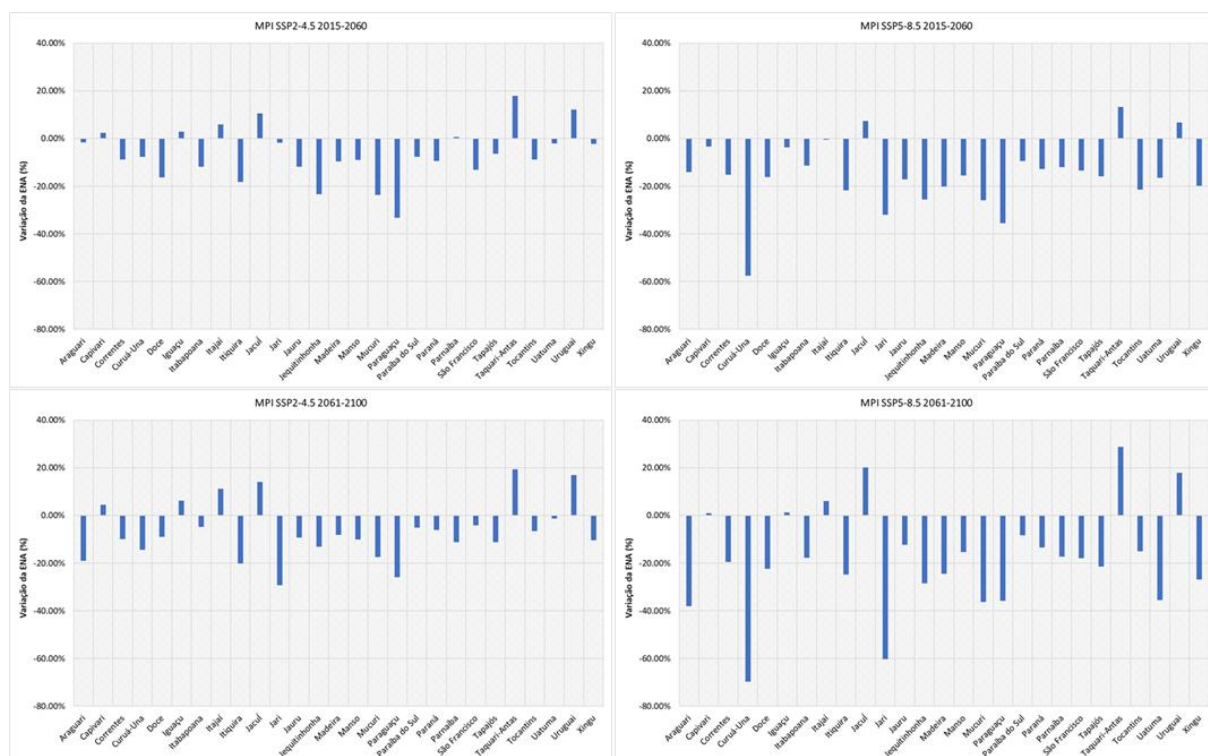


Figura 81 Variação média da ENA por bacia hidrográfica para o modelo INM.





Da Figura 79 observa-se que o modelo ACCESS tem comportamento esperado, ou seja, as reduções de ENA observadas para cada bacia hidrográfica são aumentadas em magnitude do cenário de emissão SSP2-4.5 (intermediário) para o SSP5-8.5 (pessimista) e o mesmo ocorre do primeiro período futuro (2015-2060) para o segundo período futuro (2061-2100). Com destaque para a bacia do rio Curuá-Una com maior redução projetada de ENA, superior a 80% e a bacia do rio Taquari-Antas com maior variação positiva, superior a 60%.

Da Figura 80 observa-se que o modelo CanESM tem comportamento anômalo, ou seja, só apresenta reduções de ENA para todas as bacias hidrográficas, sendo aumentadas em magnitude do cenário de emissão SSP2-4.5 para o SSP5-8.5 e o mesmo ocorre do primeiro período futuro para o segundo período futuro. Com destaque para a bacia do rio Paraguaçu com maior redução projetada de ENA, de 100% seguida da bacia do rio Curuá-Una com cerca de 70%.

Da

Figura 81 observa-se que o modelo INM tem comportamento oposto aos demais modelos climáticos, ou seja, as projeções de ENA das bacias hidrográficas tem mais apontamentos de variações positivas do que negativas, independentemente do cenário ou do período.

Tanto as variações positivas quanto as variações negativas são aumentadas em magnitude do cenário de emissão SSP2-4.5 (intermediário) para o SSP5-8.5 (pessimista) e do primeiro período futuro (2015-2060) para o segundo período futuro (2061-2100). Com destaque para a bacia do rio Curuá-Una com maior variação positiva projetada de ENA, superior a 70% e a bacia do rio Paraguaçu com maior variação negativa, superior a 60%.

Da Figura 82 observa-se que o modelo IPSL as reduções de ENA das bacias hidrográficas prevalecem. Estas são aumentadas em magnitude do cenário de emissão SSP2-4.5 para o SSP5-8.5 do primeiro período futuro para o segundo período futuro. Com algumas exceções em que a variação da ENA é positiva destaque para a bacia do rio Jauru e Madeira, com respectivamente, 25% e 38% no segundo período futuro e cenário SSP5-8.5. As maiores reduções projetadas de ENA, são das bacias dos rios Curuá-Una e Jari de quase 80%.

Da

Figura 83 observa-se que o modelo MPI também projetam variações da ENA quase exclusivamente negativas, porém com alguns casos em que as variações são positivas. Mas, o comportamento esperado também é encontrado, ou seja, as reduções de ENA para cada bacia hidrográfica são aumentadas em magnitude do cenário de emissão SSP2-4.5 (intermediário) para o SSP5-8.5 (pessimista) e o mesmo ocorre do primeiro período futuro (2015-2060) para o segundo período futuro (2061-2100).

Com destaque para a bacia do rio Curuá-Una com maior redução projetada de ENA, superior a 50% e as bacias dos rios Taquari-Antas com maior variação positiva, próximo a 30% e do rio Jacuí de quase 20%.

Diversos estudos disponíveis na literatura têm se dedicado a avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre as vazões em bacias hidrográficas brasileiras, bem como sobre o desempenho de aproveitamentos hidrelétricos e os usos consuntivos da água.

De modo geral, esses trabalhos buscam compreender como alterações nos regimes de precipitação e temperatura podem influenciar a disponibilidade hídrica futura e, consequentemente, setores fortemente dependentes da água, como o energético e o agrícola.

A seguir, são discutidos alguns desses estudos, destacando-se as principais semelhanças e diferenças em relação aos resultados obtidos a partir da metodologia proposta neste trabalho.

Coutinho e Cataldi (2023) analisaram tendências hidroclimáticas extremas em bacias localizadas nas regiões Nordeste (Paranaíba e São Francisco) e Sul do Brasil (Iguaçu e Uruguai), considerando projeções de vazão para o período de 2020 a 2100.

Os autores utilizaram dados de precipitação provenientes dos modelos BCC-CSM1-1, CCSM4, MIROC5 e NorESM1-M, do CMIP5, utilizando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 associados ao modelo hidrológico SMAP.

Os resultados indicaram uma tendência predominante de redução das vazões, acompanhada de intensificação de eventos extremos e aumento da variabilidade hidrológica, especialmente sob o cenário mais pessimista.

Apesar de utilizarem modelos climáticos de uma geração anterior (CMIP5), os autores analisaram quatro bacias que também são objeto deste estudo, o que permite uma comparação dos resultados.

Além disso, assim como nesta pesquisa, foi empregado um modelo hidrológico para a projeção das vazões futuras. Um ponto de destaque é a convergência dos resultados,

uma vez que ambos os estudos apontam reduções de vazão mais pronunciadas no cenário RCP8.5.

De forma geral, tanto neste trabalho quanto no de Coutinho e Cataldi (2023), as bacias das regiões Nordeste e Sul apresentaram indicativos de redução das vazões nos aproveitamentos avaliados, com poucas exceções pontuais na região Sul, associadas a determinados modelos climáticos, como observado neste estudo para o modelo INM.

Pereira *et al.* (2021) investigaram os impactos das mudanças climáticas nas vazões mensais da bacia do rio Verde, localizada na região de cabeceira da bacia do rio Grande. Para isso, utilizaram os modelos hidrológicos SWAT e VIC, associados às projeções de precipitação dos modelos regionais Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5, considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Os autores observaram reduções expressivas nas vazões anuais, com destaque para o modelo Eta-HadGEM2-ES, que indicou diminuições da ordem de 58% no início do século (2011–2040) e reduções superiores a 50% no final do século, especialmente sob o cenário RCP8.5.

Um aspecto relevante desse estudo é a grande variabilidade dos sinais projetados entre os diferentes modelos climáticos, com alguns indicando reduções significativas e outros apontando acréscimos de vazão em determinados períodos. Esse comportamento também foi identificado nos resultados deste trabalho, reforçando a importância da análise de vários modelos.

Além disso, as magnitudes das reduções projetadas por Pereira *et al.* (2021), superiores a 50% em alguns cenários, são compatíveis com aquelas encontradas nesta pesquisa, principalmente para o modelo CanESM, que apresentou predominantemente sinais negativos, com valores médios bastante próximos aos reportados pelos autores.

Silveira, Souza Filho e Vasconcelos Júnior (2017) utilizaram dados de precipitação do CMIP5 para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, com o objetivo de projetar vazões em aproveitamentos hidrelétricos para três períodos futuros (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098), comparando-os com o período histórico de 1950 a 1999.

Os autores concluíram que a maioria dos modelos do IPCC-AR5 converge quanto aos impactos negativos no setor elétrico das regiões Sudeste/Centro-Oeste e Norte, com reduções de até 15% na bacia de Furnas e cerca de 30% na bacia de Tucuruí até o final do século, sob o cenário RCP8.5.

No Nordeste, os resultados apresentaram elevada incerteza, especialmente na bacia do Xingó, enquanto na região Sul foram observados aumentos de vazão no extremo sul do país.

Esses resultados estão em concordância com os obtidos neste trabalho, que também apontam predominância de sinais negativos nas vazões da maioria das bacias analisadas, além de incertezas associadas à variabilidade entre os modelos climáticos. Da mesma forma, são observados indicativos de acréscimos de vazão em algumas bacias da região Sul, o que reforça a existência de padrões regionais distintos de resposta às mudanças climáticas.

Scheuerer *et al.* (2025) adotaram uma abordagem distinta ao utilizar redes neurais para desenvolver um modelo de regressão que correlaciona anomalias de precipitação e temperatura, visando projetar vazões em 157 bacias brasileiras com base em simulações de 22 modelos climáticos do CMIP6.

Os autores identificaram reduções de vazão nas regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste, especialmente durante a primavera e o verão, enquanto a região Sul apresentou, de forma geral, indicativos de aumento das vazões.

Embora esse estudo utilize um número significativamente maior de modelos climáticos e uma metodologia baseada em inteligência artificial, os padrões espaciais dos resultados são muito semelhantes aos encontrados nesta pesquisa.

Destaca-se, novamente, a convergência quanto à predominância de reduções de vazão em grande parte do território nacional e ao comportamento diferenciado da região Sul, que tende a apresentar variações positivas.

Silveira *et al.* (2018) analisaram os impactos das mudanças climáticas nas vazões dos postos do setor elétrico brasileiro, utilizando seis modelos do CMIP5 sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, para o período de 2011 a 2098. As vazões de 21 postos representativos do Sistema Interligado Nacional (SIN) foram simuladas por meio do modelo SMAP, enquanto os demais foram estimados por regressões lineares.

Os resultados indicaram maior probabilidade de redução das vazões médias anuais na maior parte do Brasil, com exceção da região Sul, onde foram projetados aumentos superiores a 5% no período de 2040 a 2069.

Esse padrão reforça os achados dos estudos anteriores e também os resultados deste trabalho, evidenciando que, apesar de algumas divergências entre modelos e metodologias, há uma tendência consistente de redução das vazões em grande parte do país, com exceções pontuais na região Sul.

Por fim, Silva *et al.* (2021) analisaram a geração hidrelétrica futura na bacia do rio São Francisco, considerando simultaneamente os efeitos das mudanças climáticas e o aumento das demandas consuntivas de água.

Utilizando cinco modelos do CMIP6 e os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, os autores observaram reduções significativas na disponibilidade hídrica, aumento das demandas, especialmente para irrigação, e impactos diretos na geração de energia. Para a UHE Sobradinho, as reduções projetadas variaram entre 30% e 50% no período de 2021 a 2050, sendo mais intensas sob o cenário SSP5-8.5.

Esses resultados são fortemente aderentes aos obtidos neste trabalho, sobretudo para as bacias da região Nordeste, onde a combinação de redução da precipitação e aumento da temperatura intensifica a evapotranspiração e, consequentemente, as demandas consuntivas, em especial no setor de agricultura irrigada. As magnitudes das reduções projetadas também são compatíveis com aquelas estimadas pela metodologia aqui proposta.

De forma geral, embora os estudos apresentados utilizem diferentes versões de modelos climáticos, abordagens metodológicas e escalas de análise, há um consenso importante quanto aos impactos esperados das mudanças climáticas sobre as vazões no Brasil.

Predominam os indicativos de redução da disponibilidade hídrica na maior parte do país, especialmente quando considerados conjuntamente os efeitos climáticos e o aumento das demandas consuntivas, com poucas exceções observadas na região Sul.

Esses resultados corroboram os resultados deste trabalho e reforçam a relevância da abordagem metodológica proposta, que integra de forma sinérgica os efeitos das mudanças climáticas e do consumo de água nos aproveitamentos hidrelétricos.

Mais do que a estimativa precisa das magnitudes, os resultados apontam para a necessidade urgente de ações de planejamento e adaptação, sobretudo em bacias já submetidas a condições de escassez hídrica e no contexto do sistema elétrico brasileiro, reconhecidamente vulnerável a variações na disponibilidade de água.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho aplicou e avaliou uma metodologia integrada para a análise dos impactos das mudanças climáticas e dos usos consuntivos da água sobre a Energia Natural Afluente (ENA) de vinte e sete bacias hidrográficas associadas às principais usinas hidrelétricas do Sistema Interligado Nacional (SIN). A partir dos resultados obtidos, é possível levantar algumas considerações relevantes projetados para o setor elétrico brasileiro.

Em primeiro lugar, a aplicação da metodologia mostrou-se adequada e eficaz para avaliar alterações hidrológicas em cenários futuros, sendo claramente identificado o sinal das mudanças climáticas nas simulações.

O modelo hidrológico MGB, em conjunto com as projeções climáticas do conjunto NEX-GDDP baseadas no CMIP6, apresentou desempenho mais que satisfatório na representação dos processos hidrológicos e na propagação das alterações climáticas para as vazões afluentes. O resultado reforça a robustez da abordagem adotada, sobretudo considerando a complexidade e a variabilidade espacial e hidrológica das bacias analisadas.

Os ajustes iniciais do modelo hidrológico foram, de modo geral, classificados como satisfatórios, bons e muito bons de acordo com as estatísticas de avaliação da qualidade da calibração utilizadas, com poucos casos considerados insatisfatórios.

Essas exceções concentraram-se majoritariamente em usinas localizadas em regiões de cabeceira, caracterizadas por pequenas áreas de drenagem, ou em aproveitamentos de menor relevância para a geração do SIN.

Esse comportamento evidencia limitações inerentes à modelagem hidrológica em bacias de menor escala. Normalmente para estas bacias os modelos utilizando redes neurais apresentam resultados melhores. No entanto, para análise dos impactos no SIN essas bacias têm pouca relevância.

A análise comparativa entre os efeitos das mudanças climáticas e das demandas de usos consuntivos da água indicou que as alterações climáticas exercem influência predominante sobre as reduções projetadas de ENA.

Não menos importante, os usos consuntivos apresentaram também projetam papel relevante nas reduções simuladas, sobretudo em cenários de maior estresse hídrico. Esse resultado reforça a importância de considerar, de forma integrada, tanto as mudanças no

clima quanto a evolução das demandas antrópicas nos estudos de planejamento e gestão dos recursos hídricos e energéticos.

Um dos principais diferenciais deste trabalho reside na utilização de projeções climáticas regionalizadas por meio de *downscaling* estatístico do AR6 do CMIP6, recentemente publicado.

A adoção dessas projeções, que dispensam a correção de viés das variáveis climáticas, representa um avanço metodológico relevante, ao reduzir incertezas associadas a procedimentos adicionais de pós-processamento e ao aumentar a consistência das séries utilizadas nas simulações hidrológicas.

Mesmo tendo posse desses dados, foi feita a verificação de viés nas séries de precipitação e julgou-se não necessário realizar a aplicação de nenhuma técnica de correção do viés adicional, visto que, os resultados indicaram grande aderência entre as simulações com a chuva observada das estações e a chuva dos modelos climáticos quando aplicados ao período histórico.

Os efeitos climáticos foram incorporados tanto na parametrização do modelo MGB quanto nas séries mensais de usos consuntivos da água, permitindo que os resultados reflitam de forma integrada as projeções de redução das precipitações, aumento das temperaturas médias, intensificação da frequência e magnitude de eventos extremos (secas e inundações) e suas consequências diretas sobre as vazões afluentes aos aproveitamentos hidrelétricos.

Nesse contexto, os resultados obtidos indicam um potencial aumento da vulnerabilidade do setor elétrico brasileiro, que, apesar do aumento da geração eólica e solar, depende fortemente da geração hidrelétrica.

De maneira geral, as projeções de ENA apontaram predominantemente para reduções, cuja magnitude aumenta tanto do cenário intermediário (SSP2-4.5) para o cenário pessimista (SSP5-8.5) quanto do primeiro período futuro (2015–2060) para o segundo (2061–2100).

Esse comportamento evidencia a sensibilidade do sistema hidrelétrico brasileiro ao agravamento das condições climáticas ao longo do século XXI. Destaca-se, contudo, a exceção observada no modelo climático INM, que apresentou leve predominância de variações positivas de ENA independentemente do cenário ou horizonte temporal considerado.

Em contraste, o modelo CanESM indicou exclusivamente variações negativas, além de concentrar as maiores reduções projetadas. Os modelos apresentaram grande

variabilidade na magnitude nas reduções de vazão e consequentemente da ENA quando comparados entre si, e, um mesmo modelo também apresentou variação na magnitude de redução a depender da bacia hidrográfica analisada, o que caracteriza os diferentes níveis de efeitos das mudanças climáticas nas diferentes regiões do país.

Os resultados deste trabalho reforçam a necessidade de incorporação das mudanças climáticas e dos usos consuntivos da água nos estudos de planejamento energético. A metodologia proposta demonstra potencial para subsidiar análises de risco, estratégias de adaptação e políticas públicas voltadas à segurança hídrica e energética, contribuindo para um planejamento mais resiliente do setor elétrico brasileiro frente às incertezas climáticas futuras.

Apesar da robustez metodológica e da abrangência dos resultados apresentados, este estudo apresenta limitações inerentes às escolhas de dados dos modelos climáticos. A modelagem hidrológica, embora satisfatória na maior parte das bacias analisadas, mostrou maior sensibilidade em regiões de cabeceira e em bacias com áreas de drenagem reduzidas, indicando a necessidade de investigações adicionais em escalas espaciais mais finas.

Além disso, as projeções climáticas, mesmo oriundas de modelos regionalizados do CMIP6, permanecem sujeitas a incertezas associadas à representação de processos atmosféricos, à variabilidade natural do clima e às diferenças estruturais entre os modelos climáticos, como evidenciado pela divergência nos resultados entre os modelos analisados.

As demandas de usos consuntivos da água foram consideradas a partir de cenários simplificados ao longo do tempo, o que não contempla possíveis mudanças socioeconômicas, tecnológicas ou regulatórias que possam alterar significativamente os padrões de consumo hídrico no futuro.

Nesse sentido, trabalhos futuros podem avançar na incorporação de cenários que integram e relacionam os aspectos mencionados acima de demanda de água, na ampliação do conjunto de modelos climáticos e análise das melhores respostas da precipitação pois esta é a principal variável de entrada dos modelos hidrológicos.

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se que as mudanças climáticas e a evolução dos usos consuntivos da água sejam incorporadas aos estudos oficiais de planejamento energético e de recursos hídricos de longo prazo no Brasil. A utilização de projeções climáticas atualizadas, baseadas no CMIP6 e em múltiplos cenários

socioeconômicos, deve ser adotada de modo a capturar adequadamente a amplitude das incertezas climáticas e seus impactos sobre a ENA.

Do ponto de vista da gestão dos recursos hídricos, é fundamental aprimorar o planejamento e a regulação dos usos consuntivos, especialmente em bacias com elevada relevância para a geração hidrelétrica, visando mitigar conflitos entre setores e reduzir a vulnerabilidade do sistema.

Por fim, recomenda-se o avanço em estratégias de adaptação, incluindo a diversificação da matriz elétrica e o uso de ferramentas de apoio à decisão baseadas em cenários climáticos, de forma a aumentar a resiliência do setor elétrico brasileiro frente às mudanças climáticas futuras.

REFERÊNCIAS

ADAM, K.N.; COLLISCHONN, W. Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na bacia hidrográfica do rio Ibicuí. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 3, p. 69-79, 2013.

ADAM, K.N.; FAN, F.M.; PONTES, P.R.; BRAVO, J.M.; COLLISCHONN, W. Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20 n.4, p. 999 – 1007, 2015.

ADAM, K.N. Incertezas e impactos de mudanças climáticas sobre o regime de vazões na bacia hidrográfica do rio Uruguai. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2016.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALMEIDA, L.; SERRA, J.C.V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. *Revista FAE*, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129 – 137, 2017.

ALVES, M.C.; NASCIMENTO, J.T.; MEDEIROS, M.B.C.L.; TAVARES, A.S.; BRITO, M.W.N.; SOUZA, P.J.O.P. Evapotranspiração de referência entre os métodos de Penman e Thornthwaite, nos municípios de novo repartimento e Santana do Araguaia, PA, *Tópicos em Ciências Agrárias*, v. 5, p. 7.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. As regiões hidrográficas, 2013. Disponível em: < <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/panorama-das-aguas/regioes-hidrograficas> >, Acesso 2023.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil, 2019. Disponível em: < http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/ana_manual_de_usos_consuntivos_da_agua_no_brasil.pdf/view >, Acesso 2023 e 2024.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. O Sistema Interligado Nacional, 2020. Disponível em: < <https://www.ana.gov.br/sar/sin> >, Acesso 2023.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Bacias Hidrográficas Brasileiras, Disponível em: < <https://www.gov.br/ana/pt-br> >, Acesso 2022.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. SNIRH. Disponível em: < https://www.snirh.gov.br/hidroweb-mobile/mapa/historico-estacao/codigo_estacao >, Acesso 2023.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Aproveitamentos hidrelétricos: usos consuntivos a montante. Disponível em: < <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/c239a66f-6b41-4b7e-9790-86dbf817cd41> >, Acesso 2023.

APROBIO – Associação dos Produtores de Biocombustíveis do Brasil. Você sabe o que é o efeito estufa? 2019. Disponível em: < <https://aprobio.com.br/noticia/voce-sabe-o-que-e-o-efeito-estufa> >, Acesso 2024,

ARITON, L. A Thorough Introduction to Holt-Winters Forecasting, 2021. Disponível em:<<https://medium.com/analytics-vidhya/a-thorough-introduction-to-holt-winters-forecasting-c21810b8c0e6>>, Acesso 2023.

BARBOSA, M. A. Análise da Influência das Mudanças Climáticas no Aproveitamento Hidroenergético da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2024.

BAYER, D.M.; COLLISCHONN, W. Análise de sensibilidade do modelo MGB-IPH a mudanças de uso da terra, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, n. 3, p. 165-179, 2013.

BEN – Balanço Energético Nacional, 2021. Disponível em:<<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>, Acesso 2023 e 2024.

BERGAMINI, C, As crises de energia no Brasil e os caminhos da transição para uma economia de baixo carbono, 2022, Disponível em:< <https://www.comciencia.br/as-crisis-de-energia-no-brasil-e-os-caminhos-da-transicao-energetica-para-uma-economia-de-baixo-carbono/>>, Acesso 2024.

BESERRA, P. S. Avaliação dos efeitos das alterações na cobertura e uso do solo sobre o regime de vazões via modelagem hidrológico considerando incerteza paramétrica. Universidade de Brasília, UnB. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (Mestrado), Brasília, 2016.

BRAGA, L.G.S.; BOUIX, C.P.S.; PÓVOAS, C.E.; RAMOS, A. Estimativa da evapotranspiração de referência por três métodos, para a região de Ilhéus/BA. Research, Society and Development, v. 12, n. 4, e7812440936, 2023.

BRASIL. Lei nº 9433, A Política Nacional de Recursos Hídricos, 1997. Disponível em:< https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm#:~:text=Institui%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de.28%20de%20dezembro%20de%201989>, Acesso 2024.

BRASIL - Lei Federal 12,651/2012, Proteção da vegetação nativa, Disponível em:< https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm>, Acesso 2024.

BRITO NETO, R.L.; TAGLIAFERRE, C.; LEMOS, O.L.; ROCHA, F.A.; DE PAULA, A. Aplicação do modelo MGB-IPH na bacia hidrográfica do Rio Pardo em diferentes cenários de uso e ocupação do solo. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 191-213, 2021.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial, Bragantia, Campinas, v.59, n. 2, p.125-137, 2000.

CAMARGO, A, P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARVALHO, V. S. O.; ALVARENGA, L. A.; OLIVEIRA, C. M. M.; TOMASELLA, J.; COLOMBO, A.; MELO, P. A. Impact of climate change on monthly streamflow in the Verde River Basin using two hydrological models. Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science, Taubaté, v. 16, n. 4, p. 1–18, 2021. DOI: 10.4136/ambi-agua.2683.

CGIAR-CSI Consortium for Spatial Information. SRTM 90m DEM Digital Elevation Database, Disponível em:<<https://srtm.csi.cgiar.org/>>, Acesso 2023.

COLLISCHONN, W. Simulação hidrológica de grandes bacias. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia: para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013, 336p.

COLLISCHONN, W.; GAMA, C.; SIQUEIRA, V.; PAIVA, R.; FLEISCHMANN, A. Manual de referência teórica do MGB. HGE, IPH, UFRGS, 2020.

COSTA, R. L.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; BAPTISTA, G. M. M.; ROCHA JÚNIOR, R. L.; HERDIES, D. L.; SILVA, V. P. R. Cenários de Mudanças Climáticas para a Região Nordeste do Brasil por meio da Técnica de *Downscaling* Estatístico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. Especial, 785-801, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863550006>.

COUTINHO, P. E.; CATALDI, M. Evaluation of Extreme Hydroclimatic Trends in River Basins Located in the Northeast and South Regions of Brazil. *Atmosphere*, Basel, v. 14, n. 9, p. 1388, 02 set. 2023. DOI: 10.3390/atmos14091388.

CPTEC/INPE, Dados de precipitação do Produto MERGE, Disponível em:<<http://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/MERGE/GPM/DAILY/>>, Acesso 2023.

CYGWIN. Instalador Cygwin. Disponível em:<<https://cygwin.com/>>, Acesso 2023.

EDP Brasil. Crise Energética no Brasil: origem, consequências e soluções. Disponível em:<<https://empresas.edp.com.br/blog/crise-energetica-no-brasil/#:~:text=As%20maiores%20crises%20recentes%20no.na%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia%20hidrel%C3%A9trica>>, Acesso 2023 e 2024.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agrícola. Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011, 771 p.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Desafios da transmissão no longo prazo, 2018. Disponível em:<<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Desafios%20da%20Transmissao.pdf>>, Acesso 2023,

FAN, F.M.; COLLISCHONN, W. Integração do modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 243-254, 2014.

FAN, F.M. et al. Um mapa de unidades de respostas hidrológicas para a América do Sul. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília: [s.n.], 2015, p. 1-8.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). The United Nations World Water Development Report 2017: wastewater – the untapped resource. Paris: UNESCO; Rome: FAO, 2017.

FELIX, V.S.; DA PAZ, A.R. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido com modelagem hidrológica distribuída. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 3, p. 556-569, 2016.

GAMA, W.M. Impactos das mudanças climáticas na resposta hidrológica da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio (AL/PE). Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento (Mestrado), Maceió, 2011.

GARCIA, K.C.; DEBIZET, G. **Água e energia: uma reflexão sobre a adaptação à mudança climática no setor elétrico brasileiro**. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília-DF, 2015.

GATO, S.; JAYASURIYA, N.; ROBERTS, P. Forecasting residential water demand: case study for Melbourne. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 133, n. 4, p. 309–319, 2007.

GHIAT, I.; MACKEY, HR; AL-ANSARI, T. Uma revisão dos modelos, técnicas e métodos de medição da evapotranspiração em sistemas agrícolas abertos e fechados. **Water**, v. 13, n (18), 2523 <https://doi.org/10.3390/w13182523>.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 3.ed. São Paulo: Edusp, 2008.

GUILHON, L.G.F.; ROCHA, V.F.; MOREIRA, J.C. Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 13-20, 2007.

HAY, L. E.; WILBY, R. L.; LEAVESLEY, G. H. A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 36, n. 2, p. 387–397, 2000. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2000.tb04276.x.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Crescimento populacional brasileiro do último censo, Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes#:~:text=Em%201%C2%BA%20de%20agosto%20de.12.306.713%20pessoas%20a%20mais.>>, Acesso 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, Home>População>Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação, www.ibge.gov.br, 2020, Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>, Acesso 2024.

INDE – Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais, O PORTAL BRASILEIRO DE DADOS GEOESPACIAIS - SIG BRASIL, Disponível em: <<https://inde.gov.br/>>, Acesso 2023.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, O Que são mudanças climáticas, 2023, Disponível em: <<http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=9#:~:text=As%20mudan%C3%A7as%20clim%C3%A1ticas%20antropog%C3%AAnicas%2C%20ou.desmatamento%2C%20decomposi%C3%A7%C3%A3o%20de%20lixo%20etc.>>, Acesso 2023.

IPCC, 2021a: Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P, Zhai, A, Pirani, S,L, Connors, C, Péan, S, Berger, N, Caud, Y, Chen, L, Goldfarb, M,I, Gomis, M, Huang, K, Leitzell, E, Lonnoy, J,B,R, Matthews, T,K, Maycock, T, Waterfield, O, Yelekçi, R, Yu, and B, Zhou (eds.)],

Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

IPCC, 2021b: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2021c: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JATI, D.A. Estudos hidro-climatológicos da bacia do rio Curuá-Una: aplicação do modelo de grandes bacias (MGB-IPH). Universidade Federal do Oeste do Pará, UFOPA. Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia (Mestrado), Santarém, 2017.

JATI, D.A.; SILVA, J.T. Estudos geo-hidrológicos da bacia do rio Curuá-Una, Santarém, Pará: aplicação do modelo hidrológico de grandes bacias (MGB-IPH). Revista Brasileira de Geografia Física, v. 10, n. 4, p. 1296-1311, 2017.

JIMÉNEZ, K.Q. Previsão de vazão usando estimativas de precipitação por satélite e assimilação de dados. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Porto Alegre, 2017.

KENNEY, D. S.; GOEMANS, C.; KLEIN, R.; LOWREY, J.; REIDY, K. Residential water demand management: lessons from Aurora, Colorado. Journal of the American Water Resources Association, Hoboken, v. 44, n. 1, p. 192–207, 2008. SHIKLOMANOV, I. A. Appraisal and assessment of world water resources. Water International, London, v. 25, n. 1, p. 11–32, 2000.

LIMA, J.P.R.; ALVES, J.M.B. Um estudo de downscaling dinâmico de precipitação intrasazonal acoplado a modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica Alto-Médio São Francisco, Revista Brasileira de Meteorologia, v.24, n.3, 323-338, 2009.

LIMA, J.W.M; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J.A. Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica, 2014 - São Paulo, SP: Hunder books.

LIMA, J.W.M.; ALVES, L.M.; MARENGO, J.A. Panorama energético devido às mudanças climáticas Análise do impacto das mudanças climáticas globais sobre as bacias hidrográficas e o regime hidrológico no Brasil e projeções futuras, 2023.

LOPES, V.A.C.; FAN, F.M.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, P.R.M. Aplicação preliminar do modelo MGB - IPH para a bacia hidrográfica completa da Laguna dos Patos, XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília-DF, 2015.

LUCENA, A.F.P. Proposta Metodológica Para Avaliação Da Vulnerabilidade Às Mudanças Climáticas Globais No Setor Hidroelétrico. Tese de Doutorado, Rio De Janeiro 2010.

MAGRINI, A.; VEIGA, L. B. E. Gestão de recursos hídricos: uma análise do modelo brasileiro, 2013. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves-RS.

Marengo, J.A. Água e mudanças climáticas, Estudos avançados 22 (63) 2008.

MARTINS, C.M.S.; SILVA, B.C.; PONS, N.A.D. Estimativa de cheias em bacias hidrográficas com base em previsões de precipitação por conjunto, *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n. 5, p. 1713-1729, 2019,

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC, 2023. Disponível em:< https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/ciencia_do_clima/painel_intergovernamental_sobre_mudanca_do_clima.html>. Acesso 2024.

MELLER, A.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. Assimilação de dados de vazão na previsão de cheias em tempo-real com o modelo hidrológico MGB-IPH, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 3, p. 209-224, 2012.

MMA – Ministério do Meio Ambiente, Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Disponível em:< <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas.html#:~:text=A%20Conven%C3%A7%C3%A3o%2DQuadro%20das%20Na%C3%A7%C3%B5es.humana%20perigosa%20no%20sistema%20clim%C3%A1tico.>>, Acesso 2024.

MORIASI, D.B. et al. Hydrologic and water quality models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE, American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 58(6), p.1763-1785, 2015. ISSN 2151-0032 DOI 10.13031/trans.58.10715.

NEGREIROS, B.M.F.; MEDEIROS, J.D.F. Aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na bacia hidrográfica do rio Seridó, 2017. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017.

NOBRE, CA; SAMPAIO, G.; BORMA, LS; CASTILLA-RUBIO, JC; SILVA, JS; CARDOSO, M. **Uso da terra e riscos de mudanças climáticas na Amazônia e a necessidade de um novo paradigma de desenvolvimento sustentável.** *Anais da Academia Nacional de Ciências*, v. 113, n. 39, p. 10759–10768, 2016.

ONS – Operador Nacional do Sistema, 2022, O que é o SIN? Disponível em:< <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>, Acesso 2023.

ONS – Operador Nacional do Sistema, 2024. Panorama dos reservatórios. Disponível em:< <https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/reservatorios>>, Acesso 2024.

ONS – Operador Nacional do Sistema, 2024. Submódulo 23.5 - Critérios para estudos hidrológicos, 2016.

ONS – Operador Nacional do Sistema, 2024. ENA diária por bacia. Disponível em:< <https://dados.ons.org.br/dataset/ena-diario-por-bacia>>. Acesso, 2024.

PAIVA, R.C.D. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias, Estudo de caso: bacia do rio Solimões. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Porto Alegre, 2009.

PAIVA, R.C.D. et al. Hydrologic and Hydrodynamic Modelling, *Geophysical Research Abstracts*, v. 13, p. 12666, 2011a.

PAIVA, R.C.D; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach, *Journal of Hydrology*, v. 406, n. 3-4, p. 170-181, 2011b.

PAIVA, A.C.E.; TOMASELLA, J.; MARTINS, M.A.; RODRIGUEZ, D.A.; CANAMARY, E.A. Segurança hídrica e energética na bacia do Paraíba do Sul diante das mudanças climáticas – 1: Extremos. IV Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul, 2023

PEREIRA, A.R.; PRUITT, W.O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration, *Agricultural Water Management*, Amsterdam, Netherlands, v. 66, n.2, p. 251-257, 2004.

PESSOA, M.M.E.P. Obtenção de vazões em locais sem monitoramento através de um modelo hidrológico com assimilação de dados, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Porto Alegre, 2017.

PONTES, P.R.M. et al. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015.

PORTO, B.M.; PHILIPPI, D.A. Previsão dos Custos de Produção de Suínos por meio de Modelos de Holt-Winters. ABCustos. São Leopoldo: Associação Brasileira de Custos, v. 13, n. 1, p. 109-127, 2018.

Qgis – Quantum GIS. Baixe o QGIS para a sua plataforma. Disponível em:<https://www.qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html>, Acesso 2021.

RIBEIRO JÚNIOR, L.U. Aprimoramento de um instrumento de gestão para operação de reservatórios hidrelétricos com usos múltiplos sob condições de mudanças climáticas: estudo de caso UHE de Furnas, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (Doutorado), Campinas, 2013.

RODRIGUES, L.S. Efeito das mudanças climáticas na demanda de energia elétrica no Brasil. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2012.

ROZANTE, J.R.; MOREIRA, D.S.; GONÇALVES, L.G.G.; VILA, D.A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation Over South America, *Weather and Forecasting*, v. 25, p. 885-894, 2010.

R Studio. The R Project for Statistical Computing. Disponível em:<<https://www.r-project.org/>>, Acesso 2023.

SANTANA, T.B.; SILVA, B.C.; SANTOS, A.H.M. Estimativa de impactos de mudanças climáticas em bacias do Atlântico Leste. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves-RS, 2013.

SCIANNI, L.A. Avaliação Preliminar do Efeito das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2014.

SCHEUERER, M.; BYERMOEN, E.; OLIVEIRA, J.; ROKSVÅG, T.; SCHULER, D.: Multi-decadal streamflow projections for catchments in Brazil based on CMIP6 multi-model simulations and neural network embeddings for linear regression models, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 29, 5099–5119, 2025, <https://doi.org/10.5194/hess-29-5099-2025>.

SCHRIPPE, P.; IARCZEWSKI, A.M.W.; SANTOS, S.R.; BORTOLOTTI, S.L.V.; MOREIRA JUNIOR, F.J. Estratégia empresarial para a Natura: Análise de correlação e previsão dos lucros por meio do modelo Holt-Winters, *REUNA*, Belo Horizonte - MG, Brasil, v.20, n.4, p.05-26, 2015.

SCHUSTER, R.C.; FAN, F.M.; COLLISCHONN, W. Calibração do modelo hidrológico MGB-IPH para a bacia do Rio Itajaí-Açu, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, n. 9, p. 1-15, 2020.

SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation, In: MAIDMENT, D, R, *Handbook of hydrology*, New York: McGraw-Hill, 1993.

SILVA, B.C. et al. Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, n. 3, p. 31-41, 2007.

SILVA, D.A.; COSTA, D.F. A utilização do modelo Holt Winters na elaboração de um orçamento de resultado de uma cooperativa de crédito rural, XVII Congresso Brasileiro de Custos – Belo Horizonte - MG, Brasil, 2010,

SILVA, D.S.; MEDEIROS, J.D.F. Aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu, XIV SRHNE - Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Maceió: [s.n.], 2018, p. 1-10,

SILVA, M. K. A. Modelagem hidrológica aplicada ao estudo da vazão da bacia hidrográfica do rio Araguari - MG, a partir das mudanças do uso da terra e cobertura vegetal nativa, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Instituto de Geografia (Doutorado em Geografia), Uberlândia, 2014.

SILVA, M. V. M.; SILVEIRA, C. S.; COSTA, J. M. F.; MARTINS, E. S. P. R.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. das C. Projection of climate change and consumptive demands impacts on hydropower generation in the São Francisco River Basin, Brazil. *Water*, Basel, v. 13, n. 3, p. 332, 2021. DOI: 10.3390/w13030332.

SILVEIRA, C.S.; SOUZA FILHO, F.A.; LOPES, J.E.G.; BARBOSA, P.S.F.; TIEZZI, R.O. Análise das projeções de vazões nas bacias do setor elétrico brasileiro usando dados do IPCC-AR4 para o século XXI, RBRH – *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 19 n.4, 2014, p. 59-71.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. de A.; VASCONCELOS JUNIOR, F. das C. Streamflow projections for the Brazilian hydropower sector from RCP scenarios. *Journal of Water and Climate Change*, v. 7, n. 1, p. 114-126, 2016. DOI: 10.2166/wcc.2016.052.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C.; ARAUJO JUNIOR, L. M.; CABRAL, S. L. Climate Change and Brazilian Hydropower Sector: An Analysis Based on Global Models from IPCC-AR5. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 47, p. 46–60, 2018. DOI: 10.5327/Z2176-947820180210.

SIQUEIRA, P.C.; PONS, N.A.D.; SILVA, B.C.; MOREIRA, L.A.; JUNIOR, P.S.; MARTINS, A.M. (2022), Aplicação do Modelo Hidrológico MGB-IPH para Simulação de Cenários de Uso do Solo na Bacia do Rio Sapucaí (MG), *Revista Brasileira De Geografia Física*, 15(5), 2414–2429.

SOBRAL, M.C.; ASSIS, J.M.O.; OLIVEIRA, C.R.; SILVA, G.M.N.; MORAIS, M.; CARVALHO, R.M.C. Impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos no submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco – BRASIL, 2018, REDE – *Revista Eletrônica do PRODEMA Fortaleza*, Brasil, v. 12, n. 3, p.95-106, 2018,

SOUZA, R.C.; BARROS, M.; MIRANDA, C.V.C. PREVISÃO HORÁRIA DE CARGA ELÉTRICA USANDO HOLT-WINTERS, 2006. XXXVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO PESQUISA OPERACIONAL, Pesquisa Operacional na Sociedade: Educação, Meio Ambiente e Desenvolvimento, Goiânia-GO.

SYPERRECK, V.L.G.; KLOSOWSKI, E.S.; GRECO, M.; FURLANETTO, E. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado Palotina, Estado do Paraná do Paraná, *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 30, supl., p. 603-609, 2008.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate, *Geographical Review*, v. 38, n.1, 1948, p. 55-94.

THRASHER, B.; WANG, W.; MICHAELIS, A, MELTON, F.; Lee, T.; NEMANI, R. NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Sci Data* **9**, 262 (2022).

TOLMASQUIM, MT **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE/Interciência, 2016.

TUCCI, C. E. M. et al. Previsão de médio prazo de afluência de reservatórios com base na previsão climática, Instituto de Pesquisa e Hidráulica: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002,

TUCCI, C. E. M. et al. Long term flow forecast based on climate and hydrological modeling: Uruguay river basin. *Water Resources Research*, v. 39, n. 7, p. 3(1-11), 2003,

VERÍSSIMO, A.J.; ALVES, C.C.; HENNING, E.; AMARAL, C.E.; CRUZ, A.C. Métodos estatísticos de suavização exponencial Holt-Winters para previsão de demanda em uma empresa do setor metal mecânico, *Revista Gestão Industrial*, v. 08. n. 04: p. 154-171, 2012.

VIRGÍLIO, R.M. Operação de Usinas Hidrelétricas de Regularização sob Condições de Mudanças Climáticas: estudo de caso da UHE Três Marias. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá-MG. 2018.

VS – Visual Studio. Instalador Visual Studio. Disponível em:<<https://visualstudio.microsoft.com/pt-br/vs/older-downloads/>>. Acesso 2021.

VÖRÖSMARTY, C. J.; GREEN, P.; SALISBURY, J.; LAMMERS, R. B. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, Washington, v. 289, n. 5477, p. 284–288, 2000.

WASTI, A.; RAY, P.; WI, S.; FOLCH, C, UBIERNA, M.; KARKI, P, Climate change and the hydropower sector: A global review, 2021, Wiley interdisciplinary reviews: Climate Change.

WBCSD – World Business Council for Sustainable Development (2014).

Article

The Impact of Climate Change and Water Consumption on the Inflows of Hydroelectric Power Plants in the Central Region of Brazil

Filipe Otávio Passos ¹, Benedito Cláudio da Silva ^{2,*} , José Wanderley Marangon de Lima ³, Marina de Almeida Barbosa ¹, Pedro Henrique Gomes Machado ² and Rafael Machado Martins ²

- ¹ Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Campus José Rodrigues Seabra, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá 37500-903, Brazil; d2021101671@unifei.edu.br (F.O.P.); marinabarbosa@unifei.edu.br (M.d.A.B.)
² Instituto de Recursos Naturais, Campus José Rodrigues Seabra, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá 37500-903, Brazil; d2021012268@unifei.edu.br (P.H.G.M.); d2018004021@unifei.edu.br (R.M.M.)
³ Marangon Engenharia, Rua Sebastião Leite, 48, Itajubá 37501-160, Brazil; jose.marangon@marangonenergia.com.br
* Correspondence: silvabenedito@unifei.edu.br

Abstract

There is a consensus that climate change has affected society. The increase in temperature and reduction in precipitation for some regions of the world have had implications for the intensity and frequency of extreme events. This scenario is worrying for various sectors of water use, such as hydroelectric power generation and agriculture. Reduced flows in river basins, coupled with increased water consumption, can significantly affect energy generation and food production. Within this context, this paper presents an analysis of climate change impacts in a large basin of Brazil between the Amazon and Cerrado biomes, considering the effects of water demands. Inflow projections were generated for seven power plant reservoirs in the Tocantins–Araguaia river basin, using projections from five climate models. The results indicate significant reductions in flows, with decreases of more than 50% in the average flow. For minimum flows, there are indications of reductions of close to 85%. The demand for water, although growing, represents a smaller part of the effects, but should not be disregarded, since it impacts the dry periods of the rivers and can generate conflicts with energy production.

Keywords: climate projections; consumptive uses; hydrological modeling; extreme events; water availability



Academic Editor: Alessandro Pezzoli

Received: 4 June 2025

Revised: 29 June 2025

Accepted: 1 July 2025

Published: 4 July 2025

Citation: Passos, F.O.; da Silva, B.C.; de Lima, J.W.M.; Barbosa, M.d.A.; Machado, P.H.G.; Martins, R.M. The Impact of Climate Change and Water Consumption on the Inflows of Hydroelectric Power Plants in the Central Region of Brazil. *Climate* **2025**, *13*, 140. <https://doi.org/10.3390/cli13070140>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Climate change (CC), which arises from natural processes, has been enhanced by anthropogenic actions, especially the increase in greenhouse gas (GHG) emissions. These changes have directly and indirectly affected various sectors of society, such as the environment, water resources, food production, and electricity generation. The latest climate assessment reports from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) indicate that in the future there will be a tendency for temperatures and evapotranspiration to increase across the globe [1–3], reductions in precipitation mainly in the North and Northeast regions of Brazil [4,5], and an increase in the frequency and intensity of extreme events such as droughts and floods [3,6]. Analyses show that reductions in average rainfall of around 20% have already been observed in the Brazilian Northeast, and around 15% in the eastern Amazon region, which could get worse as GHG emissions increase [5].

Due to the predominance of hydropower in the Brazilian energy matrix, which represents approximately 50% of the total installed capacity [7]. This dependence on the quantity of water flowing into hydroelectric plants brings many uncertainties, especially in regions where there are trends towards reduced rainfall due to changes in global climate patterns. Within this context, the Amazon–Cerrado transition zone in central region of the country is vital for the Brazilian energy resilience, because it regulates rainfall, sustains river flows, and buffers against droughts [8]. Its deep-rooted vegetation stores and slowly releases water, ensuring stable supplies for key dams, while deforestation disrupts moisture recycling, reduces rainfall, and increases sedimentation—threatening Brazil’s hydropower-dependent energy system. Protecting this region is essential to maintain climate resilience, prevent reservoir siltation, and secure long-term electricity generation in Brazil.

On the other hand, the demands for water from different sectors of society also have an impact on energy generation, especially for small plants, bringing further uncertainties to the sector. Consumptive use of water occurs when the water withdrawn is consumed, partially or totally, in the process for which it is intended, and does not return directly to the water body [9]. The main consumptive uses of water in Brazil are human supply (urban and rural), animal feed, industry, mining, thermoelectricity, irrigation, and net evaporation from artificial reservoirs [10].

The demand for water in Brazil is growing, with an estimated increase of approximately 80% in the total water withdrawn in the past two decades [10], and the projection is that it will increase by around 24% by 2030. The evolution of water use is directly related to the country’s economic development and urbanization process, which has led to the expansion of industrial use and irrigated agriculture in recent decades. In the North and Southeast, there is a predominance of withdrawals for human supply, and in the other regions, there is a predominance of use for irrigated agriculture. Assessing the hydrological regime is of crucial importance for the rational management of water resources. Changes in water consumption patterns and land use and occupation affect water availability [11].

Therefore, there is a need to develop methodologies that can predict the impacts on the hydrological cycle, considering not only climate change, but also other changes that impact on the water balance of basins, such as land use and occupation and consumptive uses of water. In this sense, rainfall–runoff hydrological models are of fundamental importance. Combining rainfall–runoff models with climate change scenarios has been widely used to assess the impacts of climate change on river basins but requires consistent climate projections and robust hydrological models [12].

In relation to climate change, the main parameters that impact inflows to hydroelectric plants are precipitation and evapotranspiration. Changes in these climate parameters will directly impact flows in river basins, with precipitation being the parameter to which there is greatest sensitivity [13]. In more complete hydrological models, evapotranspiration is calculated during the hydrological simulation, based on variables provided by the climate model. The variables usually required are air temperature and relative humidity, wind speed, solar radiation, and atmospheric pressure. All variables are calculated at the Earth’s surface, with no need for results from other layers of the atmosphere. In addition, climate models generate results for many other variables that are not important in river flow simulation and are therefore disregarded.

For Brazilian basins, there are studies that have assessed the effects of climate change on inflows of hydropower stations, as in the case of the São Francisco River, based on projections from the HadCM3 climate model of CMIP4 and simulations from the MGB-IPH hydrological model [14]. The results indicated reductions in streamflows in the two scenarios analyzed, which could reach up to 35% by the end of the 21st century. In another study [15], SMAP was used to project the streamflows of the main power plants in the

electricity sector using 13 CMIP5 models for the RCP 8.5 emission scenario, and thus assess the impact on the electricity sector. The results indicated that streamflow reductions could reach, in the worst-case scenario, 12% for the Northeast and 10% for the North.

More recently, the impacts of climate change on water resources throughout South America were assessed using the MGB-IPH hydrological model [16]. Using 25 CMIP5 models in the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. The results also indicated reductions in precipitation and, consequently, in streamflows in the eastern Amazon and much of north-eastern Brazil, and that the intensity of the impacts depends on the RCP emission scenario. In addition, reductions in average annual streamflow (around 8–14%) were projected in the Tocantins and Amazonas basins. Similarly, the impacts of climate change on inflows and Inflow Natural Energy (ENA) were also assessed using six models from the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) project, based on the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios for the 21st century [15]. Using the SMAP hydrological model, the results showed that most of the models project reductions in streamflows and ENA for the North and Northeast regions of Brazil.

Similar research has been carried out for basins around the globe [13], but most of these studies only include the incorporation of climate model variables, and a smaller number analyze the combination of effects with changes in land use and land cover. Due to the high complexity of the global climate system, it is important to note that there are limitations in all research on climate change. These limitations are related to factors such as the structure and spatial resolution of climate models, the scarcity of observed data in many regions, and the need for high computational capacity, among other factors.

Another important limitation is that large-scale climate and hydrological models do not include the simulation of engineering structures and the uses of water [16], which interfere with the behavior of flows. Therefore, all these limitations are a source of uncertainty in climate change projections, which can be significant in many cases [17,18], making it necessary to develop strategies to incorporate the human system-of-system impact into hydrological models [19]. Furthermore, some connections between the climate system and water resources are complex and challenging to simulate [20]. Therefore, it is important to focus only on the connections that actually impact water availability.

Few studies about Brazilian basins assess the combined impact of climate change and increased water demand, such as the projection of scenarios for the main reservoirs of the São Francisco River (Brazil) using five CMIP6 models, the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, and the SMAP model for streamflow projection [21]. The combination of climate change scenarios and water demand indicated a decrease in inflows of between −5% and −40% in the Sobradinho and Três Marias reservoirs. The growth in water demand, mainly for irrigation, has increased the impacts on generation in the basin.

A limitation in climate change research is the use of climate variables from general circulation models (GCMs), which often have a coarser spatial resolution. As a result, the level of detail of the information may not be compatible with what is needed for regional analysis using hydrological models. Downscaling is a possible solution to this challenge, used to improve the spatial resolution of the information [3,22]. There are currently two commonly used downscaling techniques; one is dynamic downscaling, which uses higher resolution numerical models to simulate local effects on a sub-daily scale, and the second is statistical downscaling, used to extrapolate data to a more refined sampling frequency based on a climate scenario [23]. Dynamic downscaling uses regional models (RMs) nested with MCG models [24]. RMs incorporate regional characteristics such as topography, vegetation, soil, and continent–ocean differences, which are not contained in global models, and are able to respond to local forcing effects. Statistical downscaling involves establishing empirical relationships between observations of large-scale atmospheric variables and

local climate variables, and that these relationships remain valid under different future climate conditions [3]. Statistical downscaling methods such as linear regression, non-linear regression, and stochastic estimators are simpler and less computationally expensive to implement than dynamic downscaling techniques [25].

Based on these considerations, the main objective of this work is to analyze the changes in inflows from seven hydroelectric plants in the Tocantins–Araguaia river basin, located in the Brazilian Amazon region, due to the influence of climate change in precipitation, evapotranspiration, and water consumption patterns in the region. Climate projections obtained by the statistical downscaling of five global climate models and two GHG emission scenarios are analyzed.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area and Selected Hydropower Plant

The Tocantins–Araguaia river basin (TARB) is located between the coordinates $55^{\circ}25'12''$ to $45^{\circ}43'48''$ west longitude and $18^{\circ}8'24''$ to $1^{\circ}41'24''$ south latitude, and has a total area of 765,367.05 km². It is located partly in the North (53%), partly in the Northeast (4%), and the rest in the Center-West of Brazil [26]. Among the criteria for choosing the TARB was the fact that it is located in the Amazon region (Figure 1), where rainfall is expected to decrease towards the end of the century, as well as the importance of hydroelectric plants.

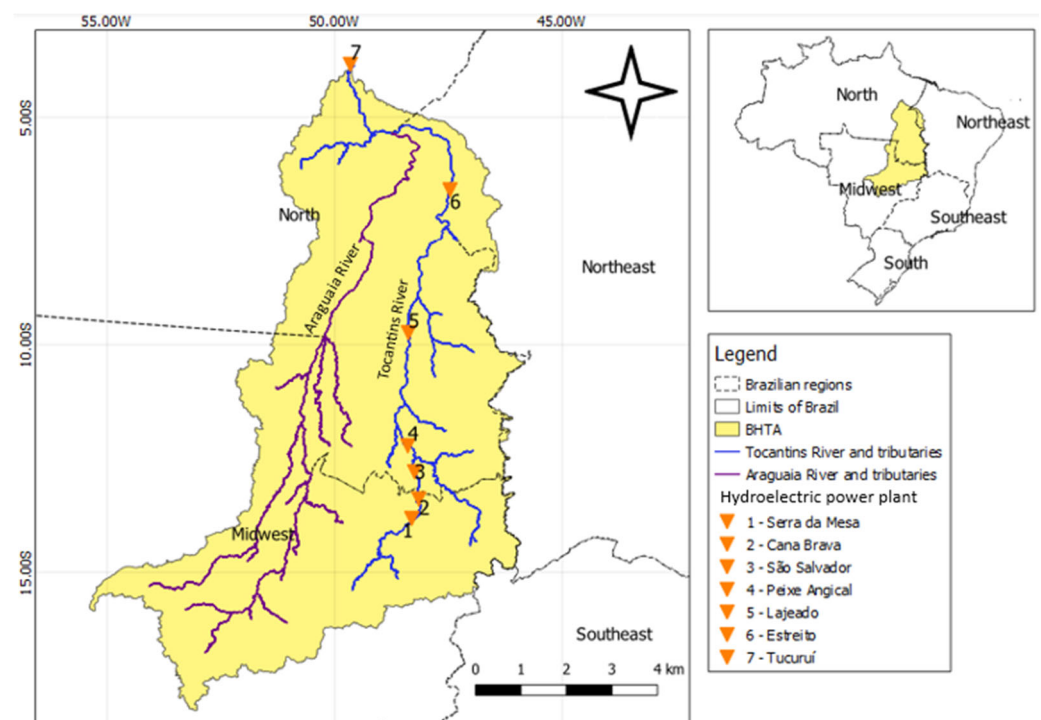


Figure 1. Tocantins–Araguaia river basin with its main hydroelectric power plants [26].

According to the Köppen classification [27], it falls into the Am and Aw types (over 90% of the area). The Am type is called the Monsoon Climate and has a drier month with rainfall of less than 60 mm, but equivalent to more than 4% of the total annual rainfall, and the Aw type is called the Savannah Climate, which has a drier season in winter, where the driest month has rainfall of less than 60 mm, which is equivalent to less than 4% of the total annual rainfall.

A total of 7 main hydroelectric power plants are assessed in the TARB, namely, the Serra da Mesa hydroelectric power station (installed capacity of 1275 MW), the Cana Brava hydroelectric power station (installed capacity of 450 W), the São Salvador hydroelectric

power station (installed capacity of 243.2 MW), the Peixe Angical hydroelectric power station (installed capacity of 498.75 MW), the Lajeado hydroelectric power station (installed capacity of 902.5 MW), the Estreito hydroelectric power station (installed capacity of 1087 MW), and the Tucuruí hydroelectric power station (installed capacity of 8370 MW).

2.2. Methodology Overview

The methodology developed in this work can be summarized according to the flowchart shown in Figure 2. The first step in using the MGB-IPH hydrological model is to prepare the input data, which uses the basin's physiographic data (relief, vegetation, land use, and occupation, among others) and observed hydrological and climatic data. Once the inputs are organized, the hydrological model can be calibrated and, after obtaining an adequate fit, it is ready for flow simulations and projections. At the same time, the projections of climate variables from NEX-GDDP/CMIP6 were obtained and formatted, using computer routines that range from extracting information for areas of interest and correcting the units of the variables to interpolating the information for the hydrological model grid [28].

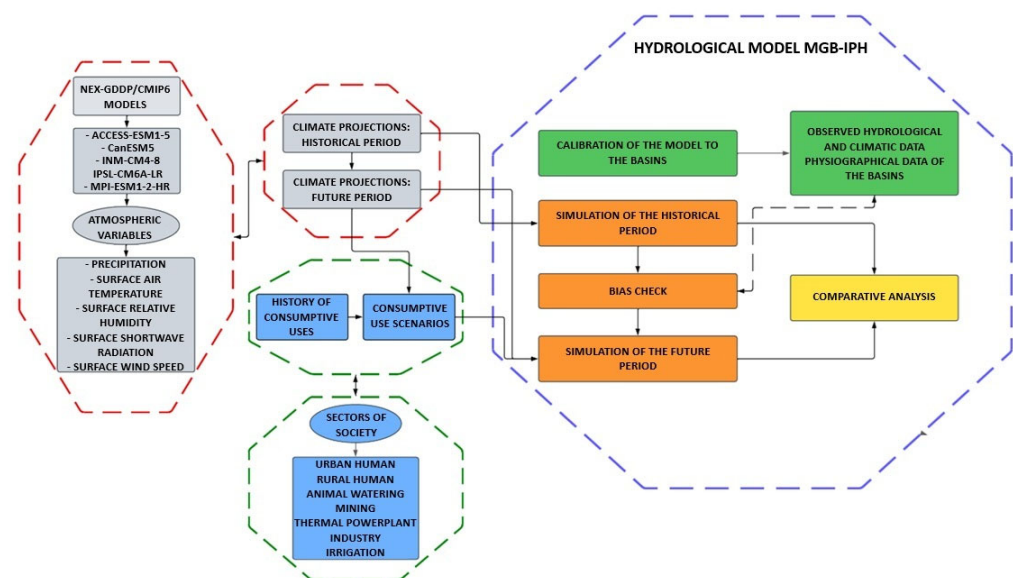


Figure 2. Flowchart of the methodology applied to this research.

Another step was to obtain and project the series of consumptive uses of water that were acquired from the National Water Agency (ANA) [10]. The series provided are monthly and cover the period from 1931 to 2021, with the remainder of the future horizon (up to 2060) being projected using an annual rate of change, defined on the basis of the trend observed in recent years. Although the stages are carried out in parallel, they are correlated. The projections of climate variables are assimilated by the MGB-IPH model, and the effect of climate change is also incorporated into the projections of consumptive uses using a correction factor based on changes in temperature and evapotranspiration. The last step is to project the streamflows of hydroelectric plants under the influence of climate change and subtract the share of water consumption. This results in the projected series of inflows from the plants and comparative analyses of the simulations for the historical period with the projections for the future period.

2.3. Hydrological Model

The parameters of MGB-IPH are calibrated for all the points of interest, i.e., the locations where the streamflow series is to be obtained. In this case, it is important that

there are observed streamflows at all the locations for the same period, as they will be compared. The calibration period used in this work is from 1 January 1970 to 31 December 2014, i.e., the same horizon covered by the historical period of the climate models.

Hydrological (precipitation and river flow) and climatological data (temperature, relative humidity, wind speed, atmospheric pressure, and solar radiation or insolation) are required to calibrate the model [11]. In total, 498 rainfall stations and 53 meteorological stations were used [28,29] to collect data. The inflows in the 7 reservoirs were obtained from the Operador Nacional do Sistema Elétrico—ONS (National Electric System Operator) database [30]. The series of inflows to hydroelectric plants used by ONS are called “natural flows” because they were obtained using a methodology that removes the effect of reservoirs. Thus, the operation of hydroelectric plants does not need to be incorporated into hydrological simulations.

The model uses 3 statistics to evaluate the performance of the adjustment (Equations (1)–(3)), namely, Nash–Sutcliffe (NS), which is associated with medium and maximum flows, Nash–Sutcliffe of the logarithms of the streamflows (NSlog), which is related to minimum flows, and volume difference (ΔV), which is the bias between the observed streamflows and those simulated by the model. According to [31], the fit can be classified according to the values of the statistics as shown in Table 1. To determine the parameters, the genetic algorithm optimization technique is used, already incorporated into the model structure, which determines the parameter values through an automatic process.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (1)$$

$$NS_{log} = \frac{\sum_{t=1}^n (\log Q_{obs} - \log Q_{cal})^2}{\sum_{t=1}^n (\log Q_{obs} - \overline{\log Q_{obs}})^2} \quad (2)$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{cal}) - \sum_{t=1}^n (Q_{obs})}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs})} \quad (3)$$

where t indicates the time interval; n is the number of time intervals; V is the volume; ΔV is the dimensionless relative error of this volume; Q_{cal} is the calculated flow at the station; Q_{obs} is the observed streamflow; $\overline{Q_{obs}}$ is the average of the observed flows.

Table 1. Adjustment classification criteria according to the statistics used by MGB-IPH.

Classification	NS or NSlog	ΔV
Very good	>0.75 and ≤ 1.00	$>\pm 10\%$
Good	>0.65 and ≤ 0.75	$\pm 10\% \leq \Delta V < \pm 15\%$
Satisfactory	>0.50 and ≤ 0.65	$\pm 15\% \leq \Delta V < \pm 25\%$
Not satisfactory	≤ 0.50	$\Delta V \geq \pm 25\%$

2.4. Climate Model Projections and Precipitation Bias

Projections of climate variables were obtained from the IPCC’s AR6-CMIP6 information. The observed history of greenhouse gas emissions is taken into account, and future emission scenarios that combine socioeconomic and technological development [23], known as Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), with future scenarios of radioactive forcings, known as Representative Concentration Pathways (RCPs), are used.

The SSP2 scenario considers moderate population growth and a slower convergence of income levels between countries. For the SSP5 scenario, both strong socioeconomic growth and a high use of fossil fuels are expected, as well as potentially large impacts from climate change. The RCP 4.5 scenario considers the stabilization of the radiative forcing at

4.5 W/m² by the end of the century, and RCP 8.5, which is the most pessimistic scenario, considers an increase in the forcing reaching 8.5 W/m² by the end of the century [23].

For this research, we used the results of the NEX-GDDP projections, which provide a statistical downscaling of the CMIP6 projections [32]. The information provided by NEX-GDDP has a high spatial resolution of 0.25°, which is equivalent to approximately 25 km, and is bias-corrected. These projections are ideal for analyzing smaller-scale areas, such as river basins. The data is separated into the historical period from 1970 to 2014 and the scenario projections from 2015 to 2100 for 33 climate models, 5 of which were selected (Table 2).

Table 2. NEX-GDDP-CMIP6 models chosen.

Model	Developed	Country
ACCESS-ESM1-5	Australian Community Climate and Earth System Simulator	Australia
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canada
INM-CM4-8	Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences	Russia
IPSL-CM6A-LR	Institute Pierre-Simon Laplace	France
MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology Earth System Model	Germany

To manipulate the climate projections, computer routines were developed which perform the following operations: correcting the coordinates, cutting out the information for Latin America and the area of interest, calculating the climatology of the variables, concatenating the annual data into a single file, converting the format into text (the format used in the MGB-IPH), correcting leap years for the CanESM5 and INM-CM4-8 models, and interpolating rainfall [33].

With the files duly organized, the existence of biases in the rainfall from the climate models was checked, which can be achieved by comparing the simulated streamflows for the historical period (1970 to 2014) using the observed rainfall (ANA rain gauge stations) and the rainfall from the 5 climate models, where it is expected that, on average, the MGB-IPH model can adequately represent the streamflows with both the observed rainfall and the rainfall from the 5 models. If there are biases in the rainfall, the rainfall can be corrected directly in the MGB-IPH modeling or by applying a technique already established in the literature.

For the other climate variables used by the MGB-IPH model (temperature, wind, radiation, air humidity, and pressure), average values per period are used. To estimate future values, a perturbation of the variables mentioned is generated from the delta variation calculated by Equation (4), attributing the effects of climate change on the parameterization of the MGB-IPH model in the future horizon.

$$\Delta V = (\text{fut} - \text{hist})/\text{hist} \quad (4)$$

where ΔV is the delta change, fut is the monthly climatology of the variable in the future period (2015–2060), and hist is the monthly climatology of the variable in the historical period (1970–2014).

2.5. Projections of Consumptive Uses

In order to extend the monthly demand series to 2060, the methodology adopted was to apply the growth rate observed in the last five years of the historical record for each

of the consumptive use classes. The growth rate values were calculated for each class, according to Equation (5), from 2017 to 2021, and the average of the rates was calculated and assigned to the year 2021. This process is represented in Figure 3a.

$$\Delta C_t = \frac{C_t}{C_{t-1}} \quad (5)$$

where ΔC_t is the growth rate consumption in year t , relative to year $t - 1$, C_t is the average annual consumption of the class in year t , and C_{t-1} is the average annual consumption of the class in year $t - 1$.

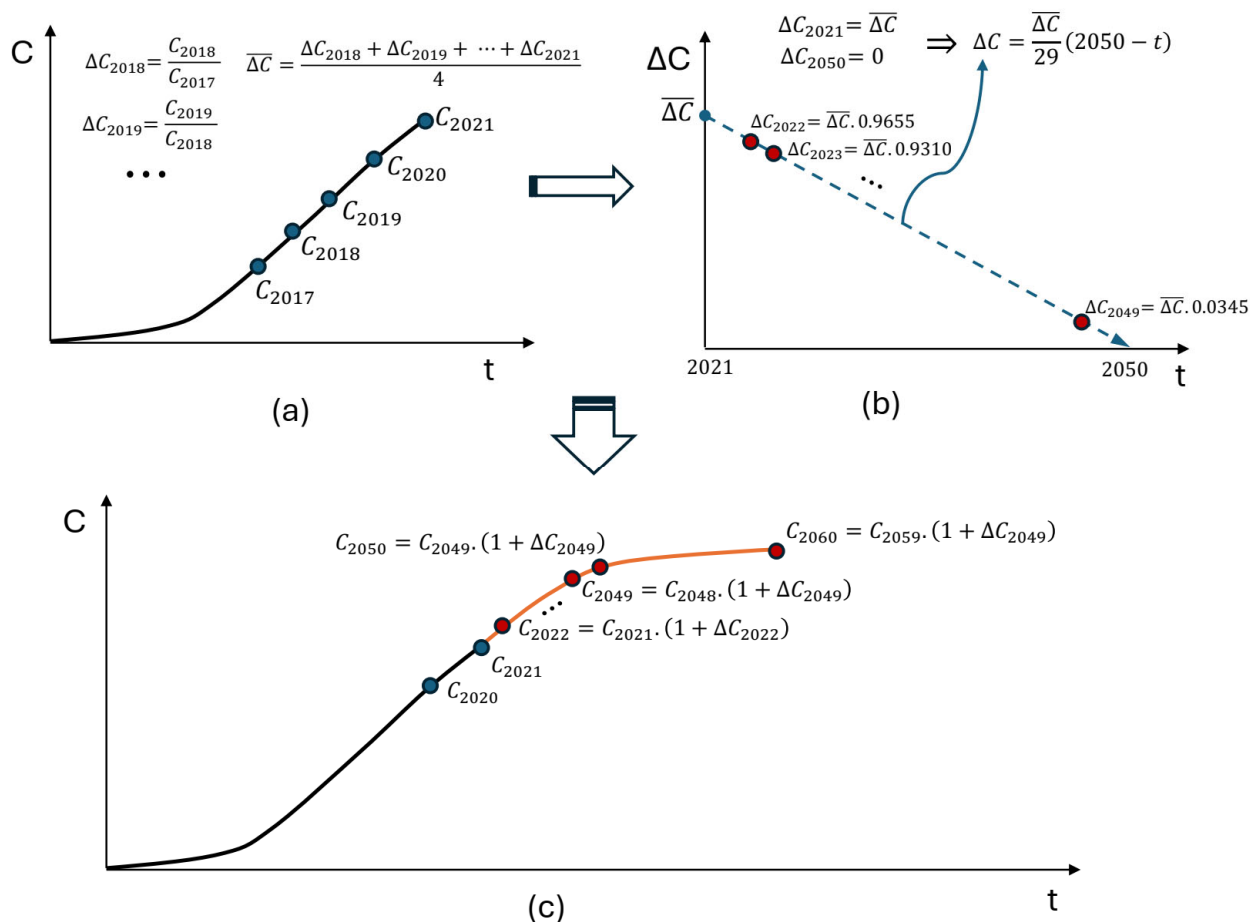


Figure 3. Process for developing water consumption projections based on the growth trend observed in recent years in the historical series. The calculation sequence includes (a) the calculation of the average growth rate, (b) the growth rates for the future period, and (c) the projection of future water consumption.

A linear equation was adjusted, starting in 2021 with the average growth rate, and the variation value was set to 0 for the year 2050 (Figure 3b), the year in which population growth stabilizes according to the Brazilian census [34]. Therefore, the class variation rate is a function of the year (Equation (6)).

$$\Delta C_t^{fut} = \frac{\overline{\Delta C}}{29}(2050 - t) \quad (6)$$

where ΔC_t^{fut} is the consumption growth rate in the future year t ; $\overline{\Delta C}$ is the average consumption growth rate of the last five years in the historic period.

The projected consumption values are calculated from 2022 to 2060 using Equation (7). As can be seen in Figure 3c, from 2050 to 2060, Equation (3) is applied with the growth rate of 2049. In other words, it was considered that despite population stabilization, the water demand will increase at a residual rate equal to that from 1948 to 1949.

$$C_{t+1} = C_t \cdot (1 + \Delta C_{t+1}) \quad (7)$$

This adjustment is made for the classes of water consumption directly influenced by the total population. Therefore, the mining, thermoelectric, and animal watering classes did not have their growth limited until 2050.

To incorporate climate change into the consumption projections, the premise adopted was that these projections are a reference scenario that must be corrected in line with the climate changes of each climate model. To this end, it was assumed that changes in reference evapotranspiration (ET) influence the irrigation class and that changes in average temperature (T) influence human supply (urban and rural) and animal supply. Equation (8) is used to calculate the water consumption correction, which is applied to the consumption projection values for the classes mentioned, thus adding the effect of climate change to the series. Figure 4 shows the procedure used to perform the calculations.

$$C_t^{cc} = C_t \cdot \frac{\overline{ET}_{hist}}{ET_t} \quad (8)$$

where C_t^{cc} is the water consumption corrected with climate change; $\overline{ET}_{hist}$ is the average evapotranspiration from the historic period of the climate model (1970–2014); ET_t is the evapotranspiration of the future year t . Evapotranspiration is replaced by temperature when applied to human and animal supply consumptions.

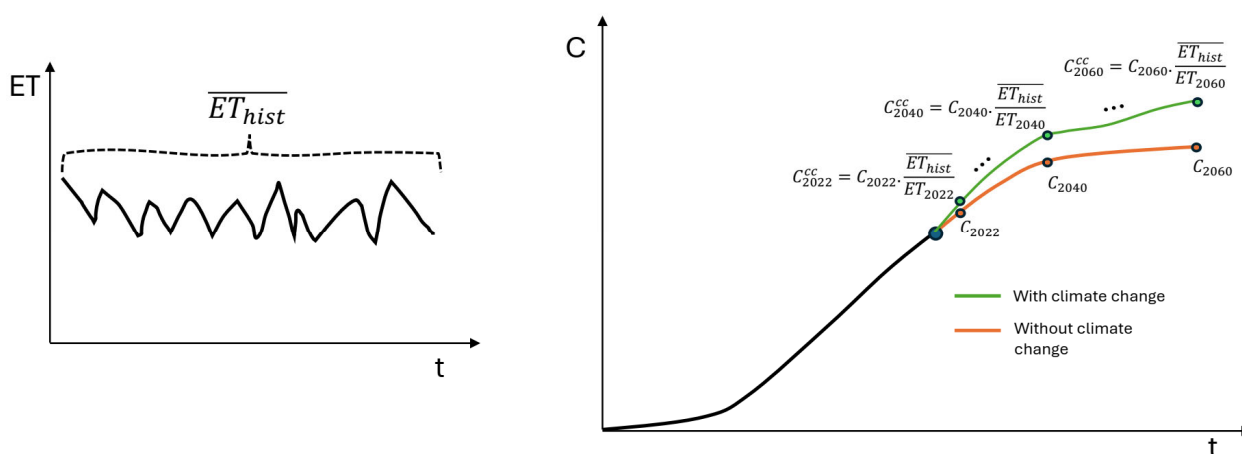


Figure 4. Correction of water consumption projections to incorporate the effect of climate change.

For the other classes, it was assumed that there is no well-defined relationship between climate variables and changes in water demand. Therefore, the effect of climate was not applied to the consumption of mining, thermoelectric plants, and industry.

2.6. Streamflow Projections

The final stage is the comparative analysis of the changes in the future scenarios in relation to the historical scenario. A total of ten combinations are made, with two future scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5) for each of the five climate models used (ACCESS-ESM1-5, CanESM5, INM-CM4-8, IPSL-CM6A-LR, and MPI-ESM1-2-HR).

The water consumption upstream of each hydroelectric plant evaluated in the TARB is taken into account in the streamflow series, subtracting the monthly water consumption values from the projected streamflow series, attributing the combined effect of climate and consumptive water use to the hydroelectric plant inflow series.

2.7. Data and Software Used

The streamflow simulations and projections for the hydroelectric plants are obtained from the Large Basin Model (MGB-IPH) [35]. This was chosen because of its extensive application in Brazilian river basins, its wide range of consultation material, and the fact that it is free software with an interface in a geographic information system (GIS) which is also freely accessible [36]. Among the applications of the MGB-IPH model are hydrological simulations that evaluate scenarios of changes in land use and occupation, streamflow forecasts, and the analysis of the impacts of climate change [14,37–51].

In the pre-processing stage of the MGB-IPH model, where the physiographic information of the basins is inserted, the main input is a digital elevation model (DEM). In this work, we used an MDE with a spatial resolution of 90 m, which has proven to be sufficient for use in the MGB-IPH. A map of hydrological response units (HRUs) is required, which are areas of similar hydrological behavior, defined by cross-referencing information on soil type and land use. In this work, the HRU map for South America is used [52]. Vegetation cover is parameterized by entering monthly values for 4 variables, namely, albedo (α), leaf area index (LAI), tree height (Z), and surface resistance (SR), which make up the so-called fixed parameters of the model, where the typical values used can be found in the literature [35].

The observed flow can be obtained from the National Water and Sanitation Agency's (ANA) fluviometric stations or from the National System Operator (ONS). For rainfall, daily observed rainfall data is needed, which were used from ANA rain gauge stations. Climate data is also required, namely, average temperature ($^{\circ}\text{C}$), relative humidity (%), sunshine (h/day), wind (m/s), and atmospheric pressure (kPa).

For the projections of climate variables, the NEX-GDDP-CMIP6 daily data set was used, in Network Common Data Form (NetCDF) format with a resolution of 0.25° , i.e., approximately 25 km. Five models were selected for use in this work, as shown in Table 2. These models were chosen based on the availability of climate data required for the MGB-IPH hydrological model (precipitation, wind, air humidity, radiation, and temperature), in daily temporal resolution. In addition, models evaluated with good performance over the Brazilian territory were considered.

3. Results and Discussion

3.1. Calibration of the MGB-IPH to the Tocantins–Araguaia River Basin

The process of adjusting MGB-IPH begins with adapting the model to the characteristics of the river basin to be studied. After this pre-processing stage, the physical information of the basin is entered and organized in the main file. From a DEM, the accumulated flow, flow direction, drainage network, and drainage network segmentation files are generated.

As MGB-IPH is a distributed model, the input information is discretized at different levels: the basin level, according to the boundaries shown in Figure 5, and the sub-basin level, obtained from points with flow measurements, i.e., fluviometric stations or, as in this study, hydroelectric dams. Calibration is carried out at this level, and simulated streamflows are also obtained (although it is possible to obtain the flow in any cell, even if they are not flow stations).

The third level is minibasins or cells, which are determined from the confluences of drainage sections or by minimum lengths chosen in the segmentation of the drainage network; in this work, the area was divided into 6072 minibasins. This is where water

balance calculations and propagation in the drainage network take place. Within each minibasin, there is also a division into HRUs, as mentioned above and shown in Figure 5, where it can be seen that there are 9 classes.

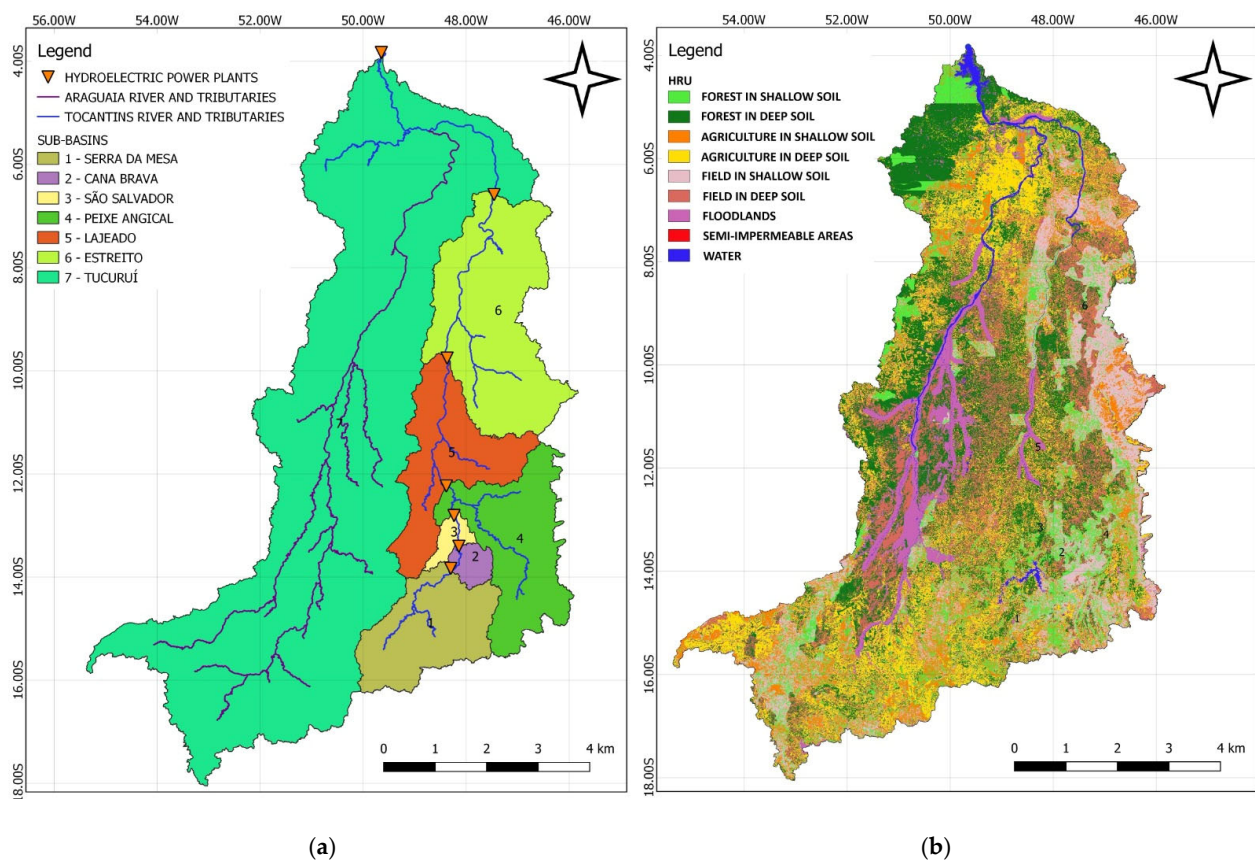


Figure 5. Discretization of the TARB. (a) Discretization of the TARB into sub-basins. (b) Discretization of the TARB into HRUs.

Once the MGB-IPH model had been fully adapted to the TARB, the parameters of the seven sub-basins were automatically calibrated. The results of the fit obtained can be seen in Table 3, which shows the efficiency statistics, where it can be seen that the fit can be classified as “very good” according to the classification in Table 3. Figure 6 shows the hydrograph of observed daily streamflows versus the streamflows simulated by the MGB-IPH model after calibration to Tucuui HPP, corroborating the classification of the fit as very good, since there is adherence between the observed and simulated streamflow curves. More information about the calibration results of the MGB-IPH model to TARB, like parameter values, is available in Supplementary Materials.

Table 3. MGB-IPH model fit statistics for the TARB.

Sub-Basin	Hydroelectric Power Plant	NS	Nslog	ΔV
1	UHE Serra da Mesa	0.863	0.880	4.852
2	UHE Cana Brava	0.866	0.868	5.577
3	UHE São Salvador	0.872	0.867	5.576
4	UHE Peixe Angical	0.871	0.884	5.985
5	UHE Lajeado	0.915	0.906	8.073
6	UHE Estreito	0.907	0.902	7.493
7	UHE Tucuruí	0.911	0.943	6.821

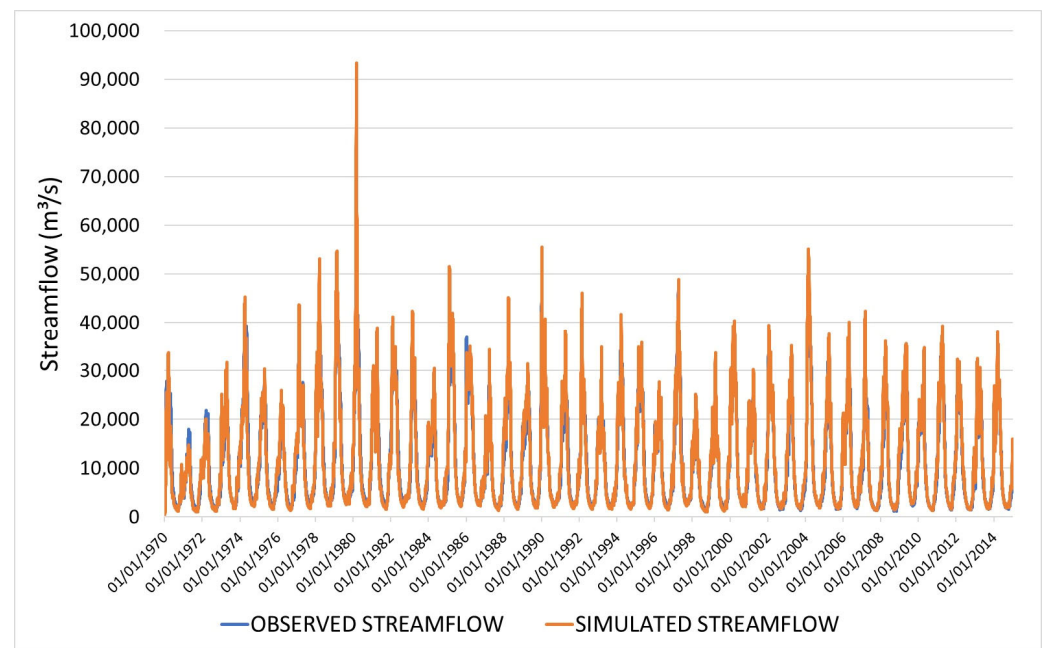


Figure 6. Streamflow hydrographs observed and simulated by MGB-IPH to Tucuruí HPP.

3.2. Checking the Precipitation Bias of Climate Models for the Historical Period

The verification is performed as described in Section 2.4, comparing the streamflows simulated by the MGB-IPH model fed by observed rainfall with the simulated streamflows of the model now fed by rainfall from the NEX-GDDP/CMIP6 climate models. This type of procedure is necessary because the model has not been adjusted for the rainfall from the climate models, and therefore it is necessary to check for possible biases in the rainfall. The concern will not be with the daily values or the three efficiency statistics used by the MGB-IPH, but with the average values of simulated streamflows. From this verification, it is assumed that if the MGB-IPH model is able to adequately simulate streamflows being fed by rainfall from the climate models for the historical period, it will also be able to simulate streamflows for the future period (2015 to 2060) using the rainfall projected by the climate models.

The results presented in Figure 7 show that, on average, the climate models are able to represent streamflows quite satisfactorily, something that can be confirmed by the shape of the graphs. In general, the flows simulated with rainfall from the climate models overestimate the flows simulated with observed rainfall, in the months from March to June, with a few exceptions, such as in Figure 7d, where from May onwards, the flow simulated with rainfall from the climate models underestimates the flows simulated with observed rainfall, and in Figure 7e, where in almost all the months, the flows simulated with rainfall from the climate models underestimate the flows simulated with observed rainfall.

Considering the dry period from April to September and the wet period from October to March, the streamflows simulated by the climate models underestimate streamflows by 0.5% in the wet period and overestimate by 3.5% in the dry period for the ACCESS-ESM1-5 model; underestimate streamflows by 5.1% in the wet period and 4.8% in the dry period for the CanESM5 model; underestimate streamflows by 3.8% in the wet period and overestimate by 1, 2% in the dry period for the INM-CM4-8 model; underestimate streamflows by 6.7% in the wet period and 2.7% in the dry period for the IPSL-CM6A-LR model; and underestimate streamflows by 5% in the wet period and 4.1% in the dry period for the MPI-ESM1-2-HR model.

Although there are some differences between the streamflows simulated with rainfall from the climate models and the streamflows simulated with rainfall and observed rainfall,

especially in the wet period (December to March), in general, the MGB-IPH model is considered to be able to represent this adequately and quite satisfactorily, since the variation in the simulations is within the MGB-IPH model adjustment error and within a limit of $\pm 10\%$, which is considered acceptable.

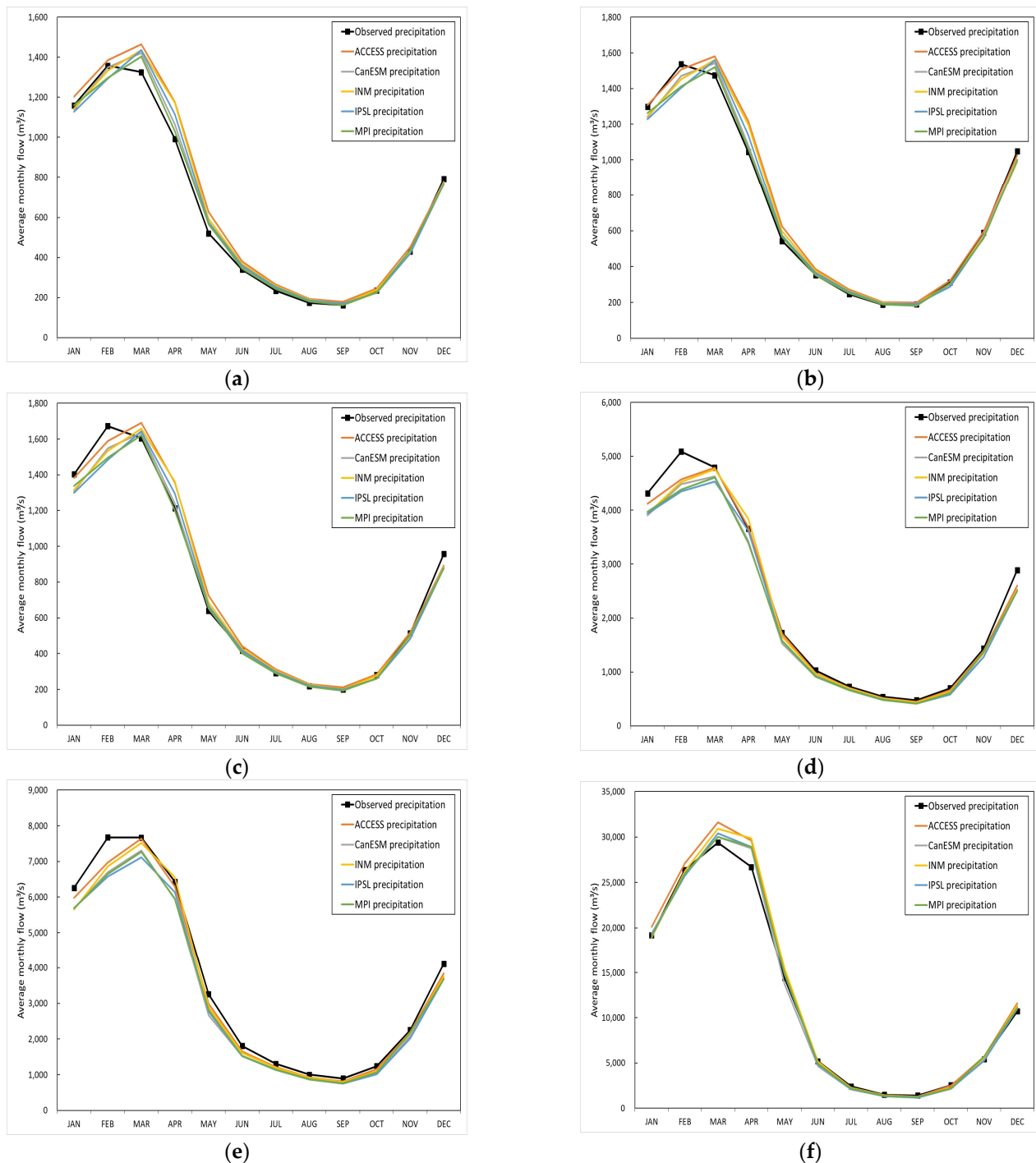


Figure 7. Monthly averages of streamflows simulated with observed rainfall and rainfall from climate models. (a) Serra da Mesa hydroelectric power plant, (b) Cana Brava hydroelectric power plant, (c) São Salvador hydroelectric power plant, (d) Lajeado hydroelectric power plant, (e) Estreito hydroelectric power plant, and (f) Tucuruí hydroelectric power plant.

The results are analyzed in terms of average values, since the projections do not reproduce streamflow events from specific periods, such as the driest or wettest years in the

series. What is expected is that the projections satisfactorily represent the average characteristics of the period. Based on the results obtained, it is assumed that it is not necessary to correct for bias in the rainfall of climate models for the simulation of streamflows with MGB-IPH and that in the future, the model will continue to be able to simulate adequately.

Another measure that can be used to verify the simulations is the long-term average streamflow (QMLT) of the streamflow simulations with the observed rainfall and the rainfall from the climate models. The largest variation between the QMLTs was -10.5% for the IPSL-CM6A-LR model for sub-basin 6 (UHE Estreito) and the smallest variation was -0.4% for the CanESM5 model in sub-basin 2 (HPP Cana Brava) and for INM-CM4-8 in sub-basin 3 (HPP São Salvador), for IPSL-CM6A-LR in sub-basin 2 (HPP Cana Brava), and $+0.4\%$ for the CanESM5 model in sub-basin 7 (HPP Tucuruí).

It should be noted that only rainfall bias was verified, and it was concluded that bias correction was not necessary. As mentioned, the statistical downscaling technique Bias Correction and Spatial Downscaling (BCSD) applied in the NEX-GDDP/CMIP project is a method that corrects biases in GCM results and then reduces the spatial scale to a more accurate resolution [3].

The mentioned verification was performed to check whether, on average, the MGB-IPH simulations with rainfall from climate models could be compared to simulations with observed rainfall from rain gauges. The objective was to infer that even if the hydrological model was not calibrated with rainfall from climate models, as the simulations adhered to the historical period in average terms, the projections would also adhere.

3.3. Projections for Consumptive Uses of Water

Projections for the consumptive use of water point to an increase in demand throughout Brazil [9]. The BHTA is no different, with projections indicating an increase in consumption for all sectors. Figure 8 shows three maps with the evolution (1940, 1980, and 2030) of water withdrawals by municipality.

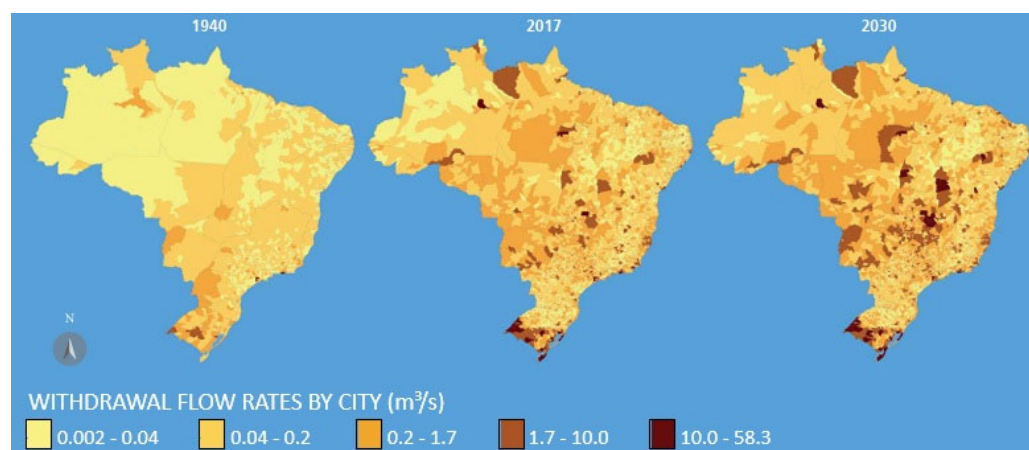


Figure 8. Evolution of water withdrawals by municipality [10].

After applying the methodology described previously, in Figure 9a–d are presented the historical (1931–2021) and projected (2022–2060) series for urban human consumption, industry, animal watering, and irrigation, respectively, upstream of the Tucuruí HPP, where we can see the most pronounced growth in demand up to the year 2050, with a gradual variation as proposed in the work. There is an exception for the animal watering class, since this is not related to population growth, so the projection is simply made using the linear adjustment equation for the historical period.

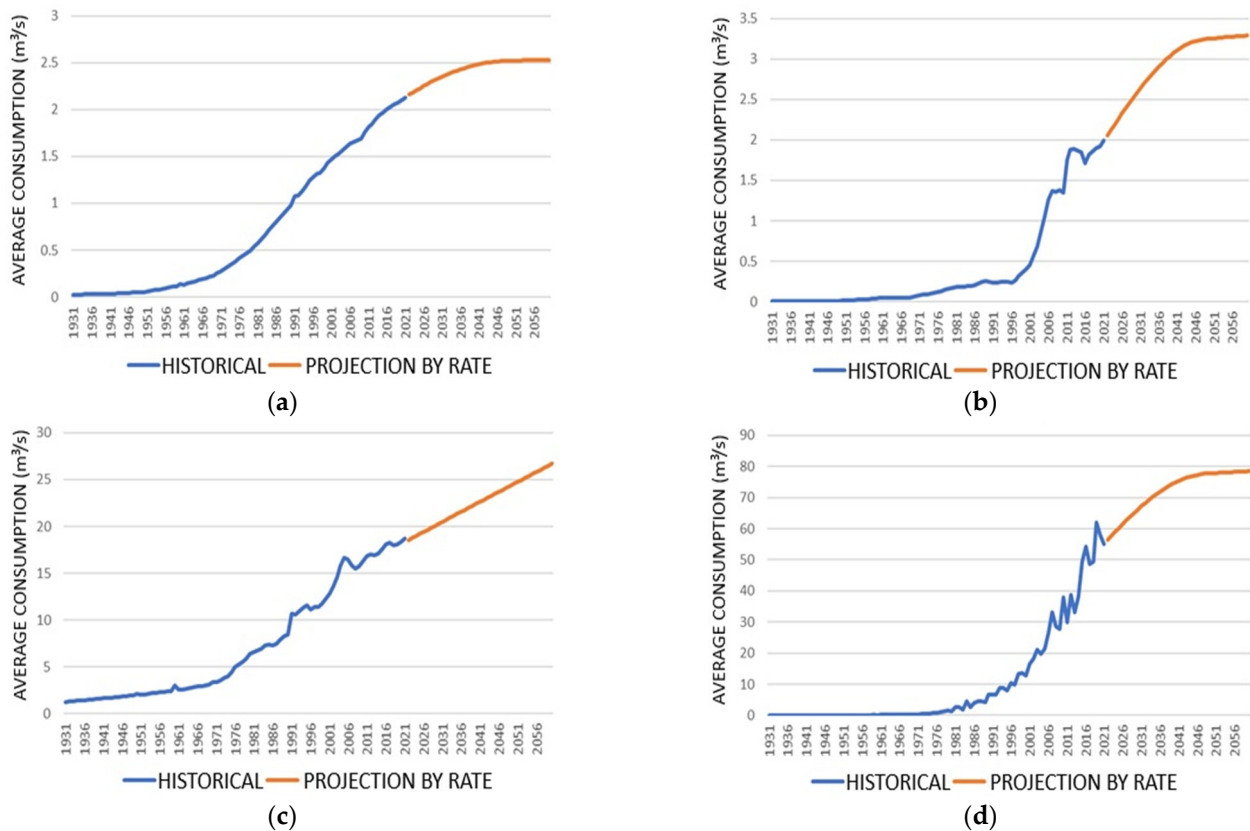


Figure 9. Historical and projected water demands upstream of the Tucuruí HPP. (a) Human urban average consumption, (b) industry average consumption, (c) animal watering average consumption, and (d) irrigation average consumption.

Average consumption upstream of the Tucuruí HPP is expected to reach 115 m³/s in 2060, increasing the demand seen in 2021 by 41%. Finally, the same methodology was applied to the seven TARB dams evaluated, and the results show the same results as for the Tucuruí HPP, differing only in the magnitude of average water consumption. Figure 10 shows the results for the Tucuruí HPP incremental basin (sub-basin 7). The dashed line is the reference scenario, with no climate change, and the other lines represent the same scenario with the influence of the projections from each of the climate models for the two emission scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5).

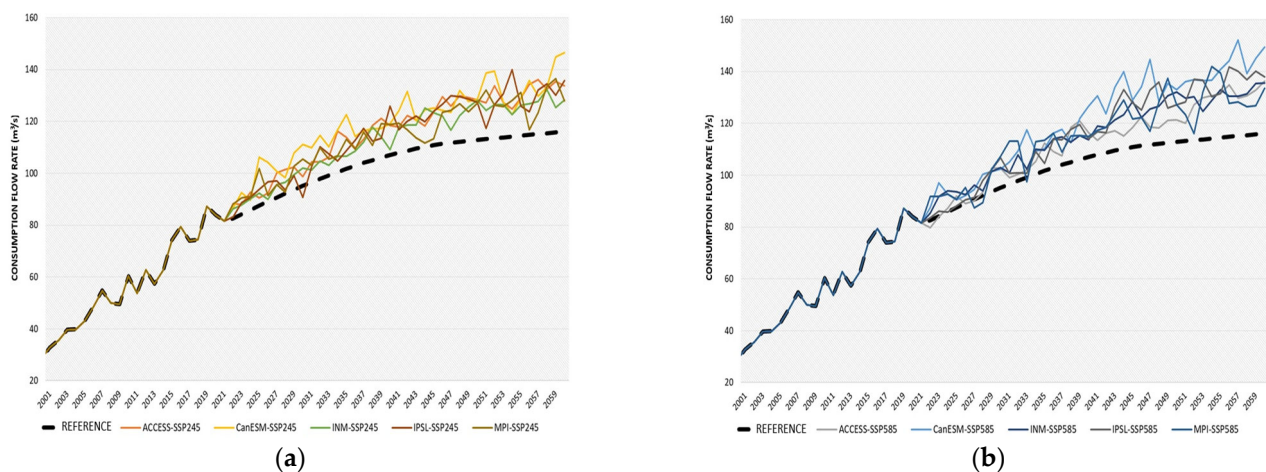


Figure 10. Projections of water consumption from the Tucuruí HPP. (a) Tucuruí HPP to SSP2-4.5 scenario and (b) Tucuruí HPP to SSP5-8.5 scenario.

3.4. Streamflow Simulations for the Future Period

The future period of the NEX-GDDP/CMIP6 climate projections covers 2015 to 2100. The historical period from 1 January 1970 to 31 December 2014 and the future period from 1 January 2015 to 31 December 2060 will be used for the analysis. The results will be analyzed separately for the two emission scenarios, SSP2-4.5 and SSP5-8.5. To simplify the presentation and analysis of the results, the impacts on minimum, average, and maximum flows are presented below. Minimum flows are represented by the flow rate Q95%, which corresponds to the flow rate that remains 95% of the time in the time series. In other words, 95% of the time the flows are greater than Q95%. Average flows are represented by the average of the series and maximum flows by Q5%, which indicates a flow rate that is equaled or exceeded only 5% of the time.

The streamflow projections also point to changes in extreme flow patterns, which are even more pronounced. Figure 11a shows reductions in maximum streamflows (Q5%) for the ACCESS and CanESM models of 25% and 22%, respectively, in the SSP2-4.5 scenario for the Tucuruí HPP, while the INM model shows an increase of more than 10%. Still on the subject of maximum flows (Figure 11b), the downward trend is enhanced in the SSP5-8.5 scenario, with four models pointing to reductions (ACCESS and CanESM5 being even more significant), but the INM-CM4-8 model continues to point to an increase in flood flows of up to 20%.

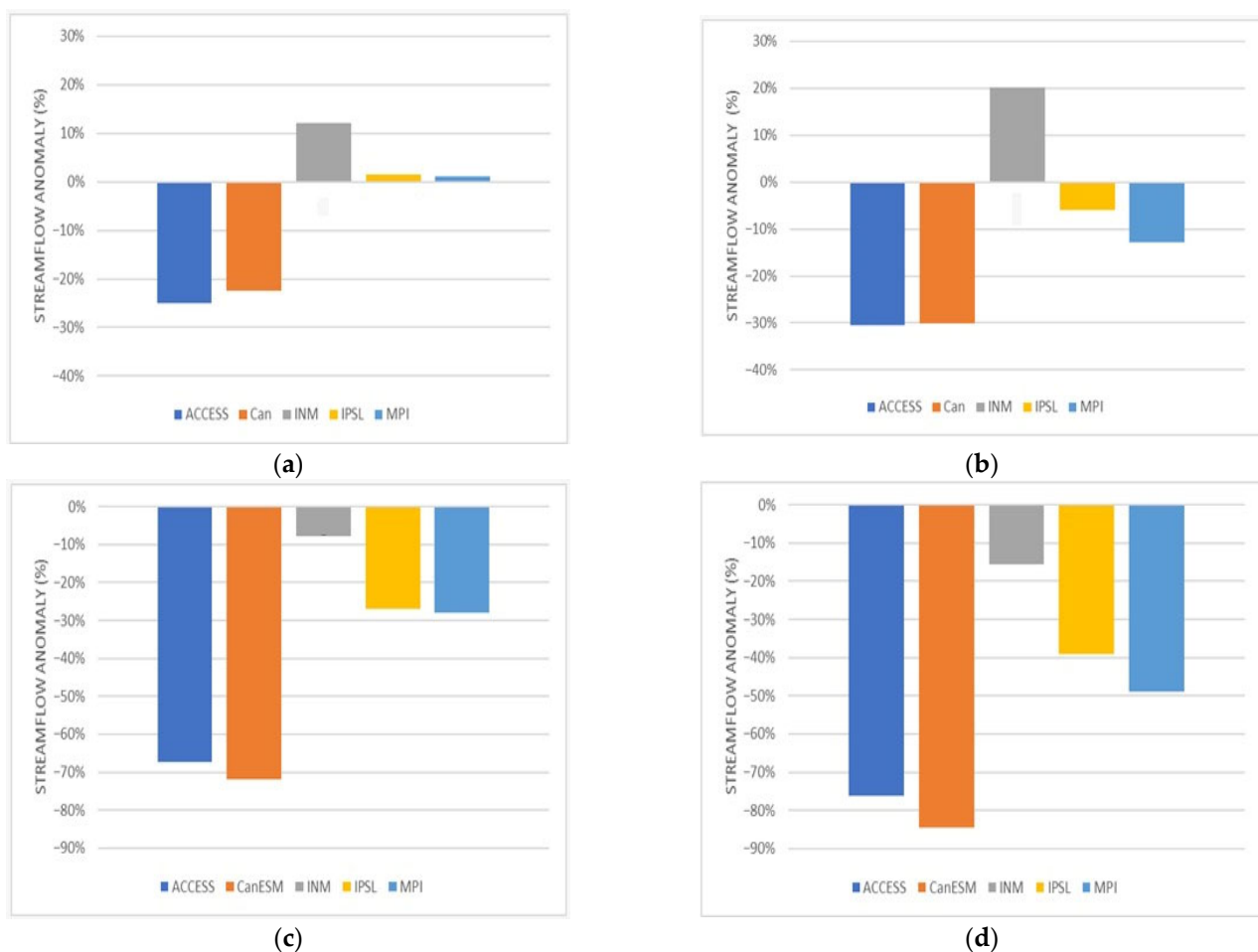


Figure 11. Anomaly of the extreme streamflows (5% and 95%) for the Tucuruí HPP. (a) Streamflow (5%) to the SSP2-4.5 scenario, (b) streamflow (5%) to the SSP5-8.5 scenario, (c) streamflow (95%) to the SSP2-4.5 scenario, and (d) streamflow (95%) to the SSP5-8.5 scenario.

Analyzing the minimum flows (Q95%), shown in Figure 11c,d, it can be seen that all the forecasts point to reductions in streamflows, and, as expected, these are of greater magnitude in the SSP5-8.5 emission scenario, with the ACCESS-ESM1-5 and CanESM5 models standing out, with reductions of approximately 75% and 85%, respectively. In the case of flow Q95, which is a flow during the river's dry season, there is greater sensitivity to changes in climate variables. As can be seen in Figure 12, the scenarios show a very small absolute difference in relation to the historical data. However, these differences become significant when expressed in percentage terms. Therefore, these higher reductions should be viewed with caution, due to the considerable uncertainties involved in the models and scenarios used. Similar reductions in minimum streamflows have occurred in the past, particularly between 1949 and 1956.

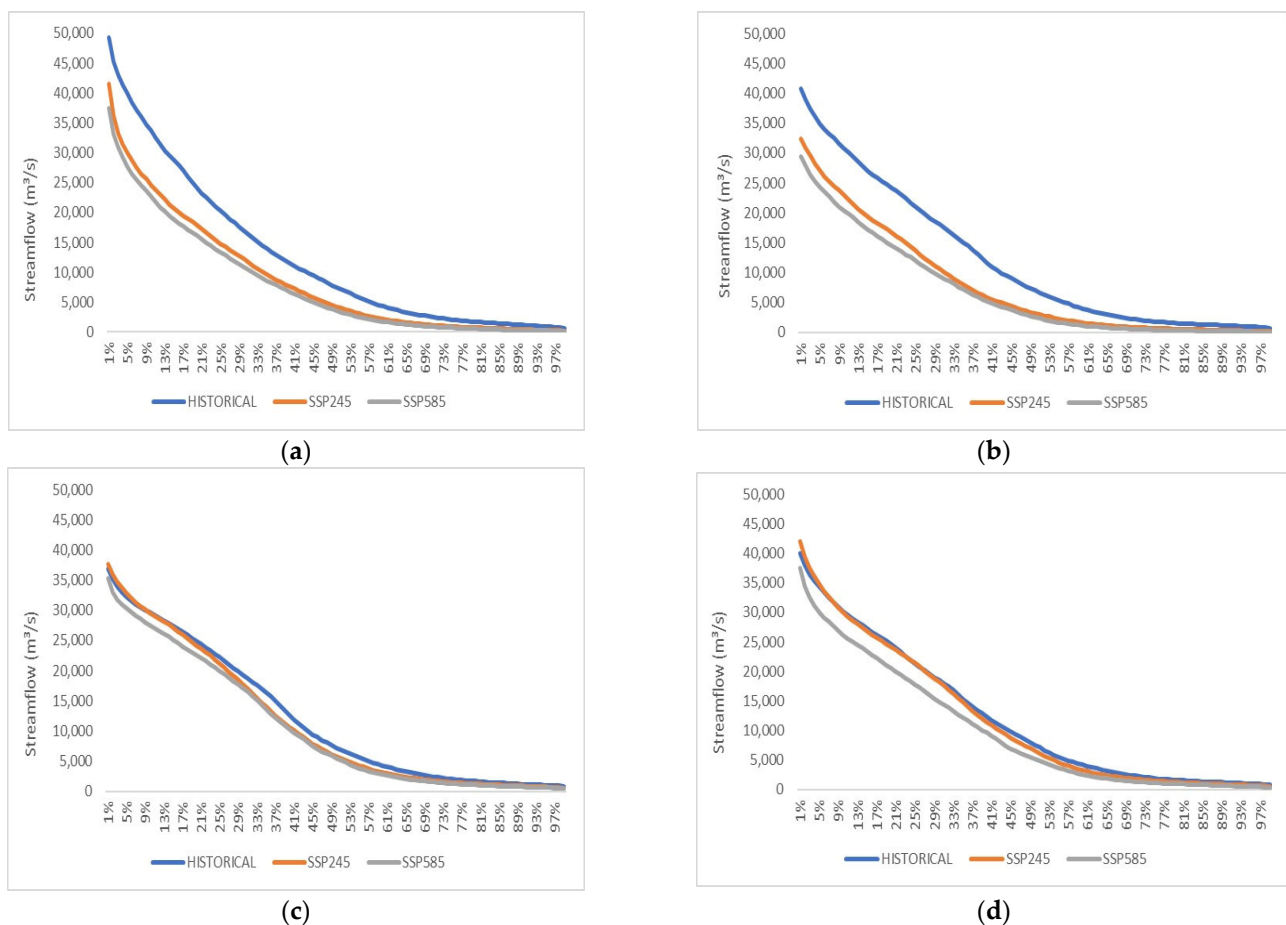


Figure 12. Historical and future permanence curves (SSP2-4.5 and SSP5-8.5) for the Tucuruí HPP. (a) Climate model ACCESS, (b) climate model Can, (c) climate model IPSL, and (d) climate model MPI.

Figure 12 shows the behavior of the permanence curve for the historical period (1970–2014) and the future period (2015–2060) of the Tucuruí HPP. It can be seen that depending on the climate model, the reductions in streamflows in the future period can be more or less intense. The ACCESS and CanESM models point to the greatest reductions. The SSP5-8.5 scenario also indicates slightly greater reductions than SSP2-4.5.

After removing the consumptive use portions of the natural flow series, the inflows are obtained. Figure 13 shows the effects of changes in water consumption patterns associated with climate change on the QMLTs of the São Salvador HPP and Tucuruí HPP. Withdrawals from consumptive uses represent reductions in QMLT of between 2.76% and 3.45% for

the São Salvador HPP and reductions of between 0.64% and 0.83% for the Tucuruí HPP, depending on the model and emission scenario.

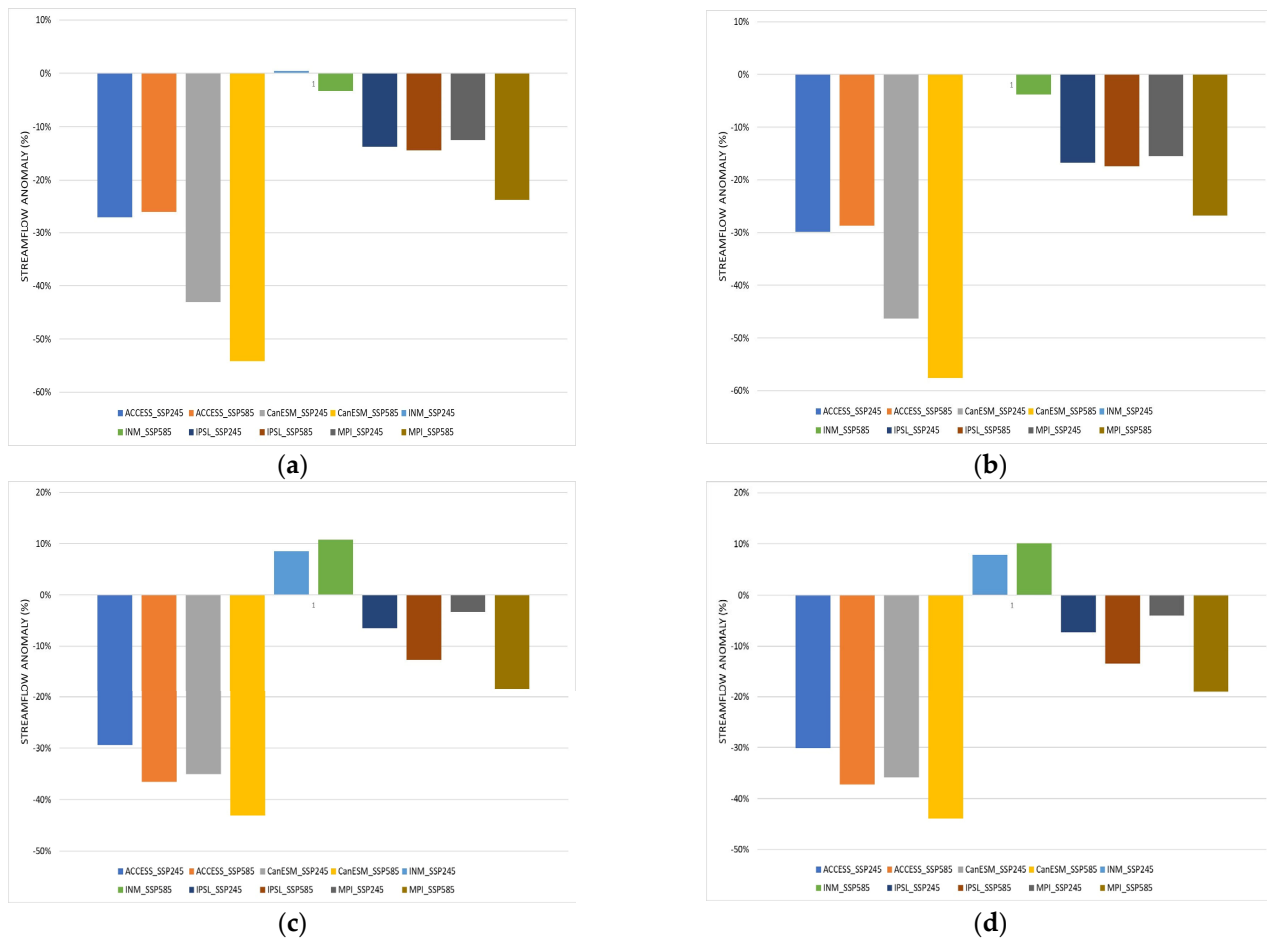


Figure 13. Historical and future anomalies in average inflows (SSP2-4.5 and SSP5-8.5) for São Salvador e Tucuruí HPP. (a) Natural streamflow of São Salvador HPP without removal of consumptive uses. (b) Influent streamflow of São Salvador HPP with removal of consumptive uses. (c) Natural streamflow of Tucuruí HPP without removal of consumptive uses. (d) Influent streamflow of Tucuruí HPP with removal of consumptive uses.

It can be seen that the estimates continue to be for reductions for four of the five models evaluated; however, the INM-CM4-8 model indicates a positive streamflow anomaly of approximately 10% for both emission scenarios for the Tucuruí HPP.

The ACCESS-ESM1-5 and CanESM5 models indicate the greatest reductions in streamflows in the future, with CanESM5 for the São Salvador HPP achieving reductions of around 60% after withdrawals of consumptive uses, something that was also verified for the CanESM5 model for the flow of two reservoirs analyzed in the São Francisco river basin [23], differing only in the magnitude of the negative anomaly, which was approximately 40%.

Figure 12 compares the results with and without water withdrawal. There are differences due to water withdrawal, but they are insignificant compared to the changes due to climate. Overall, the SSP5-8.5 scenario presents greater reductions in QMLT than the SSP2-4.5 scenario. In the case of the São Francisco River, there are also some cases of positive streamflow anomalies [23], with the IPSL-CM6A-LR model standing out, reaching approximately 10% average increase in future streamflows.

It can also be seen that the models were uncertain as to the sign and magnitude of the average streamflow anomalies for all the hydroelectric plants evaluated, but most of the indications were of reductions in QMLT, something also observed in other works [3,23], as well as in the extreme Q5% and Q95% streamflows, with the exception always being the INM model.

In an analysis of the 33 NEX-GDDP/CMIP6 models [3], average anomalies were generated for all the Brazilian Ottobasins; as shown in Figure 14, it can be seen that the ACCESS model showed a flow anomaly ranging from -50% to 22% and an average and mean of around -15% ; the CanESM model ranged from -100% to 25% and averaged close to -27% ; the INM model varied from -25% to 30% and averaged close to 1% ; the IPSL model ranged from -55% to 50% and averaged close to -5% ; and the MPI model ranged from -40% to 30% and averaged approximately -2% for the SSP2-4.5 scenario.

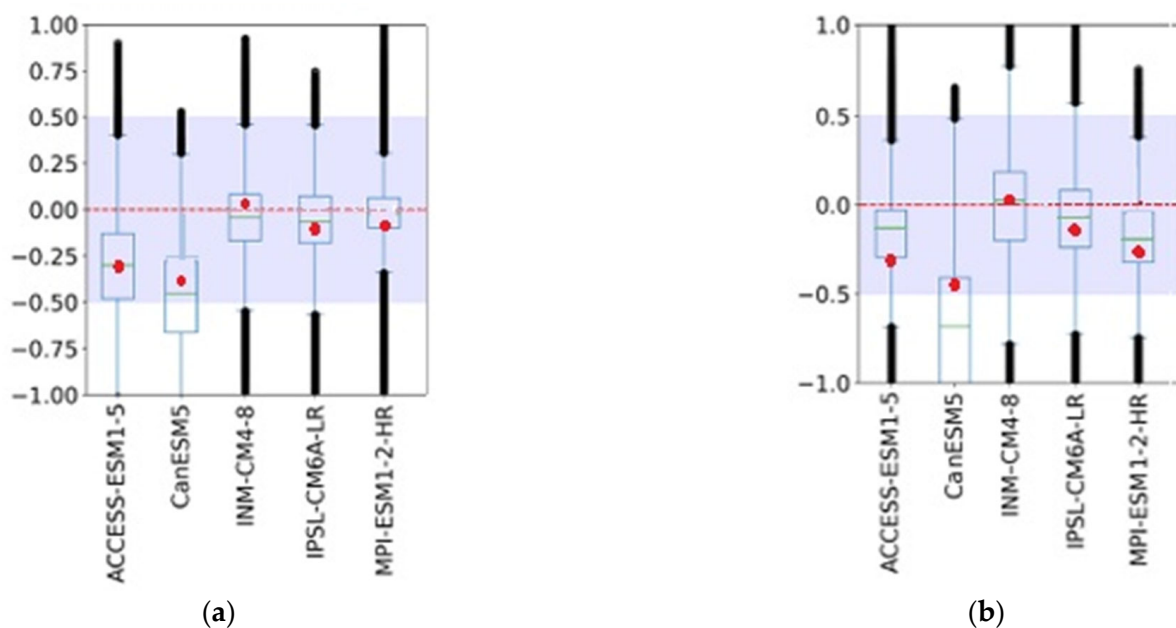


Figure 14. Flow anomalies for the five models evaluated for Brazilian basins [3]. (a) Scenario SSP2-4.5 to the period 2041–2070 and (b) scenario SSP5-8.5 to the period 2041–2070.

In the worst-case scenario (SSP5-8.5), the negative anomalies were of greater magnitude: the ACCESS model showed a flow anomaly ranging from -85% to 40% and averaging around -20% ; in the CanESM model, the flow anomaly ranged from -100% to 20% and averaged close to -30% ; in the INM model, the anomaly variation was from -30% to 30% and averaged close to 0% ; in the IPSL model, it ranged from -30% to 50% and averaged close to 0% ; and in the MPI model, it ranged from -30% to 25% and averaged approximately -5% . The average values from this work are shown in Figure 13 (red circles) for the period between 2041 and 2070, which confirms that the average values obtained in [3] are consistent with those obtained in this work.

Compared with the average results of the five models obtained by [3], it can be seen that the results of the streamflow anomalies obtained in this work are within the variation ranges of the models, corroborating the results found here.

Considering the average of the five climate models (ensemble), for Q5%, the variations are between -6.5% and -13% for the ensemble of the five models and scenario SSP2-4.5 and from -11.8% to -16.4% for the ensemble of the five models and scenario SSP5-8.5. QMLT varies between -13.2% and -19.4% for the ensemble of the five models and scenario SSP2-4.5 and between -20% and -24.5% for the ensemble of the five models and scenario SSP5-8.5. With regard to Q95%, the variations are between -30.7% and -40.4% for the

ensemble of the five models and scenario SSP2-4.5 and between -40.7% and -52.9% for the ensemble of the five models and scenario SSP5-8.5.

When we compare the results of similar assessments for the São Francisco river basin, we find that the Tocantins–Araguaia basin resulted in a greater decline in flows. These differences are related to the models and scenarios used in the studies but are also due to the physical and climatic characteristics. The São Francisco and Tocantins–Araguaia basins have striking climatic contrasts. São Francisco has a semi-arid climate in the Northeast (500–800 mm/year) and a more humid climate in the upper course (1000–1500 mm/year), with prolonged droughts that affect hydroelectric plants such as Sobradinho. Tocantins–Araguaia, under Amazonian influence, has a humid tropical climate (1500–2500 mm/year). While São Francisco depends on the ZCAS and is vulnerable to Atlantic warming, Tocantins is more stable but sensitive to deforestation in the Amazon. Prolonged periods of drought are common in the São Francisco River, and future scenarios only increase this characteristic a little further. In the case of the Tocantins–Araguaia River, future scenarios with reduced rainfall may bring impacts that are not yet known, due to the sensitivity of the transition ecosystem between the Amazon and Cerrado biomes [8].

It is important to highlight that despite the significant growth in water demand throughout the basin, for large hydroelectric plants, the major impact does not stem from the water consumption analyzed here. The greatest impact stems from climate change, mainly from the volume of rainfall over the basin. The greatest risk lies in the dry season, which often significantly reduces streamflow. As the largest water withdrawals tend to occur during this period, there will be an increased risk of conflicts over water use. In addition, for small hydroelectric plants, not analyzed in this study, the impacts of water consumption are greater, since water consumption for irrigation tends to be concentrated in areas with small rivers.

Considering the results obtained, it is important to highlight the need to adapt hydroelectric generation to climate change. An important measure is to combine energy diversification, operational modernization, and sustainable resource management. Integration with complementary renewable sources (solar and wind) and hybrid systems (such as floating hydro-solar plants) reduces exclusive dependence on hydrological regimes. Operational efficiency can be improved with turbines adapted to low flows and advanced hydrological forecasting models. Adaptive reservoir management and coordination between cascade plants help to balance supply and demand.

No less importantly, the conservation of river basins, through reforestation and erosion control, maintains river flow and reduces reservoir silting. Investing in resilient infrastructure, such as small hydroelectric plants (SHPs) and multifunctional dams (for irrigation and supply), also increases water security. Furthermore, public policies must review granting criteria and create contingency plans for droughts, ensuring backup energy (thermal power plants) in emergencies.

4. Conclusions

Considering that the fit of distributed hydrological models is strongly dependent on the quality of the available data, including its spatial and temporal distribution, the model's fit can be considered very good, as indicated by the NS and NSLog statistics, which were higher than 0.90 for the historical period (1970 to 2014). When checking for biases, these were not found since the average monthly streamflows were consistent, with some minor problems in the maximum streamflows, which can be associated with the error in the adjustment of the MGB-IPH. With this, it can be inferred that the hydrological model will also be able to adequately simulate streamflows in the future (2015 to 2060) without the need to correct for biases in rainfall from climate models.

Simulations of the future horizon indicate reductions in the streamflows of the TARB hydroelectric dams analyzed in this study. The CanESM and ACCESS models showed the greatest negative anomalies in streamflows for all the dams, but the other models, with a few exceptions, agreed with the reduction in streamflows. As expected, the high GHG emissions scenario (SSP5-8.5) shows even more significant reductions in streamflows when compared to the intermediate emissions scenario (SSP2-4.5).

The demand for consumptive uses in the BHTA show growth from the historical period to the future period, with highlights for the irrigation, animal watering, and mining classes, which practically double their consumption by 2060. When the flows from consumptive uses of water were subtracted from the series of streamflows from the reservoirs, it was noted that the anomalies became even more negative, reaching a maximum reduction of 4%. However, the effects of water demand cannot be compared to the effects of climate change, especially in the ACCESS and CanESM models, which pointed to reductions of more than 50%.

Although the results obtained here confirm those of other studies, it is recommended that further analysis be carried out in order to better quantify the uncertainties of the projections and the combined impacts of climate change and anthropogenic alterations in the basin. Other recommendations include the use of a greater number of CMIP6 climate models, the application of more detailed spatial resolution projections through statistical downscaling, and testing alternative scenarios for consumptive water use projections, including projections from dynamic land use models, among other analyses that could be implemented. Finally, it is important to assess the impacts on hydroelectric power generation in the basin, which occupies an important place in the Brazilian energy matrix.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22336.65289>.

Author Contributions: Conceptualization, B.C.d.S., J.W.M.d.L. and F.O.P.; methodology, B.C.d.S. and F.O.P.; software, P.H.G.M., M.d.A.B. and R.M.M.; validation, B.C.d.S.; formal analysis, F.O.P.; writing—original draft preparation, F.O.P.; writing—review and editing, B.C.d.S., J.W.M.d.L., F.O.P., P.H.G.M., M.d.A.B. and R.M.M.; funding acquisition, B.C.d.S. and J.W.M.d.L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico—CNPq, processo n. 140251/2021-9 (Edital MAI/DAI 2020).

Data Availability Statement: Data will be made available on request.

Acknowledgments: We are grateful to the Agência Nacional de Águas (ANA, National Water Agency) for generously providing the data from rainfall stations and streamflow stations, and for consumptive use data for the Tocantins–Araguaia river basin.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Zákhaia, E.M.S.; Alvarenga, L.A.; Tomasella, J.; Martins, M.A.; Santos, A.C.N.; Melo, P.A. Impactos das Mudanças Climáticas em uma Bacia Hidrográfica no Sul do Estado de Minas Gerais. *Rev. Bras. Meteorol.* **2021**, *36*, 667–681. [CrossRef]
2. Silva, M.V.M.; Marcos Júnior, A.D.; Silva, G.K.; Nóbrega, M.R.R.; Lima, C.E.S.; Silveira, C.S. Impacto dos cenários de mudanças climáticas e demandas consuntivas no desempenho dos reservatórios do rio São Francisco, Brasil. In Proceedings of the XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Brazil, 21–26 November 2021; Available online: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=13446> (accessed on 12 January 2025).

3. ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil. 2024. Available online: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/31604c98-5bbe-4dc9-845d-998815607b33/attachments/Mudancas_Climaticas_25012024.pdf (accessed on 14 January 2025).
4. Marengo, J.A. Água e mudanças climáticas. *Estud. Avançados* **2008**, *22*, 83–96. [CrossRef]
5. Artaxo, P. Biomas brasileiros e as mudanças climáticas: Políticas de adaptação ao novo clima, consequentes e baseadas em ciência, são necessárias e urgentes. *Cienc. Cult.* **2023**, *75*, 1–8. Available online: <https://revistacienciaecultura.org.br/?artigos=biomas-brasileiros-e-as-mudancas-climaticas> (accessed on 5 January 2025). [CrossRef]
6. da Silva, R.O.B.; Montenegro, S.M.G.L.; de Souza, W.M. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. *Eng. Sanit. Ambient.* **2017**, *22*, 579–589. [CrossRef]
7. EPE. Empresa DE Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional. 2024. Available online: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024> (accessed on 3 January 2025).
8. Serrão, E.A.d.O.; Pontes, P.R.M.; Cavalcante, R.B.L.; Xavier, A.C.F.; Ferreira, T.R.; Terassi, P.M.d.B. Hydrological processes in a watershed on the transition from Amazon to Cerrado in Brazil. *J. S. Am. Earth Sci.* **2023**, *129*, 104507. [CrossRef]
9. Moreira, J.P.P.C.; Pedreno, G.Y.O.; Bruce Neta, I.B.; Souza, R.J.; Alves, N.S.; Silva, J.S. Gestão e usos consuntivos da água: Comparativo entre Brasil, Amazonas e Manaus. In Proceedings of the XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, 21–26 November 2021; Available online: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=13329> (accessed on 7 January 2025).
10. ANA—Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Usos Consuntivos da Água no Brasil: Usos Consuntivos à Montante. 2019. Available online: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/c239a66f-6b41-4b7e-9790-> (accessed on 3 January 2025).
11. Lima, J.W.M.; Collischonn, W.; Marengo, J.A. *Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica*, 1st ed.; AES Tietê: São Paulo, Brasil, 2014; 360p.
12. Moura, C.N.; Mine, M.R.M.; Kaviski, E. Incertezas e impactos de mudanças climáticas nos recursos hídricos. In *Anais do XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica—Hidrologia Superficial e Subterrânea, Proceedings of the XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina, 18–21 September 2018*; Argentina.gob.ar: Buenos Aires, Argentina, 2018; Volume 2, pp. 1402–1413.
13. Ahlaley, E.K.; Kabo-Bah, A.T.; Gyamfi, S. Impacts of LULC and climate changes on hydropower generation and development: A systematic review. *Heliyon* **2023**, *9*, e21247. [CrossRef]
14. Santana, T.B.; Silva, B.C.; Santos, A.H.M. Estimativa de impactos de mudanças climáticas em bacias do Atlântico Leste. In Proceedings of the XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, Brazil, 17–22 November 2013; Available online: https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=155&SUMARIO=3451&ST=estimativa_de_impactos_de_mudancas_climaticas_em_bacias_do_atlantico_leste (accessed on 9 January 2025).
15. Silveira, C.S.; Souza Filho, F.A.; Porto, V.C.; Cabral, S.L.; Lemos, W.E.D. Análise das projeções de vazão sobre as principais bacias do setor elétrico brasileiro usando dados provenientes do CMIP5 para o cenário RCP8.5 para o século XIX. In Proceedings of the XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, Brazil, 17–22 November 2013.
16. Avesani, D.; Galletti, A.; Piccolroaz, S.; Bellin, A.; Majone, B. A dual-layer MPI continuous large-scale hydrological model including Human Systems. *Environ. Model. Softw.* **2021**, *139*, 105003. [CrossRef]
17. Miller, O.L.; Putman, A.L.; Alder, J.; Miller, M.; Jones, D.K.; Wise, D.R. Changing climate drives future streamflow declines and challenges in meeting water demand across the southwestern United States. *J. Hydrol. X* **2021**, *11*, 100074. [CrossRef]
18. Ahmadzadeh, H.; Mansouri, B.; Fathian, F.; Vaheddoost, B. Assessment of water demand reliability using SWAT and RIBASIM models with respect to climate change and operational water projects. *Agric. Water Manag.* **2022**, *261*, 107377. [CrossRef]
19. Nazemi, A.; Wheeler, H.S. On inclusion of water resource management in Earth system models—Part 1: Problem definition and representation of water demand. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2015**, *19*, 33–61. [CrossRef]
20. Cheng, T.; Wang, J.; Sui, J.; Zhao, H.; Hao, Z.; Huang, M.; Li, Z. A New Approach for Assessing Heat Balance State along a Water Transfer Channel during Winter Periods. *Water* **2022**, *14*, 3269. [CrossRef]
21. Brêda, J.P.L.F.; de Paiva, R.C.D.; Collischonn, W.; Bravo, J.M.; Siqueira, V.A.; Steinke, E.B. Climate Change impacts on South American Water Balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Clim. Change* **2020**, *159*, 503–522. [CrossRef]
22. da Silva, M.V.M.; Silveira, C.d.S.; da Silva, G.K.; Pedrosa, W.H.d.V.; Júnior, A.D.M.; Filho, F.d.A.S. Projections of climate change in streamflow and affluent natural energy in the Brazilian hydroelectric sector of CORDEX models. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* **2020**, *25*, 1–15. [CrossRef]
23. da Silva, M.V.M.; Lima, C.E.S.; Silveira, C.d.S. Impact of Climate Change and Consumptive Demands on the Performance of São Francisco River Reservoirs, Brazil. *Climate* **2023**, *11*, 89. [CrossRef]

24. Bartkowiak, P.; Castelli, M.; Notarnicola, C. Downscaling Land Surface Temperature from MODIS Dataset with Random Forest Approach over Alpine Vegetated Areas. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 1319. [CrossRef]
25. Kumar, J.; Brooks, B.-G.J.; Thornton, P.E.; Dietze, M.C. Sub-daily statistical downscaling of meteorological variables using neural networks. *Procedia Comput. Sci.* **2012**, *9*, 887–896. [CrossRef]
26. Lima, J.P.R.; Alves, J.M.B. Um estudo de downscaling dinâmico de precipitação intrasazonal acoplado a modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica Alto-Médio São Francisco. *Rev. Bras. Meteorol.* **2009**, *24*, 323–338. [CrossRef]
27. GeoAplicada. Zonas Climáticas do Brasil (Köppen). 2021. Available online: <https://www.geoaplicada.com/dados/zonas-climaticas-do-brasil-koppen/> (accessed on 1 February 2025).
28. ANA—Agência Nacional de Águas. Sistema de Informações Hidrológicas—HidroWeb. Available online: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb> (accessed on 12 January 2023).
29. INMET—Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa—BDMEP. 2023. Available online: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/> (accessed on 20 January 2023).
30. ONS—Operador Nacional do Sistema Elétrico. Dados Hidrológicos/Vazões. 2023. Available online: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados_hidrologicos_vazoes.aspx (accessed on 13 January 2023).
31. Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D.; Veith, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* **2007**, *50*, 885–900. [CrossRef]
32. Thrasher, B.; Wang, W.; Michaelis, A.; Melton, F.; Lee, T.; Nemani, R. NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Sci. Data* **2022**, *9*, 262. [CrossRef]
33. Barbosa, M.A. Análise da Influência das Mudanças Climáticas no Aproveitamento Hidroenergético da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí. Master's Thesis, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brazil, 2024.
34. IBGE—Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Projeção da População. 2018. Available online: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html> (accessed on 1 December 2024).
35. Collischonn, W.; Allasia, D.; DA Silva, B.C.; Tucci, C.E.M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—Runoff modelling. *Hydrol. Sci. J.* **2007**, *52*, 878–895. [CrossRef]
36. Fan, F.M.; Collischonn, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* **2014**, *19*, 243–254. [CrossRef]
37. Paiva, R.C.D. Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica de Grandes Bacias, Estudo de Caso: Bacia do rio Solimões. Master's Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 2009.
38. Pontes, P.R.M.; Collischonn, W.; Fan, F.M.; de Paiva, R.C.D.; Buarque, D.C. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* **2015**, *20*, 888–904. [CrossRef]
39. Felix, V.d.S.; da Paz, A.R. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido com modelagem hidrológica distribuída. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* **2016**, *21*, 556–569. [CrossRef]
40. Jati, D.A.; Da Silva, J.T. Estudos geo-hidrológicos da bacia do rio Curuá-Una, Santarém, Pará: Aplicação do modelo hidrológico de grandes bacias (MGB-IPH). *Rev. Bras. Geogr. Física* **2017**, *10*, 1296–1311. [CrossRef]
41. Pessoa, M.M.E.P. Obtenção de Vazões em Locais sem Monitoramento Através de um Modelo Hidrológico com Assimilação de dados. Ph.D. Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 2017.
42. Negreiros, B.M.F.; Medeiros, J.D.F. Aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na bacia hidrográfica do rio Seridó, 2017. In Proceedings of the XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, Brazil, 26 November–1 December 2017.
43. Bayer, D.M.; Collischonn, W. Análise de sensibilidade do modelo MGB-IPH a mudanças de uso da terra. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* **2013**, *18*, 165–179. [CrossRef]
44. Silva, M.K.A. Modelagem Hidrológica Aplicada ao Estudo da Vazão da Bacia Hidrográfica do rio Araguari—MG, a Partir das Mudanças do uso da Terra e Cobertura Vegetal Nativa. Ph.D. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brazil, 2014.
45. Lopes, V.A.C.; Fan, F.M.; Collischonn, W.; Paiva, P.R.M. Aplicação preliminar do modelo MGB—IPH para a bacia hidrográfica completa da Laguna dos Patos. In Proceedings of the XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, Brazil, 22–27 November 2015.
46. Beserra, P.S. Avaliação dos Efeitos das Alterações na Cobertura e uso do solo Sobre o Regime de Vazões via Modelagem Hidrológico Considerando Incerteza Paramétrica. Master's Thesis, Universidade de Brasília, Brasília, Brazil, 2016.
47. Neto, R.L.B.; Tagliaferre, C.; Lemos, O.L.; Rocha, F.A.; De Paula, A. Aplicação do modelo MGB-IPH na bacia hidrográfica do Rio Pardo em diferentes cenários de uso e ocupação do solo. *Cienc. Florest.* **2021**, *31*, 191–213. [CrossRef]
48. Siqueira, P.C.; Pons, N.A.D.; da Silva, B.C.; Moreira, L.d.A.; Junior, P.S.; Martins, A.M. Aplicação do Modelo Hidrológico MGB-IPH para Simulação de Cenários de Uso do Solo na Bacia do Rio Sapucaí (MG). *Rev. Bras. Geogr. Física* **2022**, *15*, 2414–2429. [CrossRef]
49. Gama, W.M. Impactos das Mudanças Climáticas na Resposta Hidrológica da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Meio (AL/PE). Master's Thesis, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brazil, 2011.

50. Adam, K.N.; Collischonn, W. Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na bacia hidrográfica do rio Ibicuí. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* **2013**, *18*, 69–79. Available online: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/229606> (accessed on 15 November 2024). [[CrossRef](#)]
51. Adam, K.N.; Fan, F.M.; Pontes, P.; Bravo, J.M.; Collischonn, W. Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* **2015**, *20*, 999–1007. [[CrossRef](#)]
52. Fan, F.M.; Buarque, D.C.; Pontes, P.R.M.; Collischonn, W. Um mapa de unidades de respostas hidrológicas para a América do Sul. In Proceedings of the XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, Brazil, 22–27 November 2015; pp. 1–8. Available online: <https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/sensoriamento-remoto/mapa-de-urhs-da-america-do-sul/> (accessed on 15 November 2024).

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

ANEXO I – BACIAS HIDROGRÁFICAS E APROVEITAMENTOS
HIDRELÉTRICOS

Bacia Hidrográfica	Aproveitamento	Latitude (S)	Longitude (O)
Araguari	UHE Cachoeira Caldeirão	0,8525	51,2941
	UHE Coaracy Nunes	0,903	51,2594
	UHE Ferreira Gomes	0,8567	51,1968
Capivari	UHE Capivari Cachoeira	25,25	48,7486
Correntes	UHE Ponte de Pedra	17,6078	54,8273
Curuá-Una	UHE Curuá-Una	2,8123	54,2988
Doce	UHE Candonga	20,2075	42,8543
	UHE Guilman	19,6777	42,9175
	UHE A. Dias + Sá Carvalho	19,6378	42,8219
	UHE Salto Grande	22,9044	49,9981
	UHE Porto Estrela	19,1172	42,6626
	UHE Baguari	19,0179	42,1227
	UHE Aimorés	19,4984	41,0235
	UHE Mascarenhas	19,5018	40,9187
Iguaçu	UHE Santa Clara PR	25,6667	51,96763
	UHE Fundão	25,7212	52,03829
	UHE Jordão	25,7603	52,08546
	UHE GB Munhoz	26,0075	51,66981
	UHE Segredo	25,7931	52,113
	UHE Salto Santiago	25,6294	52,61578
	UHE Salto Osório	25,5378	53,01058
	UHE Salto Caxias	25,5439	53,49813
Itabapoana	UHE Rosal	20,9529	41,7167
Itajaí	UHE Salto Pilão	27,0973	49,4673
Itiquira	UHE Itiquira I	17,0832	54,8755

Jacuí	UHE Ernestina	28,556	52,545
	UHE Passo Real	29,016	53,191
	UHE Jacuí	29,079	53,227
	UHE Itaúba	29,262	53,236
	UHE Dona Francisca	29,448	53,287
Jari	UHE Santo Antônio do Jari	0,651	52,5161
Jauru	UHE Jauru	15,2455	58,7288
Jequitinhonha	UHE Itapebi	15,9685	39,5867
Jequitinhonha	UHE Irapé	16,7376	42,5749
Madeira	UHE Guaporé	15,1373	58,97953
	UHE Jirau	9,27178	64,64069
	UHE Santo Antônio	8,80177	63,95084
	UHE Samuel	8,75225	63,45547
	UHE Rondon II	11,9688	60,70049
	UHE Dardanelos	10,1608	59,44873
Manso	UHE Manso	14,871	55,7852
Mucuri	UHE Santa Clara Mucuri	17,8959	40,2073
Paraguaçu	UHE Pedra do Cavalo	12,6032	38,9979
Paraíba do Sul	UHE Jaguari	23,1958	46,0209
	UHE Paraibuna	23,4144	45,6017
	UHE Santa Branca	23,374	45,8729
	UHE Funil	21,1437	45,0361
	UHE Santa Cecília	22,4825	43,8385
	UHE Ilha dos Pombos	21,8439	42,5794
	UHE Picada	21,9079	43,5368
	UHE Sobragi	21,9814	43,3502
	UHE Tócos	22,7492	44,1254
Paraná	UHE Corumbá IV	16,323	48,185
	UHE Corumbá III	16,790	47,940

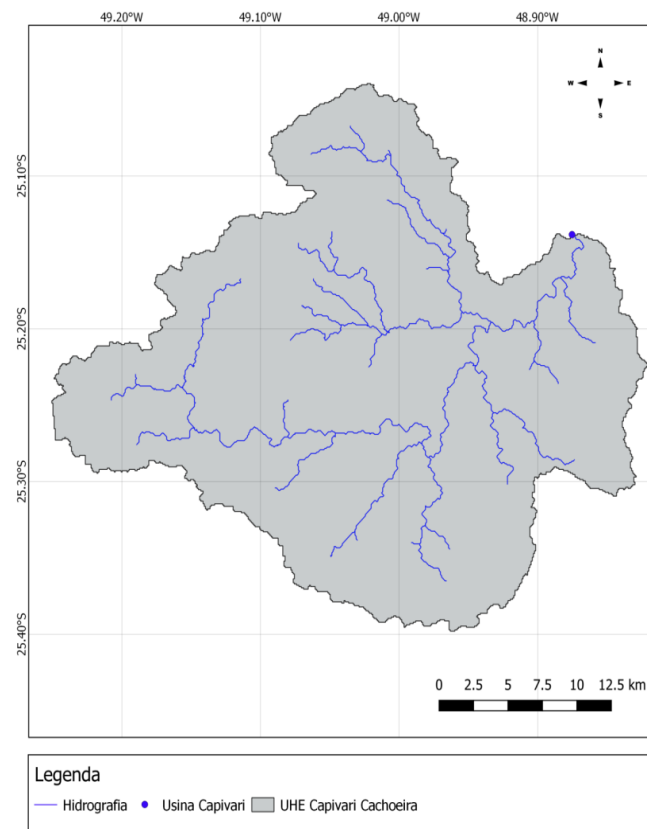
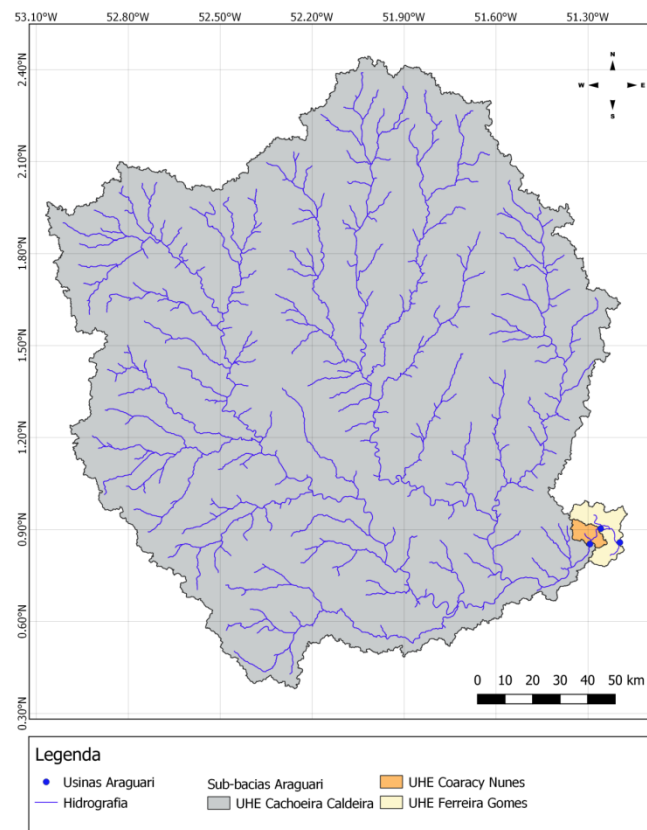
	UHE Corumbá I	17,989	48,533
	UHE Batalha	17,350	47,492
	UHE Serra Falcão	18,046	47,675
	UHE Emborcação	18,453	47,985
	UHE Nova Ponte	19,134	47,700
	UHE Miranda	18,909	48,042
	UHE Capim Branco I	18,777	48,163
	UHE Capim Branco II	18,659	48,437
	UHE Itumbiara	18,407	49,098
	UHE Cachoeira Dourada	18,500	49,491
	UHE São Simão	19,020	50,497
	UHE Caçu	18,533	51,148
	UHE Barra dos Coqueiros	18,722	51,002
	UHE Foz do Rio Claro	19,118	50,646
	UHE Salto	18,808	51,171
	UHE Salto Verdinho	19,142	50,753
	UHE Espora	18,679	51,865
	UHE Camargos	21,324	44,616
	UHE Itutinga	21,292	44,625
	UHE Funil Grande	21,143	45,036
	UHE Furnas	20,669	46,318
	UHE Mascarenhas Moraes	20,286	47,064
	UHE Estreito Grande	20,150	47,281
	UHE Jaguará	20,023	47,433
	UHE Igarapava	19,992	47,758
	UHE Volta Grande	20,033	48,222
	UHE Porto Colômbia	20,128	48,572
	UHE Caconde	21,575	46,626

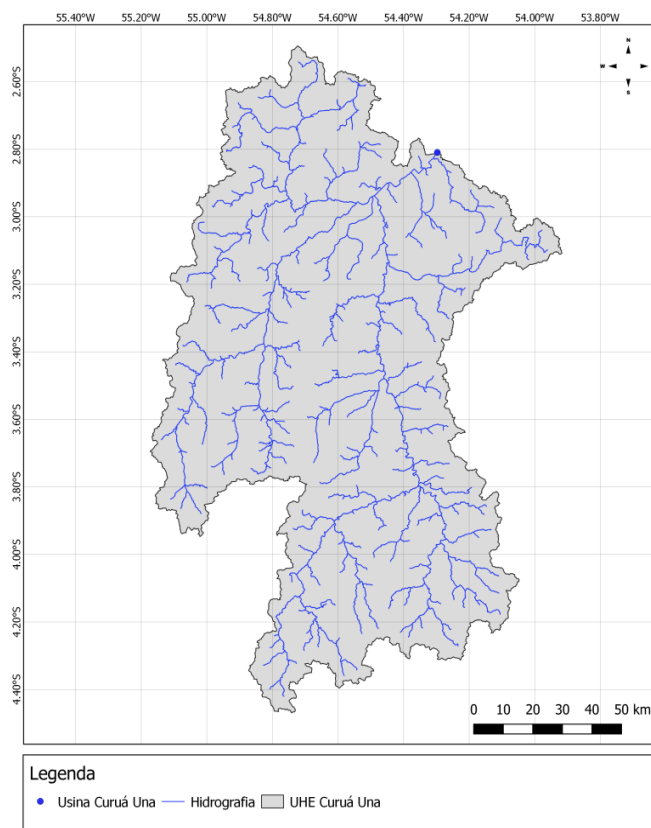
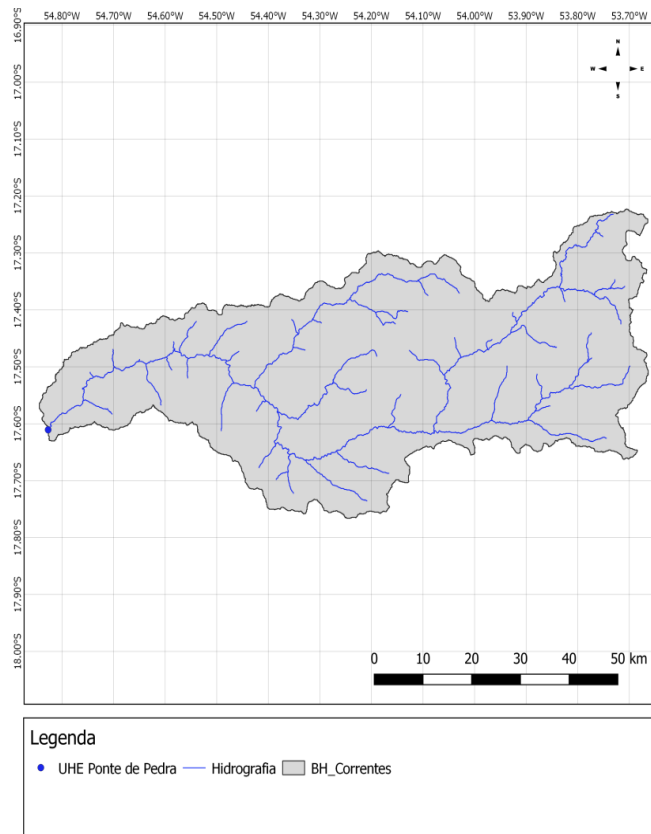
	UHE Euclides Cunha	21,604	46,950
	UHE A. S. Oliveira	21,625	47,009
	UHE Marimbondo	20,303	49,199
	UHE Água Vermelha	19,864	50,347
	UHE Ilha Solteira	20,384	51,361
	UHE Ponte Nova	23,582	45,973
	Reservatório Billings	23,703	46,675
	Reservatório Guarapiranga	23,670	46,727
	UHE Edgar Souza	23,454	46,910
	UHE Barra Bonita	22,520	48,535
	UHE Álvaro de Souza Lima	22,154	48,754
	UHE Ibitinga	21,759	48,991
	UHE Promissão	21,296	49,784
	UHE Nova Avanhandava	21,118	50,201
	UHE Três Irmãos	20,669	51,300
	UHE Jupia	20,778	51,629
	UHE São Domingos	20,063	53,177
	UHE Porto Primavera	22,476	52,959
	UHE A. A. LAYDNER	23,211	49,231
	UHE Piraju	23,154	49,380
	UHE Chavantes	23,127	49,731
	UHE Ourinhos	23,069	49,838
	UHE Lucas Nogueira Garcez	22,904	49,998
	UHE Canoas II	22,938	50,251
	UHE Canoas I	22,941	50,518
	UHE Mauá	24,062	50,708
	UHE Capivara	22,661	51,360
	UHE Taquaruçu	22,545	52,002

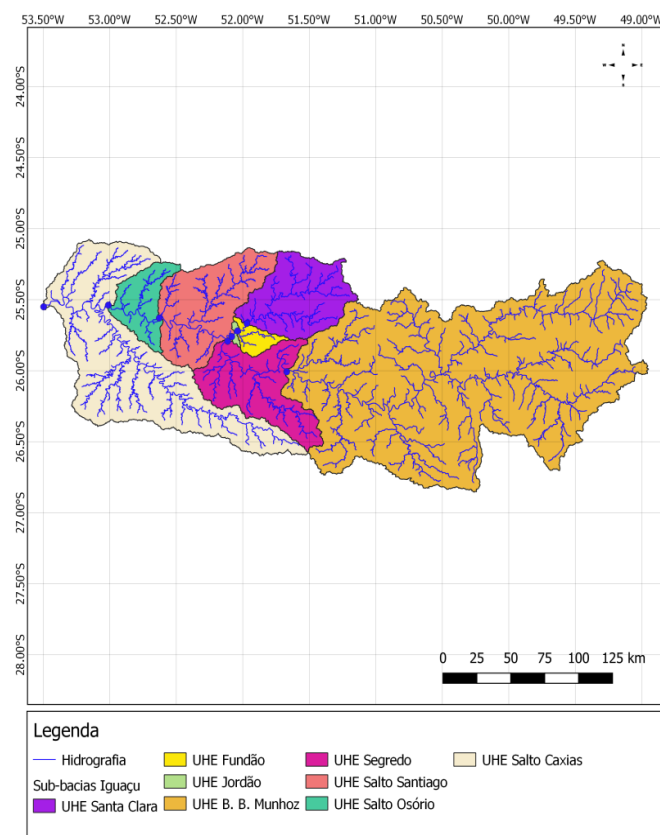
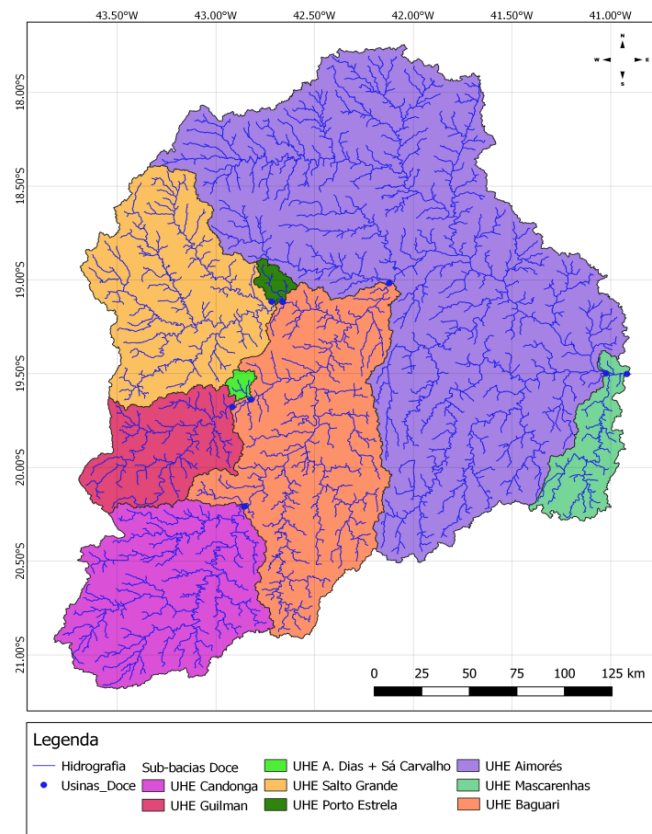
	UHE Rosana	22,601	52,871
	UHE Itaipú	25,412	54,590
Parnaíba	UHE Boa Esperança	6,749	43,566
São Francisco	UHE Xingó	9,620	37,790
	UHE Paulo Afonso	9,400	38,200
	UHE Moxotó	9,360	38,210
	UHE Itaparica	9,140	38,310
	UHE Sobradinho	9,430	40,830
	UHE Três Marias	18,210	45,260
	UHE Queimado	16,210	47,320
	UHE Retiro Baixo	18,860	44,780
Tapajós	UHE Teles Pires	9,34029	56,77699
Taquari-Antas	UHE Monte Claro	29,023	51,533
	UHE Castro Alves	29,023	51,458
	UHE 14 de Julho	29,069	51,675
Tocantins-Araguaia	UHE Cana Brava	13,402	48,144
	UHE São Salvador	12,808	48,238
	UHE Peixe Angical	12,235	48,387
	UHE Serra da Mesa	13,832	48,301
	UHE Estreito	6,587	47,461
	UHE Lajeado	9,755	48,373
	UHE Tucuruí	3,832	49,649
Uatumã	UHE Balbina	1,9172	59,4736
Uruguai	UHE São José	28,176	54,815
	UHE Passo São João	28,132	55,055
	UHE Barra Grande	27,777	51,194
	UHE Campos Novos	27,603	51,333
	UHE Machadinho	27,528	51,79
	UHE Manjolinho	27,345	52,731

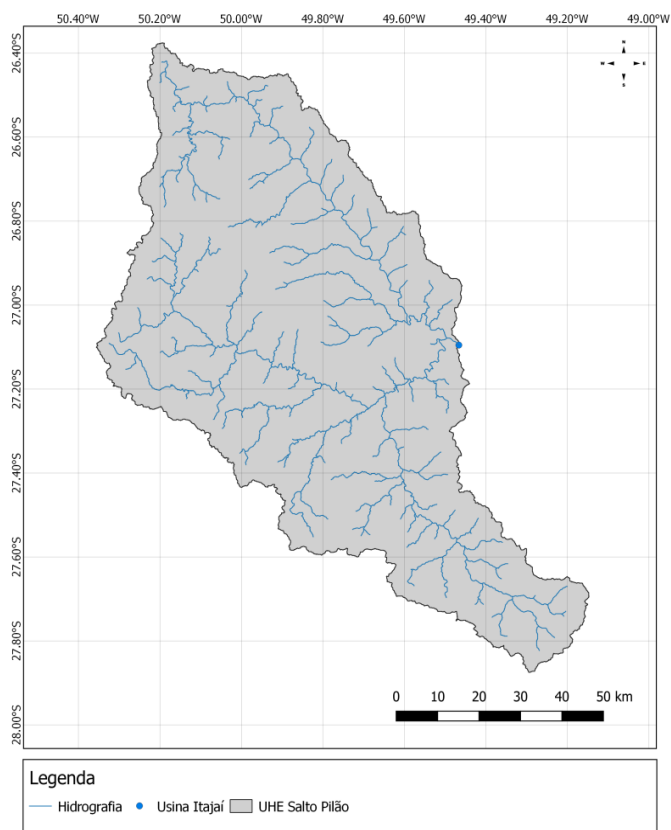
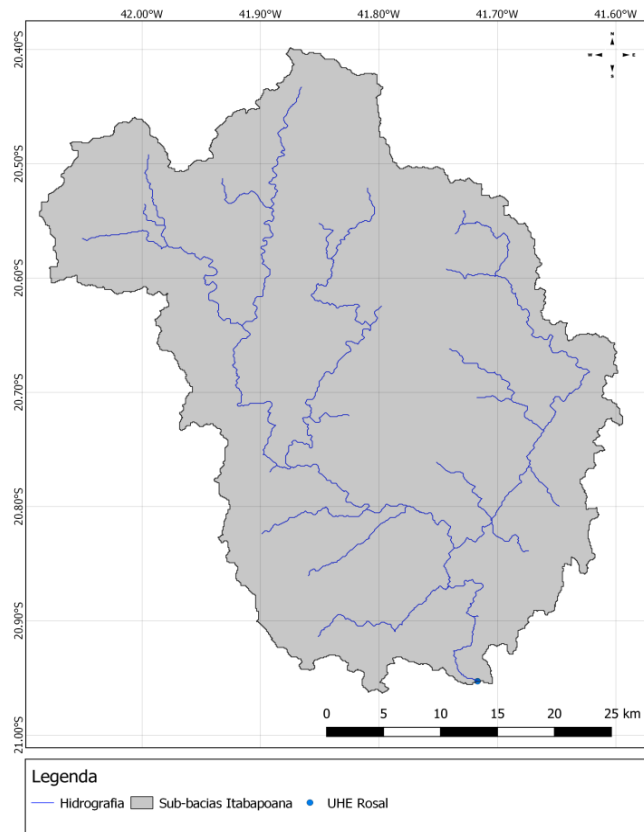
	UHE Quebra Queixo	26,669	52,556
	UHE Garibaldi	27,637	51,001
	UHE Ita	27,274	52,38
	UHE Passo Fundo	27,479	52,718
	UHE Foz do Chapecó	27,139	53,042
Xingu	UHE Pimental	3,43779	51,94758

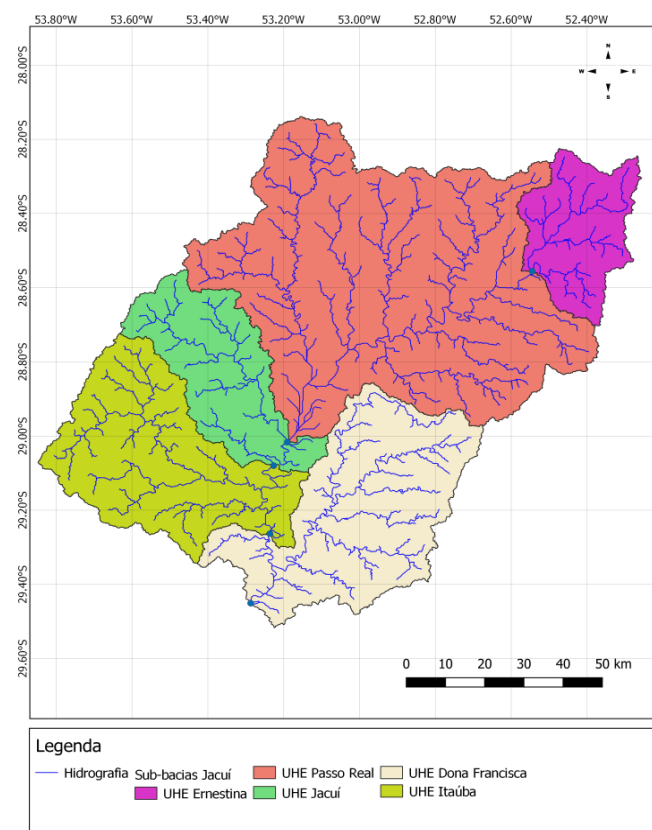
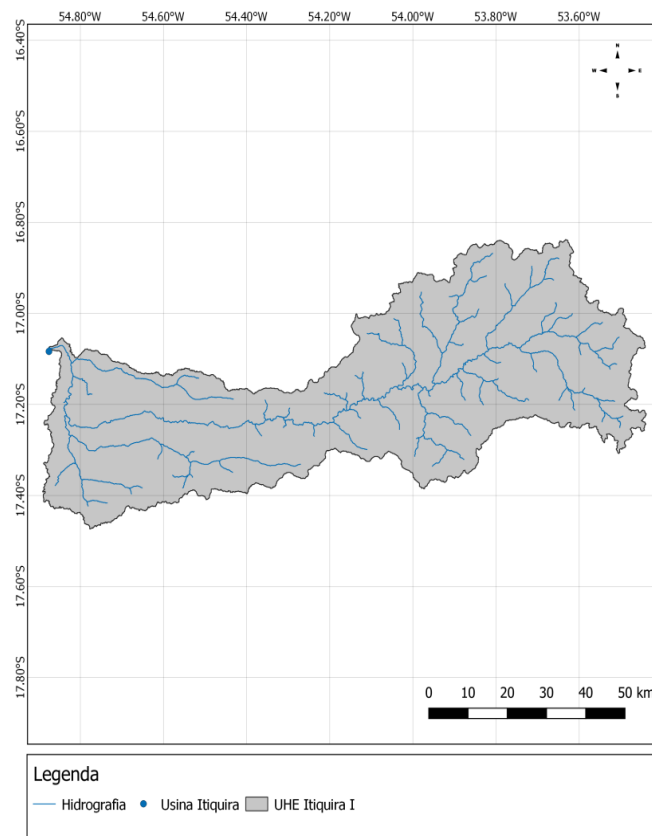
ANEXO II – DELIMITAÇÃO EM BACIAS DE DRENAGEM E SUB-BACIAS

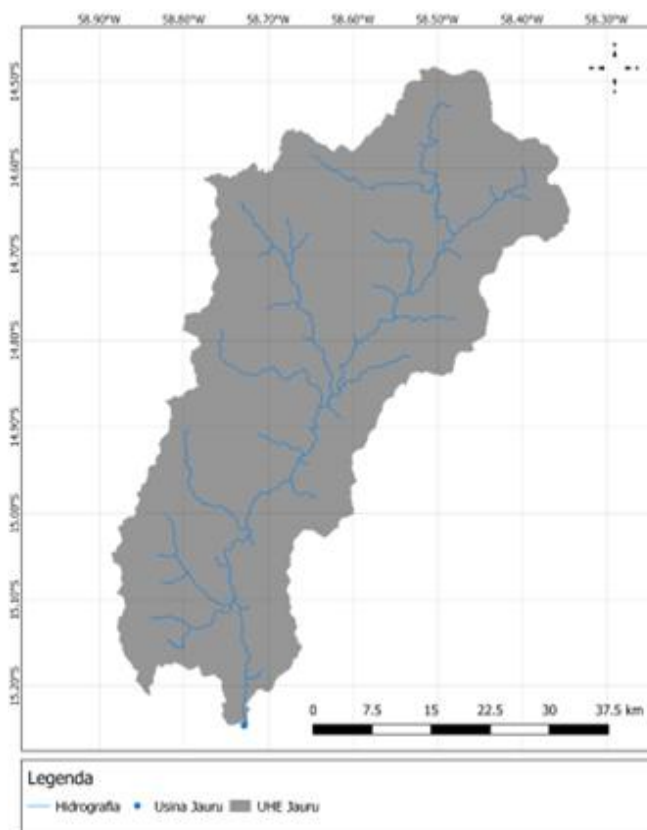
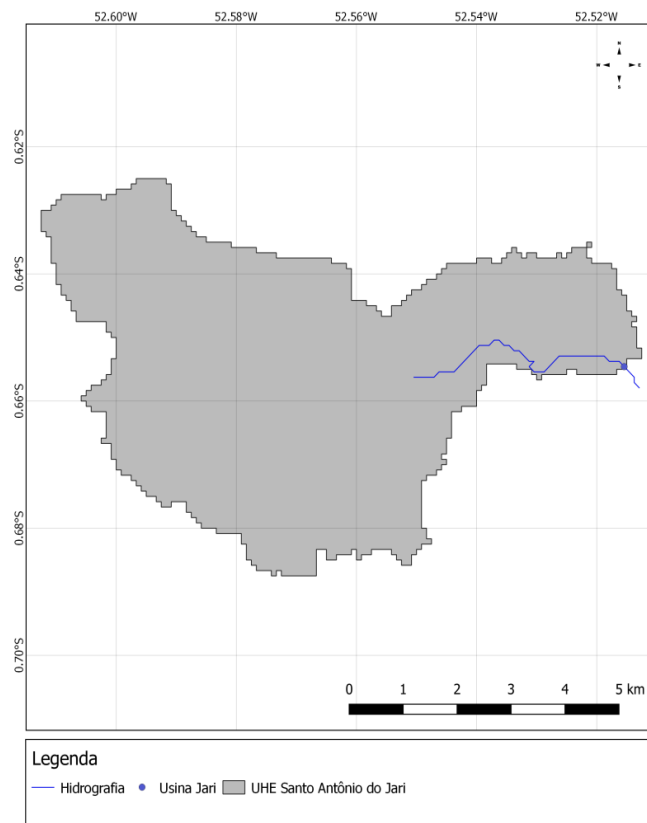


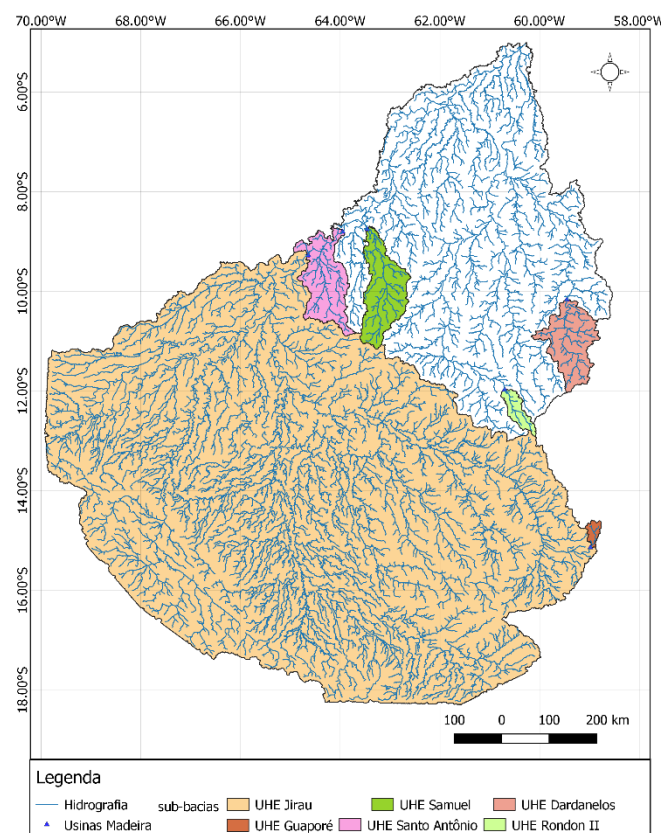
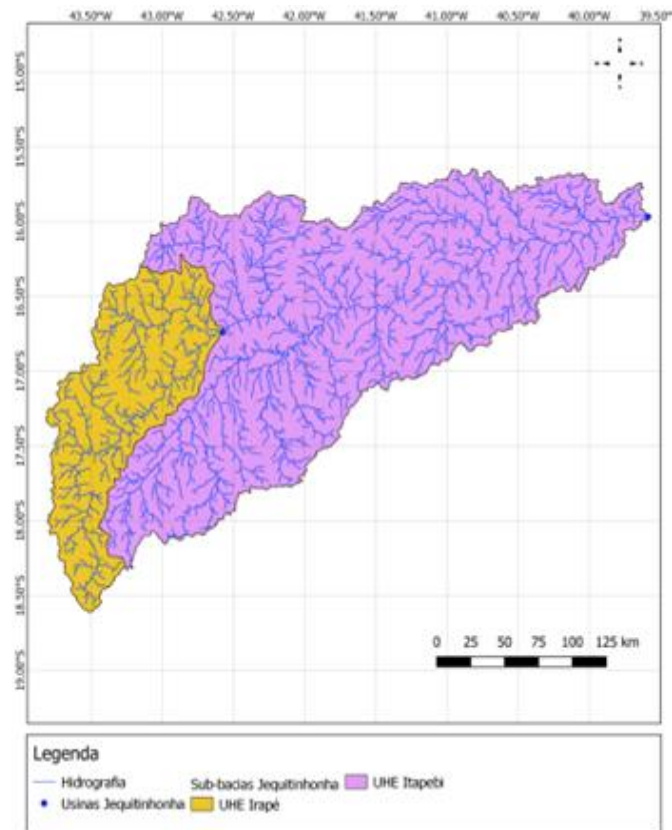


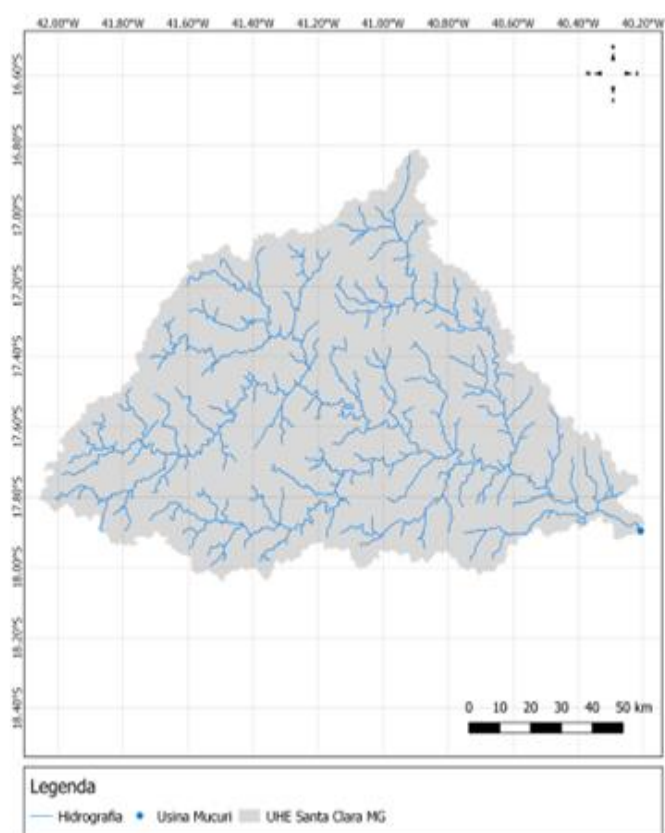
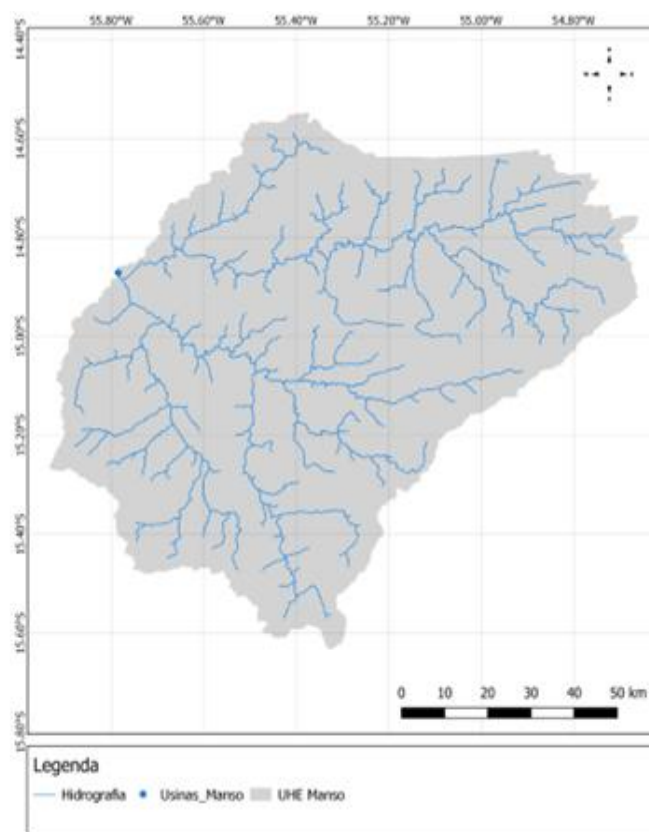


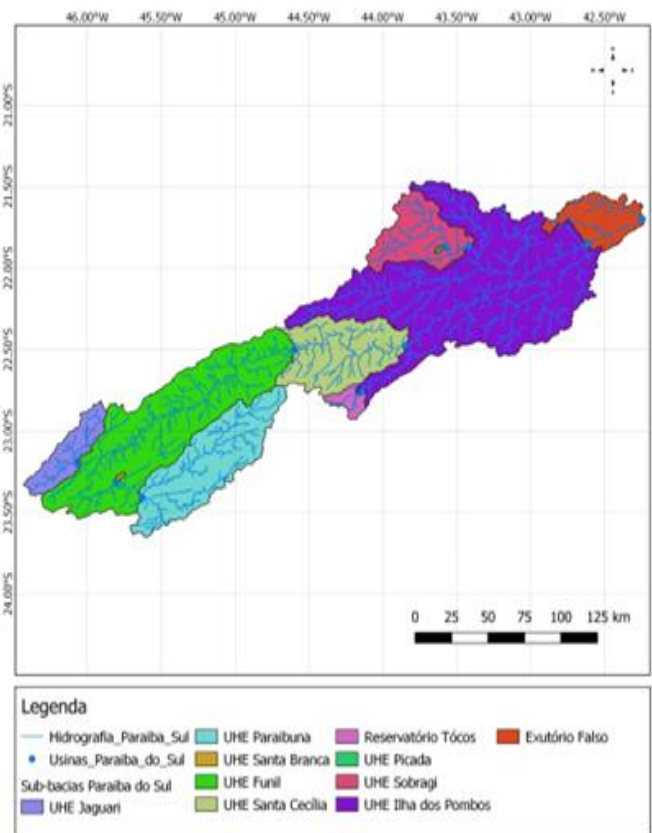
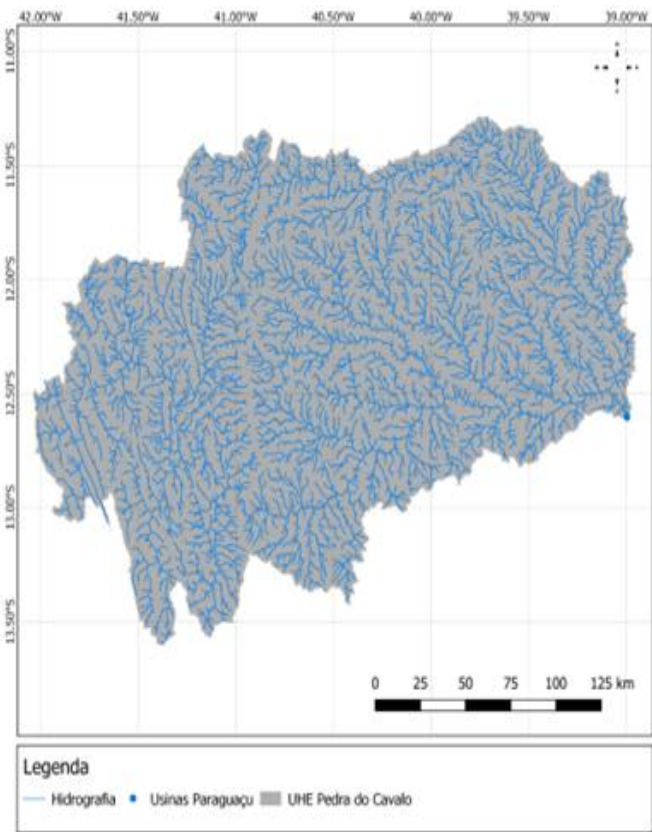


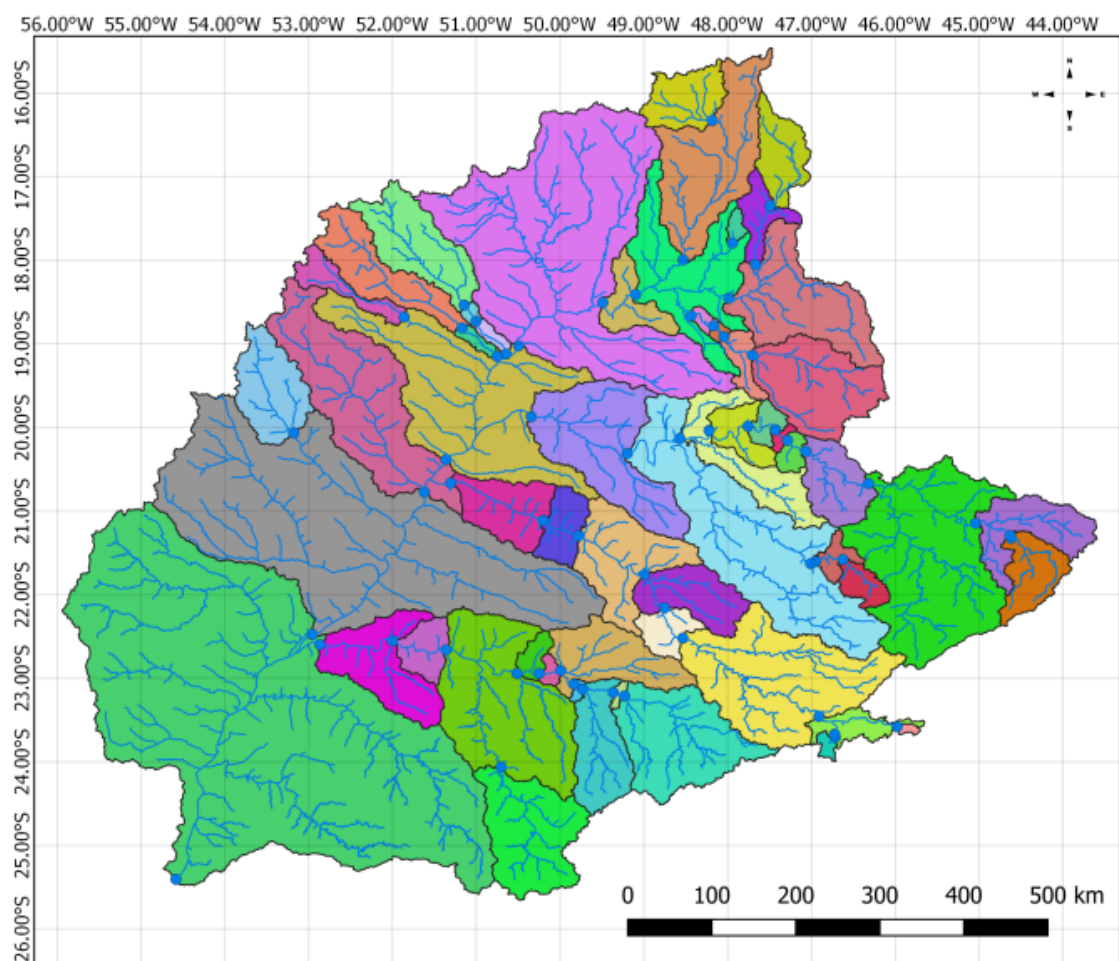






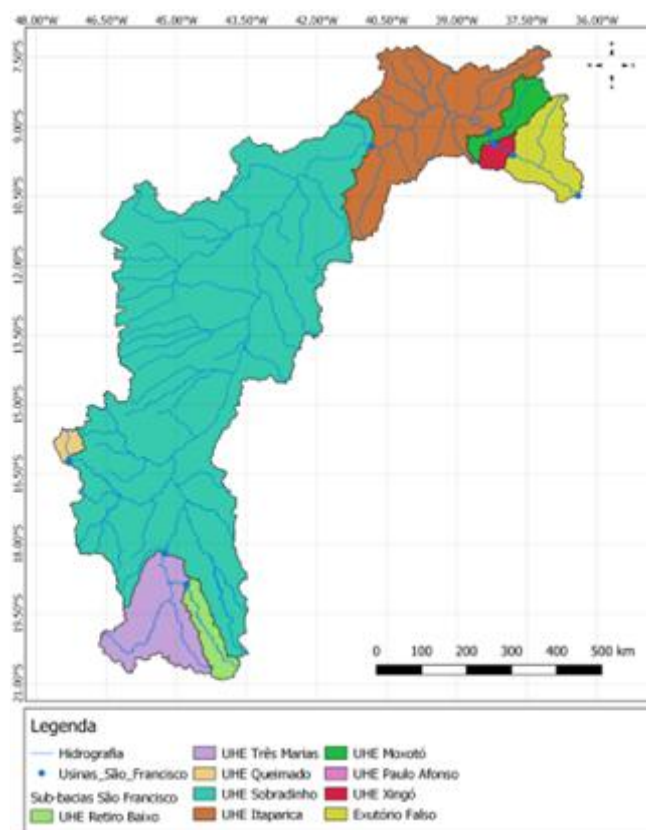
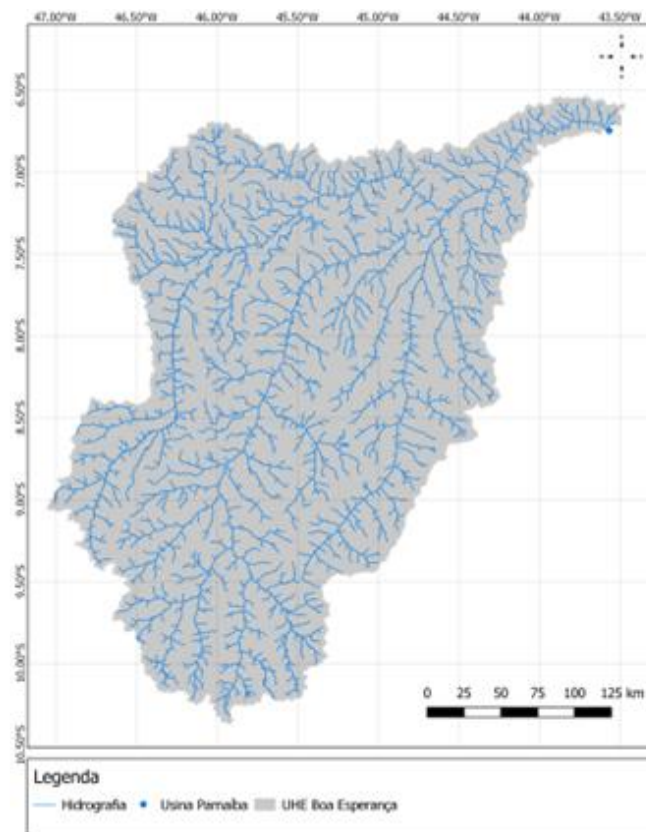


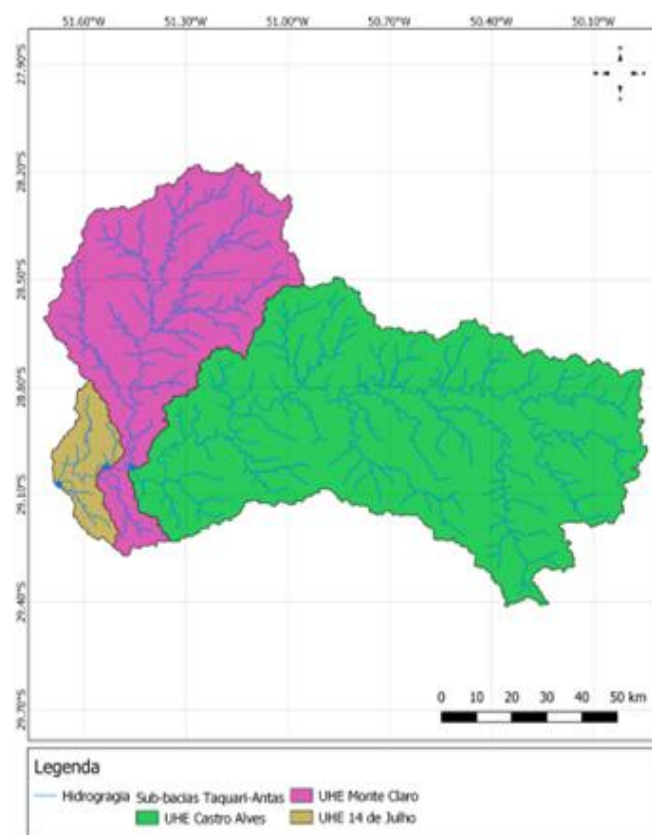
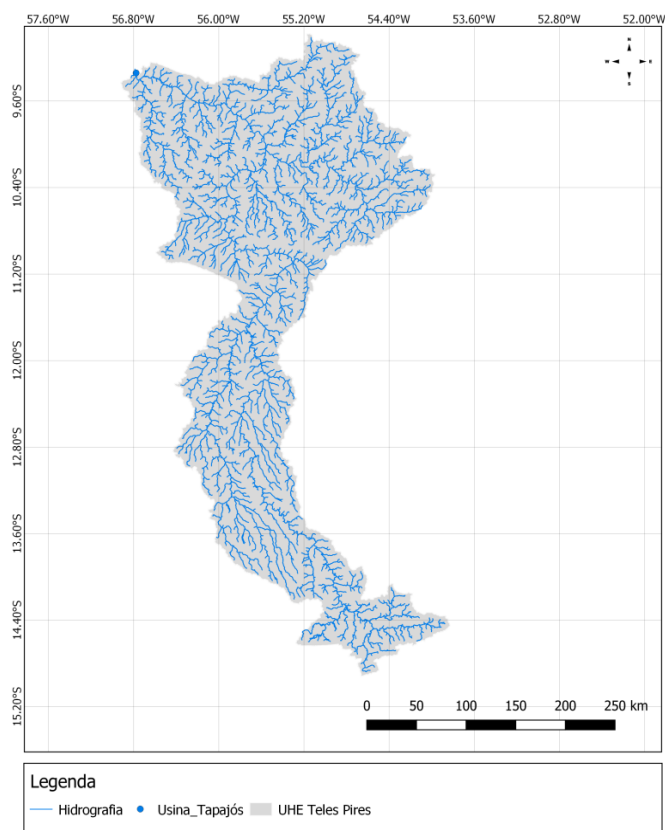


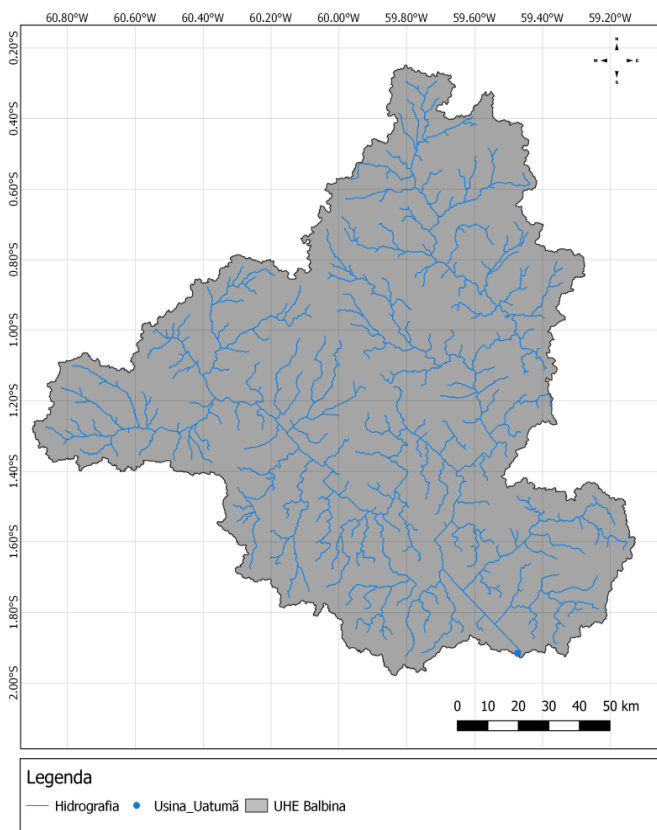
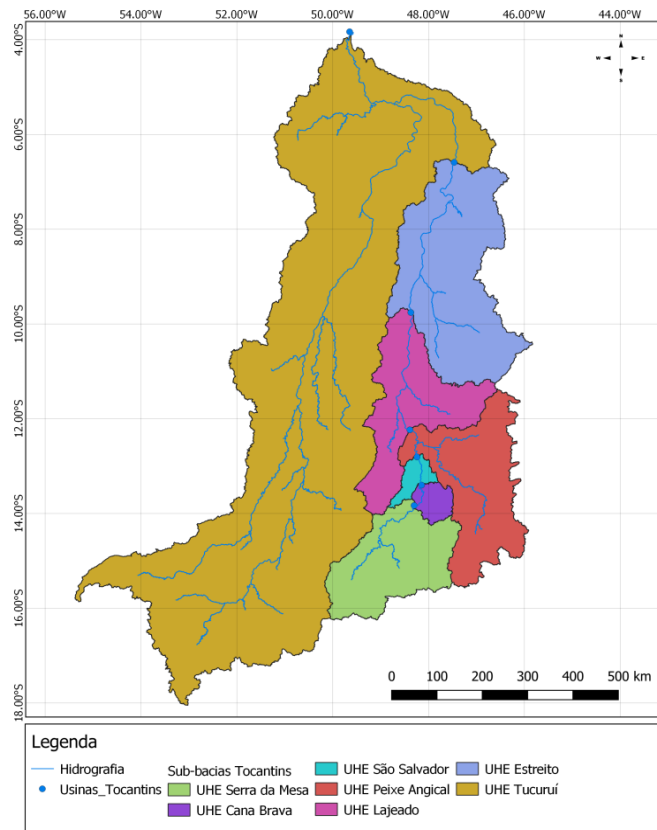


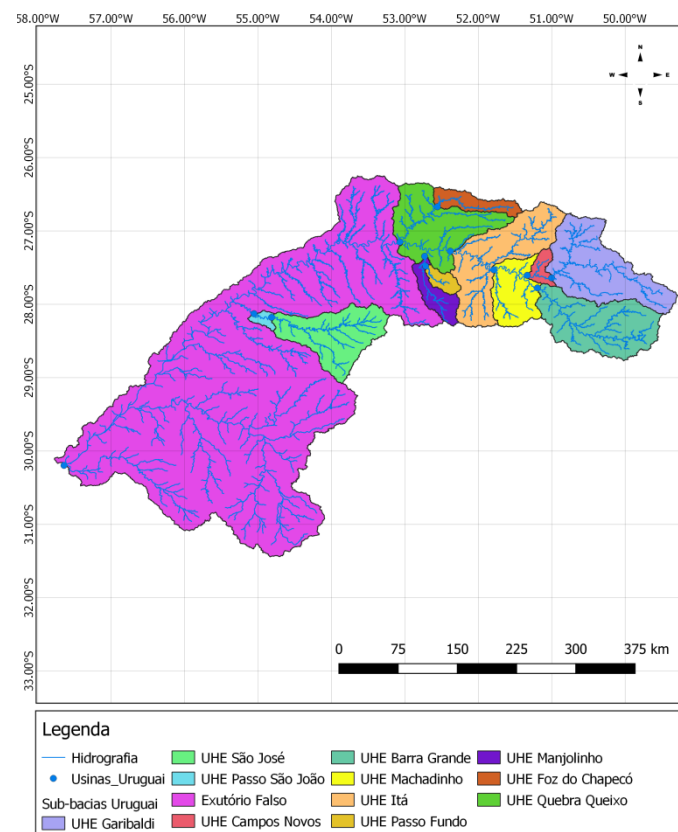
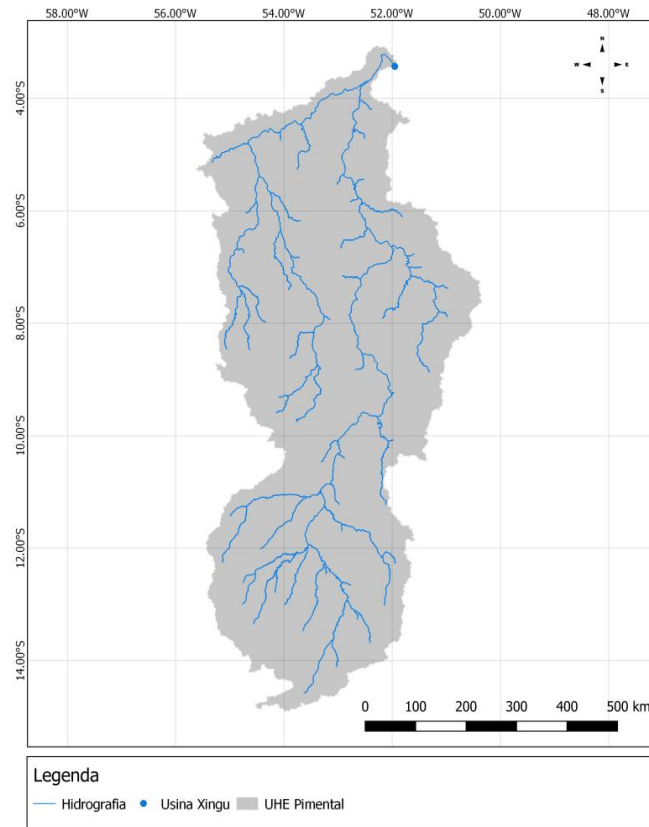
Legenda

— Hidrografia	Capim Branco I	Igarapava	Ponte Nova
• Usinas_Parana	Capim Branco II	Ilha Solteira	Porto Colômbia
Sub-bacias Parana	Capivara	Itaipu	Porto Primavera
A. A. Laydner	Chavantes	Itumbiara	Promissão
A. S. Oliveira	Corumbá I	Itutinga	Reservatório Billings
Água Vermelha	Corumbá III	Jaguará	Reservatório Guaripiranga
Álvaro de Souza Lima	Corumbá IV	Jupia	Rosana
Barra Bonita	Edgar Souza	Lucas Nogueira Garcez	Salto
Barra dos Coqueiros	Emborcação	Marimbondo	Salto Verdinho
Batalha	Espora	Mascarenhas Moraes	São Domingos
Cachoeira Dourada	Estreito Grande	Mauá	São Simão
Caconde	Euclides da Cunha	Miranda	Serra do Facão
Caçu	Foz do Rio Claro	Nova Avanhandava	Taquaruçu
Camargos	Funil Grande	Nova Ponte	Três Irmãos
Canoas I	Furnas	Ourinhos	Volta Grande
Canoas II	Ibitinga	Piraju	









ANEXO III – EXEMPLOS DE VALORES CALCULADOS DE FCC

Tabela 23 Valores anuais de Fcc calculados pela Temperatura média para a bacia do rio Doce.

ANO	ACCESS SSP245	ACCESS SSP585	CanESM SSP245	CanESM SSP585	INM SSP245	INM SSP585	IPSL SSP245	IPSL SSP585	MPI SSP245	MPI SSP585
2022	1.084	0.966	1.034	1.036	1.040	0.962	1.008	0.957	1.072	1.077
2023	1.035	0.992	1.104	1.129	0.986	1.107	1.069	0.989	1.015	1.044
2024	1.103	1.085	0.999	1.017	1.058	1.096	1.108	0.994	1.046	1.078
2025	1.044	1.140	1.171	0.960	1.041	1.095	1.078	0.960	1.191	0.998
2026	1.091	1.103	1.152	1.045	1.047	1.053	1.125	1.017	1.111	1.090
2027	1.218	1.075	1.101	0.976	1.029	1.034	1.055	0.960	1.060	0.942
2028	1.189	1.087	1.059	1.091	1.127	1.011	1.039	1.089	0.949	1.012
2029	1.202	1.165	1.500	1.115	1.047	1.150	1.068	1.053	1.094	1.134
2030	1.120	1.124	1.207	1.020	1.053	1.124	0.963	1.137	1.127	1.194
2031	1.144	1.059	1.155	1.099	1.023	1.027	1.088	1.065	1.066	1.141
2032	1.111	1.061	1.236	1.175	1.083	1.062	1.068	1.028	1.229	1.161
2033	1.082	1.019	1.164	1.246	1.071	0.996	1.116	1.037	1.174	1.035
2034	1.248	1.050	1.219	1.113	1.011	1.100	1.047	1.110	1.074	1.209
2035	1.199	1.206	1.271	1.104	1.020	1.070	1.073	0.964	1.064	1.150
2036	1.061	1.140	1.133	1.161	1.070	1.091	1.121	1.120	1.079	1.130
2037	1.137	1.056	1.102	1.131	1.019	1.119	1.140	1.119	1.257	1.022
2038	1.181	1.239	1.156	1.021	1.097	1.072	1.090	1.129	1.164	1.100
2039	1.190	1.308	1.125	1.205	1.062	1.078	1.041	1.112	1.220	1.104
2040	1.133	1.178	1.141	1.180	0.987	1.043	1.213	1.075	1.180	1.078
2041	1.105	1.107	1.181	1.283	1.090	1.130	1.088	1.071	1.157	1.131
2042	1.160	1.158	1.277	1.128	1.092	1.065	1.074	1.016	1.147	1.066
2043	1.138	1.136	1.119	1.311	1.026	1.097	1.113	1.163	1.152	1.077
2044	1.072	1.198	1.134	1.330	1.099	1.072	1.119	1.239	1.044	1.198
2045	1.138	1.157	1.174	1.123	1.160	1.150	1.149	1.191	1.038	1.042
2046	1.292	1.175	1.135	1.233	1.113	1.090	1.140	1.152	1.207	1.051
2047	1.186	1.159	1.126	1.453	1.079	1.208	1.197	1.262	1.184	0.979
2048	1.228	1.169	1.279	1.144	1.136	1.163	1.167	1.296	1.141	1.154
2049	1.213	1.156	1.199	1.256	1.118	1.223	1.122	1.134	1.100	1.233
2050	1.236	1.143	1.239	1.223	1.120	1.184	1.139	1.134	1.110	1.149
2051	1.242	1.140	1.300	1.306	1.132	1.162	1.093	1.177	1.211	1.131
2052	1.275	1.224	1.269	1.284	1.120	1.204	1.162	1.280	1.207	1.016
2053	1.206	1.267	1.147	1.309	1.102	1.162	1.217	1.298	1.139	1.274
2054	1.096	1.291	1.135	1.302	1.063	1.149	1.286	1.157	1.137	1.343
2055	1.183	1.314	1.171	1.301	1.151	1.225	1.103	1.189	1.200	1.327
2056	1.282	1.376	1.228	1.332	1.190	1.177	1.123	1.381	1.009	1.161
2057	1.299	1.204	1.161	1.479	1.113	1.171	1.236	1.310	1.067	1.154
2058	1.223	1.263	1.212	1.377	1.146	1.123	1.212	1.296	1.199	1.176
2059	1.257	1.331	1.254	1.336	1.080	1.245	1.143	1.301	1.168	1.136
2060	1.185	1.389	1.380	1.422	1.133	1.210	1.224	1.273	1.134	1.225
2061	1.216	1.209	1.299	1.434	1.184	1.192	1.145	1.260	1.105	1.260
2062	1.258	1.220	1.273	1.268	1.154	1.177	1.258	1.212	1.019	1.231
2063	1.319	1.299	1.230	1.354	1.098	1.229	1.326	1.280	1.163	1.259
2064	1.293	1.311	1.145	1.470	1.120	1.223	1.208	1.372	1.202	1.259

2065	1.332	1.283	1.228	1.324	1.155	1.196	1.178	1.283	1.076	1.379
2066	1.187	1.329	1.273	1.586	1.235	1.130	1.198	1.414	1.223	1.268
2067	1.244	1.224	1.178	1.595	1.240	1.204	1.308	1.416	1.171	1.261
2068	1.219	1.286	1.241	1.434	1.126	1.207	1.349	1.375	1.171	1.244
2069	1.286	1.378	1.250	1.442	1.161	1.232	1.117	1.329	1.101	1.315
2070	1.279	1.409	1.375	1.592	1.115	1.280	1.170	1.375	1.202	1.326
2071	1.266	1.399	1.233	1.633	1.139	1.274	1.157	1.287	1.195	1.299
2072	1.190	1.476	1.212	1.362	1.082	1.293	1.183	1.383	1.058	1.228
2073	1.253	1.494	1.380	1.494	1.146	1.288	1.287	1.452	1.193	1.475
2074	1.312	1.475	1.326	1.603	1.243	1.222	1.246	1.413	1.142	1.369
2075	1.227	1.353	1.212	1.484	1.063	1.280	1.176	1.290	1.192	1.330
2076	1.335	1.375	1.369	1.486	1.180	1.228	1.334	1.328	1.248	1.199
2077	1.359	1.448	1.353	1.577	1.139	1.294	1.238	1.436	1.289	1.280
2078	1.400	1.426	1.321	1.572	1.143	1.221	1.357	1.493	1.118	1.302
2079	1.341	1.440	1.279	1.369	1.106	1.207	1.286	1.414	1.120	1.375
2080	1.370	1.397	1.286	1.668	1.136	1.253	1.206	1.548	1.068	1.290
2081	1.278	1.526	1.213	1.678	1.175	1.268	1.288	1.638	1.189	1.443
2082	1.317	1.536	1.437	1.596	1.235	1.280	1.225	1.492	1.148	1.271
2083	1.385	1.368	1.241	1.639	1.111	1.269	1.287	1.500	1.298	1.378
2084	1.284	1.492	1.413	1.692	1.158	1.289	1.320	1.560	1.198	1.439
2085	1.365	1.348	1.330	1.708	1.176	1.411	1.446	1.502	1.301	1.432
2086	1.254	1.609	1.289	1.676	1.241	1.287	1.366	1.514	1.136	1.404
2087	1.241	1.484	1.499	1.653	1.167	1.391	1.329	1.596	1.362	1.285
2088	1.248	1.548	1.408	1.750	1.108	1.310	1.264	1.534	1.269	1.445
2089	1.318	1.461	1.355	1.630	1.198	1.331	1.315	1.519	1.238	1.352
2090	1.371	1.533	1.315	1.562	1.185	1.286	1.323	1.588	1.168	1.443
2091	1.247	1.532	1.394	1.717	1.130	1.364	1.298	1.440	1.160	1.404
2092	1.275	1.514	1.349	1.756	1.218	1.206	1.203	1.569	1.076	1.296
2093	1.266	1.512	1.219	1.685	1.190	1.369	1.267	1.517	1.152	1.394
2094	1.255	1.485	1.367	1.695	1.200	1.352	1.225	1.481	1.261	1.499
2095	1.296	1.558	1.502	1.643	1.163	1.286	1.252	1.648	1.124	1.410
2096	1.423	1.475	1.329	1.777	1.097	1.335	1.331	1.607	1.321	1.472
2097	1.313	1.645	1.303	1.686	1.200	1.317	1.406	1.559	1.176	1.445
2098	1.329	1.598	1.311	1.708	1.118	1.444	1.145	1.615	1.175	1.444
2099	1.232	1.566	1.369	1.771	1.172	1.343	1.233	1.682	1.089	1.532
2100	1.214	1.587	1.391	1.780	1.171	1.324	1.310	1.559	1.178	1.450

Tabela 24 Valores anuais de Fcc calculados pela ETo para a bacia do rio Doce.

ANO	ACCESS SSP245	ACCESS SSP585	Can SSP245	Can SSP585	INM SSP245	INM SSP585	IPSL SSP245	IPSL SSP585	MPI SSP245	MPI SSP585
2022	1.053	1.019	1.035	1.054	1.026	1.009	1.024	1.017	1.043	1.050
2023	1.035	1.029	1.060	1.084	1.008	1.057	1.042	1.027	1.022	1.040
2024	1.060	1.055	1.026	1.049	1.034	1.054	1.058	1.029	1.032	1.055
2025	1.039	1.076	1.081	1.030	1.025	1.052	1.047	1.020	1.083	1.022
2026	1.052	1.064	1.077	1.058	1.028	1.039	1.065	1.039	1.056	1.056
2027	1.096	1.052	1.057	1.037	1.026	1.030	1.038	1.020	1.035	1.001
2028	1.086	1.058	1.045	1.073	1.059	1.024	1.032	1.062	1.000	1.029

2029	1.093	1.085	1.081	1.080	1.033	1.071	1.044	1.051	1.049	1.072
2030	1.065	1.068	1.093	1.050	1.033	1.062	1.005	1.074	1.062	1.090
2031	1.072	1.052	1.074	1.072	1.018	1.029	1.048	1.054	1.037	1.072
2032	1.059	1.052	1.104	1.095	1.042	1.043	1.043	1.043	1.098	1.079
2033	1.050	1.037	1.080	1.115	1.037	1.018	1.060	1.043	1.079	1.034
2034	1.107	1.049	1.097	1.079	1.015	1.053	1.036	1.066	1.040	1.097
2035	1.089	1.096	1.113	1.070	1.020	1.043	1.044	1.021	1.037	1.073
2036	1.043	1.077	1.070	1.095	1.038	1.051	1.063	1.069	1.044	1.069
2037	1.069	1.045	1.060	1.083	1.021	1.063	1.067	1.071	1.105	1.029
2038	1.084	1.107	1.075	1.050	1.046	1.044	1.048	1.073	1.073	1.057
2039	1.086	1.131	1.065	1.104	1.035	1.048	1.034	1.067	1.093	1.061
2040	1.069	1.088	1.074	1.097	1.010	1.037	1.091	1.058	1.080	1.050
2041	1.058	1.066	1.085	1.128	1.045	1.063	1.049	1.054	1.071	1.071
2042	1.078	1.082	1.116	1.081	1.043	1.042	1.046	1.033	1.071	1.050
2043	1.068	1.075	1.061	1.137	1.018	1.055	1.057	1.084	1.071	1.051
2044	1.046	1.094	1.070	1.143	1.047	1.045	1.060	1.108	1.032	1.092
2045	1.070	1.082	1.082	1.080	1.069	1.071	1.071	1.092	1.027	1.040
2046	1.119	1.086	1.068	1.116	1.052	1.048	1.068	1.080	1.088	1.043
2047	1.084	1.084	1.064	1.183	1.041	1.091	1.086	1.114	1.080	1.019
2048	1.099	1.086	1.118	1.084	1.063	1.077	1.076	1.123	1.065	1.079
2049	1.095	1.082	1.091	1.121	1.056	1.095	1.061	1.072	1.052	1.103
2050	1.102	1.077	1.103	1.112	1.055	1.081	1.065	1.070	1.055	1.077
2051	1.107	1.076	1.124	1.135	1.059	1.074	1.048	1.089	1.086	1.068
2052	1.117	1.102	1.113	1.131	1.056	1.088	1.074	1.120	1.089	1.028
2053	1.092	1.115	1.073	1.137	1.050	1.075	1.093	1.124	1.065	1.119
2054	1.054	1.124	1.068	1.137	1.034	1.072	1.116	1.082	1.062	1.141
2055	1.086	1.130	1.079	1.141	1.067	1.096	1.053	1.092	1.087	1.133
2056	1.117	1.154	1.099	1.149	1.081	1.082	1.063	1.153	1.019	1.079
2057	1.124	1.094	1.076	1.194	1.055	1.078	1.099	1.132	1.039	1.075
2058	1.096	1.114	1.091	1.162	1.064	1.060	1.090	1.127	1.084	1.083
2059	1.109	1.139	1.108	1.156	1.041	1.102	1.069	1.127	1.074	1.071
2060	1.085	1.158	1.149	1.179	1.061	1.090	1.096	1.120	1.063	1.099
2061	1.095	1.098	1.122	1.180	1.077	1.085	1.071	1.115	1.054	1.113
2062	1.109	1.103	1.113	1.131	1.067	1.081	1.105	1.100	1.022	1.104
2063	1.129	1.129	1.103	1.158	1.047	1.096	1.129	1.121	1.073	1.113
2064	1.122	1.132	1.071	1.198	1.055	1.096	1.091	1.153	1.087	1.111
2065	1.134	1.121	1.101	1.152	1.068	1.088	1.078	1.120	1.044	1.152
2066	1.084	1.137	1.115	1.236	1.096	1.063	1.088	1.166	1.094	1.112
2067	1.105	1.104	1.084	1.242	1.096	1.087	1.126	1.168	1.077	1.113
2068	1.095	1.124	1.104	1.184	1.058	1.091	1.137	1.153	1.077	1.108
2069	1.117	1.151	1.107	1.193	1.070	1.098	1.057	1.139	1.052	1.134
2070	1.116	1.162	1.149	1.244	1.052	1.114	1.077	1.157	1.087	1.132
2071	1.109	1.160	1.100	1.265	1.061	1.112	1.073	1.126	1.084	1.126
2072	1.086	1.192	1.092	1.161	1.042	1.117	1.081	1.156	1.037	1.101
2073	1.109	1.196	1.150	1.206	1.065	1.117	1.117	1.176	1.084	1.189
2074	1.128	1.190	1.133	1.245	1.097	1.093	1.102	1.168	1.066	1.148
2075	1.099	1.155	1.094	1.205	1.033	1.114	1.079	1.128	1.083	1.135
2076	1.138	1.154	1.148	1.206	1.077	1.099	1.135	1.139	1.102	1.089

2077	1.146	1.183	1.141	1.235	1.061	1.122	1.101	1.175	1.119	1.119
2078	1.159	1.174	1.131	1.241	1.063	1.093	1.141	1.194	1.056	1.133
2079	1.141	1.178	1.117	1.171	1.050	1.089	1.114	1.172	1.057	1.149
2080	1.149	1.159	1.119	1.278	1.062	1.105	1.087	1.218	1.038	1.123
2081	1.118	1.212	1.094	1.294	1.074	1.109	1.117	1.263	1.084	1.173
2082	1.129	1.217	1.165	1.257	1.095	1.113	1.096	1.197	1.068	1.116
2083	1.152	1.155	1.106	1.274	1.051	1.110	1.116	1.200	1.119	1.153
2084	1.118	1.196	1.163	1.297	1.068	1.119	1.128	1.231	1.084	1.176
2085	1.146	1.151	1.134	1.304	1.076	1.160	1.172	1.199	1.121	1.170
2086	1.107	1.248	1.120	1.290	1.098	1.117	1.142	1.209	1.064	1.159
2087	1.104	1.201	1.198	1.276	1.071	1.150	1.133	1.247	1.142	1.123
2088	1.107	1.223	1.160	1.328	1.051	1.124	1.108	1.220	1.110	1.179
2089	1.130	1.191	1.146	1.274	1.083	1.135	1.127	1.216	1.098	1.147
2090	1.148	1.220	1.133	1.244	1.077	1.116	1.127	1.240	1.074	1.178
2091	1.105	1.219	1.163	1.320	1.058	1.142	1.120	1.185	1.072	1.164
2092	1.114	1.208	1.140	1.342	1.090	1.090	1.087	1.240	1.041	1.127
2093	1.111	1.215	1.101	1.297	1.078	1.147	1.111	1.217	1.069	1.160
2094	1.108	1.206	1.148	1.296	1.083	1.140	1.096	1.198	1.107	1.199
2095	1.124	1.228	1.202	1.289	1.071	1.118	1.105	1.267	1.058	1.163
2096	1.163	1.203	1.137	1.357	1.047	1.134	1.132	1.257	1.126	1.187
2097	1.127	1.262	1.128	1.296	1.083	1.128	1.162	1.233	1.077	1.178
2098	1.131	1.246	1.129	1.315	1.051	1.172	1.068	1.258	1.077	1.180
2099	1.100	1.225	1.150	1.348	1.073	1.137	1.100	1.289	1.048	1.213
2100	1.093	1.235	1.159	1.349	1.070	1.128	1.125	1.229	1.077	1.184

Tabela 25 Valores anuais de Fcc calculados pela Temperatura média para a bacia do rio Paraná.

ANO	ACCESS SSP245	ACCESS SSP585	Can SSP245	Can SSP585	INM SSP245	INM SSP585	IPSL SSP245	IPSL SSP585	MPI SSP245	MPI SSP585
2022	1.064	1.033	1.040	1.040	1.066	1.017	1.028	1.013	1.009	1.045
2023	1.034	1.022	1.058	1.058	1.100	1.015	1.056	1.051	1.045	1.014
2024	1.070	1.048	1.037	1.037	1.058	1.034	1.049	1.055	1.031	1.039
2025	1.036	1.078	1.079	1.079	1.050	1.036	1.040	1.040	1.032	1.087
2026	1.050	1.074	1.076	1.076	1.080	1.037	1.044	1.079	1.055	1.055
2027	1.095	1.060	1.070	1.070	1.063	1.037	1.022	1.048	1.034	1.052
2028	1.084	1.059	1.051	1.051	1.081	1.060	1.011	1.032	1.070	1.012
2029	1.075	1.109	1.059	1.059	1.091	1.046	1.054	1.067	1.054	1.060
2030	1.056	1.072	1.093	1.093	1.068	1.037	1.056	1.012	1.093	1.063
2031	1.064	1.065	1.090	1.090	1.088	1.005	1.026	1.052	1.069	1.010
2032	1.065	1.066	1.128	1.128	1.109	1.056	1.052	1.066	1.058	1.071
2033	1.057	1.055	1.098	1.098	1.140	1.050	1.026	1.067	1.060	1.084
2034	1.119	1.065	1.101	1.101	1.088	1.024	1.056	1.061	1.064	1.032
2035	1.100	1.093	1.124	1.124	1.085	1.017	1.050	1.043	1.035	1.027
2036	1.055	1.073	1.068	1.068	1.118	1.035	1.047	1.079	1.081	1.033
2037	1.081	1.064	1.084	1.084	1.092	1.013	1.058	1.078	1.069	1.091
2038	1.090	1.105	1.095	1.095	1.067	1.042	1.050	1.065	1.094	1.037
2039	1.099	1.139	1.085	1.085	1.110	1.046	1.059	1.037	1.082	1.076
2040	1.085	1.104	1.101	1.101	1.131	1.034	1.056	1.101	1.071	1.073

2041	1.077	1.078	1.097	1.097	1.133	1.056	1.055	1.061	1.069	1.063
2042	1.078	1.093	1.141	1.141	1.105	1.051	1.067	1.067	1.039	1.052
2043	1.075	1.098	1.091	1.091	1.157	1.033	1.054	1.079	1.096	1.066
2044	1.058	1.120	1.092	1.092	1.168	1.045	1.044	1.059	1.123	1.033
2045	1.085	1.087	1.121	1.121	1.114	1.085	1.087	1.072	1.092	1.025
2046	1.134	1.083	1.101	1.101	1.132	1.055	1.057	1.084	1.094	1.097
2047	1.089	1.099	1.094	1.094	1.204	1.059	1.097	1.100	1.131	1.077
2048	1.110	1.106	1.141	1.141	1.126	1.077	1.085	1.093	1.134	1.077
2049	1.116	1.091	1.107	1.107	1.157	1.072	1.107	1.091	1.094	1.054
2050	1.112	1.088	1.110	1.110	1.149	1.065	1.081	1.085	1.100	1.062
2051	1.116	1.092	1.128	1.128	1.167	1.066	1.091	1.065	1.122	1.076
2052	1.130	1.107	1.150	1.150	1.156	1.077	1.093	1.095	1.128	1.082
2053	1.099	1.134	1.096	1.096	1.171	1.055	1.090	1.105	1.137	1.077
2054	1.065	1.132	1.099	1.099	1.165	1.045	1.092	1.130	1.102	1.074
2055	1.100	1.157	1.096	1.096	1.161	1.060	1.092	1.067	1.108	1.062
2056	1.121	1.177	1.140	1.140	1.195	1.079	1.083	1.075	1.168	1.013
2057	1.129	1.117	1.101	1.101	1.226	1.064	1.089	1.107	1.157	1.041
2058	1.089	1.150	1.117	1.117	1.190	1.073	1.080	1.123	1.151	1.101
2059	1.124	1.149	1.141	1.141	1.196	1.059	1.109	1.085	1.147	1.079
2060	1.101	1.184	1.176	1.176	1.212	1.075	1.105	1.126	1.146	1.067
2061	1.099	1.111	1.137	1.137	1.228	1.074	1.097	1.086	1.148	1.060
2062	1.113	1.117	1.117	1.117	1.177	1.068	1.092	1.128	1.121	1.037
2063	1.134	1.145	1.136	1.136	1.210	1.058	1.122	1.143	1.139	1.095
2064	1.113	1.151	1.101	1.101	1.236	1.058	1.125	1.103	1.163	1.089
2065	1.148	1.140	1.114	1.114	1.210	1.081	1.086	1.102	1.164	1.055
2066	1.113	1.150	1.136	1.136	1.283	1.100	1.080	1.096	1.186	1.093
2067	1.116	1.131	1.094	1.094	1.309	1.101	1.101	1.137	1.171	1.077
2068	1.123	1.154	1.128	1.128	1.225	1.057	1.127	1.163	1.169	1.078
2069	1.139	1.179	1.134	1.134	1.253	1.081	1.100	1.098	1.157	1.046
2070	1.126	1.174	1.169	1.169	1.278	1.060	1.125	1.099	1.182	1.100
2071	1.121	1.179	1.119	1.119	1.308	1.078	1.148	1.095	1.185	1.090
2072	1.101	1.208	1.129	1.129	1.200	1.047	1.134	1.119	1.185	1.058
2073	1.117	1.203	1.156	1.156	1.268	1.086	1.138	1.123	1.200	1.088
2074	1.143	1.208	1.170	1.170	1.319	1.101	1.114	1.108	1.200	1.080
2075	1.106	1.177	1.128	1.128	1.255	1.059	1.143	1.107	1.168	1.086
2076	1.132	1.164	1.170	1.170	1.267	1.070	1.120	1.156	1.166	1.099
2077	1.146	1.222	1.140	1.140	1.294	1.076	1.129	1.145	1.203	1.115
2078	1.156	1.204	1.147	1.147	1.291	1.082	1.113	1.163	1.237	1.066
2079	1.150	1.202	1.146	1.146	1.241	1.058	1.109	1.125	1.227	1.064
2080	1.159	1.197	1.129	1.129	1.326	1.078	1.120	1.109	1.242	1.063
2081	1.126	1.240	1.131	1.131	1.358	1.079	1.127	1.129	1.307	1.076
2082	1.132	1.249	1.176	1.176	1.290	1.112	1.135	1.114	1.243	1.084
2083	1.167	1.180	1.130	1.130	1.348	1.057	1.126	1.140	1.219	1.129
2084	1.138	1.241	1.179	1.179	1.341	1.075	1.127	1.146	1.289	1.120
2085	1.141	1.193	1.175	1.175	1.326	1.073	1.176	1.178	1.246	1.131
2086	1.119	1.264	1.149	1.149	1.340	1.082	1.133	1.170	1.258	1.074
2087	1.132	1.221	1.238	1.238	1.345	1.082	1.145	1.144	1.312	1.146
2088	1.127	1.252	1.208	1.208	1.409	1.066	1.140	1.126	1.274	1.136

2089	1.144	1.222	1.176	1.176	1.359	1.076	1.159	1.141	1.269	1.094
2090	1.153	1.249	1.171	1.171	1.314	1.076	1.151	1.149	1.309	1.094
2091	1.125	1.246	1.218	1.218	1.403	1.074	1.152	1.133	1.238	1.071
2092	1.115	1.239	1.210	1.210	1.428	1.103	1.128	1.103	1.296	1.052
2093	1.148	1.249	1.149	1.149	1.380	1.094	1.169	1.135	1.259	1.091
2094	1.131	1.230	1.173	1.173	1.384	1.099	1.162	1.113	1.270	1.103
2095	1.144	1.258	1.241	1.241	1.397	1.080	1.132	1.121	1.316	1.069
2096	1.182	1.218	1.168	1.168	1.440	1.073	1.161	1.160	1.317	1.137
2097	1.157	1.291	1.168	1.168	1.368	1.075	1.161	1.177	1.263	1.080
2098	1.158	1.271	1.161	1.161	1.388	1.069	1.186	1.109	1.305	1.086
2099	1.129	1.261	1.176	1.176	1.433	1.080	1.156	1.117	1.344	1.070
2100	1.119	1.260	1.198	1.198	1.436	1.083	1.174	1.148	1.287	1.098

Tabela 26 Valores anuais de Fcc calculados pela ETo para a bacia do rio Paraná.

ANO	ACCESS SSP245	ACCESS SSP585	Can SSP245	Can SSP585	INM SSP245	INM SSP585	IPSL SSP245	IPSL SSP585	MPI SSP245	MPI SSP585
2022	1.112	1.002	1.046	0.980	1.157	0.997	1.032	0.949	1.008	1.055
2023	1.036	0.988	1.095	1.034	1.242	0.981	1.087	1.051	1.068	0.986
2024	1.126	1.018	0.985	0.912	1.099	1.001	1.066	1.019	1.030	1.010
2025	1.089	1.157	1.197	1.147	1.146	1.064	1.115	1.071	1.088	1.213
2026	1.041	1.071	1.100	1.041	1.138	0.996	1.021	1.083	1.068	1.030
2027	1.192	1.051	1.089	1.026	1.123	1.033	1.009	1.041	1.039	1.087
2028	1.175	1.092	1.079	1.016	1.188	1.116	0.988	1.018	1.151	0.982
2029	1.112	1.175	1.392	1.365	1.173	1.028	1.047	1.049	1.075	1.070
2030	1.107	1.158	1.208	1.157	1.180	1.066	1.131	0.975	1.223	1.131
2031	1.092	1.054	1.128	1.069	1.165	0.939	0.994	1.007	1.114	0.932
2032	1.090	1.074	1.300	1.261	1.221	1.096	1.059	1.066	1.088	1.110
2033	1.120	1.097	1.202	1.152	1.365	1.124	1.048	1.130	1.149	1.183
2034	1.215	1.067	1.181	1.128	1.168	0.989	1.049	1.048	1.083	0.990
2035	1.212	1.193	1.324	1.285	1.207	0.984	1.097	1.054	1.080	1.024
2036	1.105	1.135	1.063	0.998	1.284	1.007	1.082	1.113	1.169	1.029
2037	1.121	1.071	1.149	1.094	1.214	0.951	1.076	1.101	1.119	1.133
2038	1.220	1.229	1.205	1.152	1.154	1.081	1.097	1.120	1.225	1.068
2039	1.193	1.294	1.130	1.072	1.244	1.048	1.083	1.022	1.177	1.127
2040	1.154	1.185	1.243	1.194	1.293	0.999	1.079	1.160	1.138	1.103
2041	1.203	1.170	1.184	1.132	1.359	1.144	1.137	1.138	1.183	1.157
2042	1.122	1.114	1.297	1.256	1.204	1.031	1.091	1.052	1.023	1.029
2043	1.190	1.230	1.204	1.154	1.399	1.092	1.136	1.168	1.251	1.144
2044	1.055	1.210	1.156	1.101	1.354	1.046	1.036	1.030	1.247	0.996
2045	1.155	1.138	1.265	1.223	1.234	1.172	1.152	1.079	1.176	0.979
2046	1.318	1.187	1.230	1.183	1.322	1.114	1.133	1.163	1.227	1.203
2047	1.130	1.146	1.150	1.092	1.448	1.065	1.178	1.145	1.271	1.099
2048	1.268	1.230	1.324	1.290	1.318	1.179	1.195	1.187	1.320	1.140
2049	1.241	1.131	1.189	1.135	1.353	1.109	1.220	1.142	1.195	1.041
2050	1.229	1.129	1.196	1.143	1.324	1.080	1.124	1.105	1.173	1.063
2051	1.267	1.205	1.306	1.267	1.423	1.160	1.232	1.126	1.297	1.181
2052	1.275	1.213	1.288	1.248	1.324	1.132	1.186	1.157	1.264	1.136

2053	1.187	1.267	1.242	1.194	1.400	1.072	1.201	1.200	1.325	1.114
2054	1.126	1.283	1.140	1.082	1.399	1.083	1.199	1.267	1.234	1.169
2055	1.165	1.299	1.149	1.092	1.327	1.088	1.161	1.041	1.215	1.086
2056	1.278	1.390	1.340	1.303	1.455	1.157	1.185	1.136	1.388	0.983
2057	1.304	1.268	1.164	1.111	1.530	1.141	1.203	1.224	1.376	1.072
2058	1.152	1.288	1.269	1.225	1.410	1.121	1.134	1.216	1.324	1.169
2059	1.332	1.368	1.312	1.272	1.475	1.158	1.281	1.189	1.373	1.203
2060	1.172	1.356	1.375	1.342	1.456	1.108	1.186	1.211	1.281	1.079
2061	1.204	1.232	1.312	1.273	1.519	1.154	1.205	1.147	1.331	1.091
2062	1.251	1.231	1.236	1.188	1.399	1.151	1.205	1.280	1.286	1.051
2063	1.267	1.274	1.266	1.221	1.434	1.069	1.229	1.250	1.298	1.158
2064	1.263	1.343	1.256	1.213	1.552	1.129	1.290	1.219	1.395	1.188
2065	1.297	1.298	1.189	1.136	1.440	1.139	1.150	1.175	1.365	1.048
2066	1.251	1.325	1.317	1.280	1.621	1.221	1.141	1.176	1.437	1.196
2067	1.227	1.267	1.176	1.124	1.659	1.214	1.200	1.254	1.380	1.125
2068	1.251	1.313	1.226	1.177	1.495	1.071	1.272	1.313	1.366	1.109
2069	1.318	1.415	1.348	1.310	1.574	1.189	1.239	1.203	1.388	1.070
2070	1.288	1.393	1.324	1.286	1.609	1.120	1.266	1.194	1.424	1.202
2071	1.219	1.392	1.251	1.207	1.635	1.124	1.335	1.131	1.402	1.168
2072	1.236	1.478	1.307	1.265	1.472	1.082	1.323	1.260	1.435	1.114
2073	1.219	1.412	1.317	1.278	1.610	1.172	1.298	1.268	1.456	1.174
2074	1.281	1.445	1.393	1.360	1.668	1.187	1.229	1.197	1.438	1.113
2075	1.266	1.434	1.241	1.194	1.582	1.143	1.366	1.245	1.430	1.226
2076	1.259	1.336	1.374	1.340	1.550	1.095	1.213	1.278	1.326	1.157
2077	1.364	1.524	1.326	1.291	1.656	1.191	1.326	1.333	1.500	1.284
2078	1.317	1.408	1.280	1.239	1.590	1.136	1.208	1.318	1.504	1.067
2079	1.312	1.430	1.328	1.292	1.508	1.061	1.228	1.250	1.500	1.087
2080	1.380	1.463	1.298	1.257	1.686	1.166	1.296	1.241	1.557	1.143
2081	1.234	1.495	1.263	1.216	1.718	1.119	1.260	1.246	1.631	1.094
2082	1.332	1.553	1.415	1.388	1.647	1.250	1.320	1.237	1.561	1.196
2083	1.369	1.387	1.230	1.182	1.720	1.088	1.262	1.276	1.488	1.257
2084	1.264	1.525	1.376	1.344	1.700	1.122	1.261	1.272	1.610	1.214
2085	1.322	1.445	1.434	1.405	1.703	1.171	1.425	1.398	1.570	1.310
2086	1.225	1.551	1.258	1.214	1.698	1.163	1.291	1.360	1.569	1.133
2087	1.272	1.451	1.551	1.532	1.721	1.162	1.310	1.290	1.651	1.294
2088	1.295	1.562	1.430	1.400	1.814	1.140	1.327	1.273	1.621	1.322
2089	1.312	1.444	1.362	1.328	1.718	1.126	1.344	1.283	1.584	1.157
2090	1.363	1.544	1.397	1.364	1.665	1.173	1.357	1.322	1.662	1.203
2091	1.303	1.552	1.459	1.433	1.780	1.169	1.357	1.299	1.553	1.169
2092	1.216	1.482	1.497	1.475	1.801	1.189	1.248	1.138	1.616	1.036
2093	1.378	1.580	1.329	1.290	1.769	1.254	1.424	1.332	1.598	1.232
2094	1.242	1.464	1.359	1.324	1.746	1.179	1.329	1.183	1.542	1.180
2095	1.316	1.560	1.529	1.508	1.773	1.161	1.296	1.238	1.667	1.113
2096	1.426	1.478	1.366	1.333	1.810	1.148	1.371	1.355	1.665	1.304
2097	1.310	1.616	1.351	1.312	1.718	1.116	1.344	1.358	1.541	1.106
2098	1.378	1.606	1.394	1.364	1.776	1.150	1.444	1.225	1.655	1.207
2099	1.260	1.570	1.342	1.303	1.803	1.136	1.351	1.226	1.696	1.114
2100	1.260	1.566	1.466	1.441	1.838	1.155	1.408	1.299	1.599	1.195

