

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

Análise da Influência das Mudanças Climáticas no Aproveitamento
Hidroenergético da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí

Marina de Almeida Barbosa

Itajubá

2024

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

Marina de Almeida Barbosa

Análise da Influência das Mudanças Climáticas no Aproveitamento
Hidroenergético da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de concentração: Energia, Sociedade e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

Co-orientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

Itajubá

2024

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

Marina de Almeida Barbosa

Análise da Influência das Mudanças Climáticas no Aproveitamento
Hidroenergético da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí

Dissertação o submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho (Orientador)

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva (Co-orientador)

Prof. Dr. Arcilan Trevenzoli Assireu

Dr. Luciano José da Silva

Itajubá

2024

**Dedico essa dissertação aos meus saudosos avós
Geraldo e Bernardina (*In Memoriam*), que
sempre me incentivaram a ser minha
melhor versão e são meu maior exemplo de
bondade e integridade.**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela dádiva da vida e por me encaminhar sempre para o melhor.

Ao Professor Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho, que aceitou orientar essa dissertação. Meu muito obrigada pela paciência, estímulo e confiança, pelas excelentes recomendações e aulas. Ao Professor Dr. Benedito da Silva, o Coorientador dessa dissertação, que teve papel fundamental no acompanhamento e orientação das atividades do programa de mestrado e que contribuiu com diversos conselhos e sugestões para a melhoria desse trabalho. Obrigada pela paciência, pela disponibilidade e pelas excelentes aulas e materiais de hidrologia.

Aos professores do programa de mestrado em Engenharia da Energia e de outros programas de mestrado da UNIFEI dos quais tive a honra de ser aluna. Muito obrigada por compartilharem um pouco do seu conhecimento e da sua experiência em sala de aula, pelo incentivo e colaborações nessa jornada. Aos servidores e secretárias da pós-graduação, pela disponibilidade em sanar dúvidas e ajudar, com atenção e simpatia. Meu muito obrigada.

A minha mãe Maria Célia, minha irmã Sarah, meu padrasto João, minha madrinha Lizanja, minhas tias e tios, primos e toda família Almeida. Obrigada pelo apoio e incentivo em toda minha vida pessoal e acadêmica. Ao meu namorado Afonso e aos meus sogros Marialice e Nelson. Pelo carinho, apoio e pelo incentivo no meu crescimento.

A todos os amigos que tiveram papel importante na minha vida, Isabela, Lara, Luciano, Nathaly, Raquel, Juliana, Thiago, Emanuel e Túlio. Meu muito obrigada.

“O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são”

Aristóteles

RESUMO

Mudanças climáticas são alterações no clima causadas pelo aquecimento global decorrente do aumento da emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) de origem antrópica. Essas alterações do clima representam um desafio significativo para o meio ambiente e setores econômicos, incluindo o energético. Como a geração de energia elétrica no Brasil é predominantemente de fonte hidrelétrica, o conhecimento da dinâmica dos processos de precipitação e vazão torna-se essencial para a operação e análise das vulnerabilidades do sistema às alterações climáticas. O presente estudo analisou o aproveitamento hidroenergético da bacia hidrográfica do Rio Sapucaí em cenários de mudança climática, utilizando para isso o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB-IPH e as projeções climáticas do NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX GDDP), a partir dos cenários SSP2-4.5, intermediário e SSP5-8.5, de altas emissões do Sexto Relatório (AR6) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Os resultados indicam uma tendência de estabilidade ou leve aumento na potência gerada nos cenários de mudança climática, especialmente no SSP5-8.5, que prevê maiores emissões. Sublinhando a necessidade de integrar as projeções climáticas no planejamento e gestão dos recursos hídricos para garantir a resiliência e sustentabilidade da geração hidrelétrica no Brasil frente às mudanças climáticas.

Palavras-chave:

Mudanças climáticas, energia hidrelétrica, modelo hidrológico, MGB-IPH, planejamento energético.

ABSTRACT

Climate changes are alterations in the climate caused by global warming, which results from the increased emission of anthropogenic Greenhouse Gases (GHG). These climate alterations pose a significant challenge to the environment and economic sectors, including the energy sector. As electricity generation in Brazil is predominantly from hydroelectric sources, understanding the dynamics of precipitation and flow processes becomes essential for the operation and analysis of the system's vulnerabilities to climate changes. The current study analyzed the hydroelectric potential of the Sapucaí River watershed in climate change scenarios, using the Large Basin Hydrological Model (MGB-IPH) and the climate projections from NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX GDDP), based on the SSP2-4.5 intermediate scenarios and SSP5-8.5 high emissions scenarios from the Sixth Assessment Report (AR6) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The results indicate a trend of stability or slight increase in the power generated in climate change scenarios, especially in SSP5-8.5, which predicts higher emissions. This underscores the need to integrate climate projections into the planning and management of water resources to ensure the resilience and sustainability of hydroelectric generation in Brazil in the face of climate changes.

Key words:

Climate change, hydropower, hydrological model, MGB-IPH, energy planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do Setor Elétrico Brasileiro.....	22
Figura 2 - Sistema Interligado Nacional horizonte 2024.....	26
Figura 3 - Esquema de uma hidrelétrica.....	28
Figura 4 - Matriz elétrica brasileira 2021	30
Figura 5 - Comparativo da matriz elétrica brasileira em 2020 e 2021	31
Figura 6 - Esquema do fluxo de processos para implantação de usina hidrelétrica	33
Figura 7 - Sequência de utilização de um modelo hidrológico	36
Figura 8 – Componentes do ciclo da água simulados na modelagem hidrológica.....	39
Figura 9 - Esquema das relações dos diferentes processos hidrológicos em um modelo	40
Figura 10 - Mudanças na temperatura relativa da superfície global entre 1850 e 1900. 47	
Figura 11- Efeito das mudanças climáticas na geração hidrelétrica global.....	62
Figura 12 - Esquema geral dos estudos de impactos de mudanças climáticas na geração hidrelétrica.....	72
Figura 13 - Esquema metodológico para análise do impacto das mudanças climáticas na geração hidrelétrica e adaptações	73
Figura 14 - Fluxograma da Metodologia.....	76
Figura 15 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí.....	78
Figura 16 - Esquema do experimento CMIP/CMIP6	81
Figura 17 - Esquema do balanço de água no solo no modelo MGB-IPH	88
Figura 18 - Fluxograma da aplicação do modelo MGB-IPH	89
Figura 19 – Modelo Digital de Elevação da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí.....	90
Figura 20 - Minibacias para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí.....	91
Figura 21 - Postos Fluviométricos utilizados para calibração do MGB-IPH na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí	92
Figura 22 - Sub-bacias obtidas para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí.....	93
Figura 23 - Comparação entre os dados históricos observados e os dados históricos simulados para os modelos	101

Figura 24 – Climatologia das vazões no período histórico para os dados observados e para os dados simulados pelos modelos	102
Figura 25 - Curva de permanência do período histórico para a simulação com dados observados e simulações com dados históricos dos modelos.....	104
Figura 26 - Climatologia das vazões nos aproveitamentos analisados para os modelos	107
Figura 27 - Anomalias de vazão nos dois aproveitamentos analisados para os modelos	109
Figura 28 - Curva de permanência nos aproveitamentos Gabiru e Guaipava, para o período histórico e cenários futuros nos modelos analisados.....	110
Figura 29 - Climatologia das potências nos aproveitamentos analisados para os modelos	113
Figura 30 - Anomalias percentuais da potência média para os aproveitamentos.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Acréscimos da temperatura global em casa cenário do AR6	56
Tabela 2 - Estatísticas de Ajuste.....	94
Tabela 3 - Aproveitamentos Hidrelétricos Seleccionados	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Áreas que recebem suporte da modelagem hidrológica.....	37
Quadro 2 - Classificações dos modelos hidrológicos.....	42
Quadro 3 – Relatórios e produções do IPCC.....	49
Quadro 4 - Dados de entrada do modelo MGB-IPH	86
Quadro 5 - Dados espaciais gerados a partir da utilização de SIG.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL - Ambiente de Comercialização Livre
ACR - Ambiente de Comercialização Regulada
ACV - Análise do Ciclo de Vida
AHE - Aproveitamentos Hidrelétricos
ANA - Agência Nacional de Águas
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
AR - Área do Reservatório
AR6 - Sexto Relatório do IPCC
BEM - Balanço Energético Nacional
CBPE - Congresso Brasileiro de Planejamento Energético
CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CDO - Climate Data Operators
CMIP - *Coupled Model Intercomparison Project*
CMIP6 - *Six Coupled Model Intercomparison Project*
CMSE - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico Brasileiro
CNPE - Conselho Nacional de Política Energética
CPTEC - Centro de Pesquisas de Tempo e Clima
DECK - *Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima*
DF - Distância à foz
EF - Energia firme
EIA - Estudo de Impacto Ambiental
ENOS - *El Niño* Oscilação Sul
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
ESGF - *Earth System Grid Federation*
EVOL - Coeficiente Erro de Volume
GEE - Gases do efeito estufa
GF - Garantia física
GHG - *Greenhouse Gases*
HRC - Hydrologic Response Classes

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC - Painel Intergovernamental das Mudanças Climáticas
IPH-UFRGS - Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
LI - Licença de Instalação
LO - Licença de Operação
MAE - Mercado Atacadista de Energia
MCG - Modelo de Circulação Global
MCR - Modelos Climáticos Regionais
MCTI - Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações
MDE - Modelo Digital de Elevação
MGB - Modelo de Grandes Bacias
MIP - *Models Intercomparison Projects*
MME - Ministério de Minas e Energia
MRE - Mecanismo de Realocação de Energia
NAJ - Nível de água a jusante
NAM - Nível de água à montante
NASA - *National Aeronautics and Space Administration*
NCCS - *Nasa Center for Climate Simulation*
NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*
NEX GDDP CMIP6 - *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections*
NETCDF - *Network Common Data Form*
NS - Coeficiente de Nash Sutcliffe
NS log - Coeficiente Logaritmo de Nash Sutcliffe
Netcdf - *Network Common Data Form*
OMM - Organização Meteorológica Mundial
ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico
PI - Potência Instalada
PLD - Preço de Liquidação das Diferenças
PMO - Programa Mensal de Operação
PNE - Planejamento Nacional Energético

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PPG-EEN - Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia
RegCM4 - *Regional Climate Model Version 4*
RIMA - Relatório de Impacto Ambiental
RLO - Renovação de Licença de Operação
Scenario MIP - *Scenario Model Intercomparison Project*
SEB - Sistema Elétrico Brasileiro
SIG - Sistemas de Informação Geográfica
SIGAA - Sistema Integrado de Gestão de Atividades Acadêmicas
SIN - Sistema Integrado Nacional
SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*
SSP - *Shared Socioeconomic Pathways*
SUIHI-O - Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas para Subsistemas Hidrotérmicos Interligados
TUSD - *Distribution Pricing*
TUST - *Transmission Pricing*
UERJ - Universidade Estadual do Rio de Janeiro
UPGRH - Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos
URH - Unidades de Resposta Hidrológica
WCRP - *World Climate Research Programme*
WGCM - *Working Group on Coupled Modelling*
WWF - *World Wide Fund for Nature*

LISTA DE SÍMBOLOS

CH₄ - Metano

C - Celsius

CO₂ - Dióxido de Carbono

Km² - Quilômetros quadrados

N₂O - Óxido Nitroso

M – Metros

M³/s – Metro cúbico por segundo

MW – Megawatt

Ppb - Partes por bilhão

Ppm - Partes por milhão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos do Trabalho	19
1.1.1 Objetivo Geral	19
1.1.2 Objetivos Específicos	19
1.2 Estrutura do Trabalho	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Organização do Setor Elétrico Brasileiro	21
2.2 Geração Hidrelétrica no Brasil	27
2.3 Aproveitamento Hidrelétrico de uma Bacia Hidrográfica	32
2.4 Modelos Hidrológicos	35
2.4.1 Classificação dos Modelos Hidrológicos	41
2.4.2 Modelos de Precipitação-Vazão	44
2.5 Mudanças Climáticas	46
2.5.1 O IPCC	48
2.5.2 O Sexto Relatório AR6 do IPCC	51
2.5.3 Cenários de Mudanças Climáticas	53
2.5.4 Impacto das Mudanças Climáticas no Setor Energético	56
2.5.5 Impacto das Mudanças Climáticas na Geração Hidrelétrica	60
2.5.6 Mitigação e Adaptação aos Impactos das Mudanças Climáticas na Geração Hidrelétrica	68
2.5.7 Metodologias para Estudo dos Impactos das Mudanças Climáticas na Geração Hidrelétrica	71
3. METODOLOGIA	75
3.1 Local de Estudo	76
3.2 Dados de Projeção Climática do CMIP6	79
3.2.1 Conjunto de dados NASA <i>Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections</i>	81

3.2.2	Modelos escolhidos	82
3.2.3	Tratamento dos dados	84
3.3	O Modelo Hidrológico MGB-IPH	84
3.3.1	Discretização	86
3.3.2	Estrutura	88
3.3.3	Calibração do MGB-IPH para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí	90
3.3.4	Modelagem	95
3.4	Aproveitamentos Hidrelétricos na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí	95
3.5	Cálculo da Potência	98
4.	<u>RESULTADOS</u>	<u>99</u>
4.1	Desempenho das projeções para o período histórico	99
4.1.1	Climatologia	102
4.1.2	Curva de Permanência	103
4.2	Análise dos cenários de mudança climáticas nos aproveitamentos hidrelétricos	105
4.2.1	Análise das vazões nos aproveitamentos hidrelétricos	106
4.2.1.1	Climatologia	106
4.2.1.2	Anomalias	108
4.2.1.3	Curva de Permanência	110
4.2.2	Análise das potências nos aproveitamentos hidrelétricos	111
4.2.2.1	Climatologia	112
4.2.2.2	Anomalia percentual da potência média	113
4.2.2.3	Curva de Permanência	114
5.	<u>CONCLUSÕES</u>	<u>117</u>
6.	<u>REFERÊNCIAS</u>	<u>119</u>

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são alterações no clima causadas pelo aquecimento global decorrente do aumento da emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) de origem antrópica. Estudos indicam que se não ocorrerem reduções intensas nas emissões de CO₂ e outros GEE nas próximas décadas o aquecimento global de 1,5°C será excedido ainda durante o século XXI (IPCC, 2021a).

Essas mudanças têm grande impacto no setor energético, principalmente no que tange às energias renováveis, pois estas apresentam forte dependência da dotação de recursos naturais. Na perspectiva de aumento das temperaturas, aumenta-se a probabilidade da ocorrência de ondas de calor e de frio mais intensas, frequentes e duráveis, mudam-se os padrões de precipitação, altera-se o ciclo hidrológico e aumentam as probabilidades de ocorrências de eventos extremos (LUCENA, 2010).

Como a geração de energia elétrica no Brasil é predominantemente de fonte hidrelétrica, compondo 62,5% da capacidade instalada do Sistema Integrado Nacional (SIN) em 2020 (EPE, 2021), o conhecimento da dinâmica dos processos de precipitação e vazão torna-se essencial para a operação do sistema. Uma vez que a alteração do regime de vazões causa um impacto direto na disponibilidade hídrica das usinas, o que pode gerar descasamento das condições operativas reais em relação às energias asseguradas dessas unidades (EPE, 2018).

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) possui como principal objetivo efetuar o planejamento, programação e otimização da geração e distribuição de energia elétrica através do SIN. Este sistema aloca a cada instante de tempo recursos energéticos para suprir a demanda dos centros consumidores, buscando sempre minimizar os custos de operação.

Conseqüentemente, informações referentes às alterações no ciclo hidrológico e a disponibilidade hídrica para as bacias hidrográficas são fundamentais para o planejamento e a programação da operação do SIN. Essas informações também

possibilitam a identificação de possíveis situações de vulnerabilidade para a geração hidrelétrica e as alternativas para adaptação do setor eletroenergético nesses casos.

Portanto, a análise das vulnerabilidades do sistema energético às mudanças climáticas é extremamente importante, pois pode fornecer informações sobre o impacto desse fenômeno nos estudos de planejamento energético que subsidiarão as políticas de enfrentamento aos desafios do aquecimento global (LUCENA, 2010).

De acordo com Tucci (2005), os modelos hidrológicos são ferramentas desenvolvidas com a finalidade de entender e representar o comportamento de uma bacia hidrográfica, bem como prever condições fora da normalidade. Esses modelos são uma das ferramentas utilizadas pelas empresas regulatórias e demais agentes do sistema para entender o cenário atual e futuro da geração hidrelétrica frente às variações dos parâmetros ambientais e obter informações importantes para tomadas de decisão mais efetivas, favorecendo a otimização dos processos de geração de energia elétrica no país.

As mudanças projetadas no ciclo hidrológico devido às mudanças climáticas são avaliadas diretamente a partir de modelos climáticos ou hidrológicos, que são impulsionados pelas projeções dos modelos climáticos para cenários de futuras forças climáticas e mudanças socioeconômicas (IPCC, 2021b). Dessa forma, a modelagem hidrológica mostra-se como uma ferramenta importante para auxiliar a tomada de decisão em projetos que envolvam recursos hídricos, possibilitando a adoção de técnicas mais eficientes na implantação dos projetos (MARINHO FILHO *et al.*, 2012).

De acordo com o sexto relatório do IPCC (2021b), existe uma grande confiabilidade de que as mudanças climáticas ocasionarão impactos negativos na produção de energia hidrelétrica e térmica globalmente devido à ocorrência de secas, mudanças na sazonalidade dos fluxos dos rios e temperatura ambiente da água.

No entanto, ressalta-se que apesar de existirem diversos estudos voltados para o impacto de eventos climáticos extremos na produção de energia hidrelétrica e termelétrica, existe uma limitada quantidade de estudos que buscam compreender as tendências na produção de energia devido às mudanças climáticas de longo prazo, fazendo com que essa temática continue sendo uma lacuna de conhecimento (IPCC, 2021 b).

A importância da geração hidrelétrica no cenário energético brasileiro e os impactos dos eventos associados ao fenômeno das mudanças climáticas nesse tipo de geração trazem a crescente necessidade de incorporar os cenários de ocorrência desses fenômenos na modelagem hidrológica, a fim de melhorar a previsão nesses cenários e garantir vanguarda para os planejamentos relacionados à adaptação e resiliência do setor energético.

1.1 Objetivos do Trabalho

O presente estudo tem como objetivo analisar o aproveitamento hidroenergético máximo de uma bacia hidrográfica em cenários de mudança climática, utilizando para isso o estudo de caso da aplicação do modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí. Busca-se ainda, entender a interação das mudanças climáticas com o aproveitamento hidroenergético e a vulnerabilidade do aproveitamento desses sistemas nessas condições climáticas, expandindo os resultados obtidos no estudo de caso para o contexto brasileiro.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta dissertação é quantificar o impacto da variabilidade dos cenários das mudanças climáticas no aproveitamento hidroenergético de uma bacia hidrográfica. Utiliza-se como estudo de caso a simulação das vazões e o cálculo do aproveitamento hidroenergético nos cenários de mudança climática do NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6), por meio do modelo hidrológico distribuído de grandes bacias MGB-IPH para área da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Entender o contexto das mudanças climáticas e os desafios desse fenômeno aos recursos hídricos e à energia;
- Utilizar os cenários de mudança climática provenientes do NEX-GDDP-CMIP6;

- Aplicar o modelo MGB- IPH para simulação dos cenários de mudanças climáticas na bacia do Sapucaí;
- Quantificar os impactos dos cenários de mudanças climáticas para o aproveitamento hidroenergético da Bacia hidrográfica do Rio Sapucaí.

1.2 Estrutura do Trabalho

Neste capítulo faz-se a introdução do trabalho, apresentando a justificativa para seu desenvolvimento, seu objetivo geral, objetivos específicos e a apresentação da estrutura da dissertação.

O capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica sobre a estruturação do setor elétrico brasileiro, os conceitos sobre a geração hidrelétrica e o aproveitamento hidrelétrico de uma bacia hidrográfica. Também são abordados os modelos hidrológicos com ênfase nos modelos hidrológicos de chuva-vazão, os conceitos de mudança climática, os cenários desse fenômeno e seus efeitos no setor energético e na geração hidrelétrica. Além de serem apresentadas alternativas de mitigação e adaptação da geração hidrelétrica às mudanças climáticas e brevemente elencadas metodologias para estudos de impactos das mudanças climáticas na geração hidrelétrica.

O capítulo 3 apresenta a descrição metodológica do estudo. Descreve brevemente o modelo de grandes bacias MGB-IPH, suas etapas, dados e parâmetros. Disserta sobre a área de estudo, os dados utilizados, incluindo as séries de dados de cenários de mudanças climáticas e os critérios de restrição operativa aplicados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos. Inicialmente é apresentada a análise do desempenho dos modelos, destacando os ajustes em relação a climatologia e a curva de permanência. Posteriormente são analisados os resultados da aplicação dos cenários de mudanças climáticas para as vazões e potências de geração dos aproveitamentos.

Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energia está diretamente relacionada ao desenvolvimento da sociedade. Para garantir esse desenvolvimento, é necessário que a demanda de energia seja suprida em níveis adequados e confiáveis e que a geração ocorra da maneira mais limpa possível, a fim de garantir a sustentabilidade e a minimização dos danos ambientais dessa geração.

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) apresenta-se como um sistema essencialmente hidrotérmico de grande porte, com forte presença de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários, formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte (PEREIRA *et al.*, 2017).

Para realizar a previsão das vazões afluentes das bacias de interesse em geração hidráulica a ONS utiliza modelos hidrológicos que têm como objetivo principal entender as disponibilidades hídricas em diversas escalas de tempo e dar subsídio para as tomadas de decisão do setor eletroenergético brasileiro.

Se os níveis de precipitação não estiverem adequados, a produção das hidrelétricas não será suficiente para suportar a demanda e as termelétricas serão despachadas. O custo da energia nas termelétricas é mais alto do que o custo da energia produzida pelas hidrelétricas, por isso, nas condições de estiagem, devido ao suporte de produção de energia das usinas térmicas, o preço da energia aumenta.

As mudanças climáticas podem alterar o ciclo hidrológico e a disponibilidade hídrica de uma bacia, afetando os sistemas energéticos de maneira significativa, tanto na produção quanto no consumo de energia (LUCENA, 2010). Essas alterações culminam na diminuição da segurança energética e no maior custo da energia, afetando diretamente a população e a economia do país.

2.1 Organização do Setor Elétrico Brasileiro

O SEB é responsável pela organização e regulamentação da produção de energia no Brasil, englobando geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia

elétrica. Esse setor passou por reestruturações a partir da década de 1990, quando se iniciou a “desverticalização” do setor a partir da separação das atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia e criação do Mercado Atacadista de Energia (MAE).

O SEB segue em constante evolução para garantir a segurança do suprimento de energia elétrica, promover a modicidade das tarifas de energia, promover a universalização do fornecimento de energia elétrica e assegurar estabilidade do marco regulatório (NERY, 2012). Para atingir esses objetivos, foram criadas instituições que organizam diversas vertentes necessárias para a gestão eficiente do setor. Na figura 1 é apresentado um esquema da estrutura organizacional do SEB.



Figura 1 - Estrutura do Setor Elétrico Brasileiro

Fonte: CCEE (2010)

De acordo com Nery (2012), as responsabilidades e atividades desenvolvidas pelas instituições que formam o setor elétrico brasileiro são definidas da seguinte forma:

- O *Conselho Nacional de Política Energética* (CNPE) tem como responsabilidades principais realizar a homologação da política energética brasileira e sugerir medidas para o atendimento da demanda de energia em curto,

médio e longo prazo, com o intuito de assegurar a confiabilidade do sistema elétrico e a modicidade das tarifas de energia;

- O *Ministério de Minas e Energia* (MME) formula e implementa as políticas energéticas de acordo com o CNPE, além de articular o planejamento setorial e coordenar o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico Brasileiro (CMSE);
- O *CMSE* tem como objetivos acompanhar e avaliar a continuidade e a segurança do suprimento de energia elétrica no território brasileiro de maneira permanente. Entre as suas atividades estão o acompanhamento do desenvolvimento da atividade de geração, transmissão, distribuição e comercialização, avaliação do abastecimento de energia elétrica e outras fontes de energia. Também compete ao CMSE a identificação de obstáculos que possam afetar a segurança de abastecimento e a expansão do setor energético, bem como a elaboração de propostas para a solução desses problemas;
- A *Empresa de Pesquisa Energética* (EPE) elabora estudos e pesquisas para dar subsídio ao planejamento do setor de energia, como estudos e projeções da matriz energética brasileira, quantificação do potencial energético brasileiro, determinação dos aproveitamentos ótimos hidráulicos, entre outras atividades. A EPE elabora três importantes documentos para o setor energético, o Balanço Energético Nacional (BEN), o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) e o Plano Nacional de Energia (PNE).

De acordo com EPE (2023) o BEN e o documento que contabiliza a oferta e o consumo de energia no Brasil, incluindo as atividades de extração de recursos energéticos primários, conversão destes em formas secundárias, importação e exportação de energia, distribuição e o uso final dos recursos energéticos. Já o PDE tem por objetivo informar a sociedade sobre as perspectivas de expansão futura do setor de energia sob a ótica do Governo em um horizonte decenal. O último PDE elaborado pela EPE, o PDE 2032 apresenta as perspectivas da expansão do setor de energia para os próximos 10 anos, ou seja, até o horizonte de 2032, dentro de uma visão integrada para os diversos setores energéticos. E,

finalmente, o PNE apresenta a consolidação do planejamento de longo prazo do setor energético do país, sendo composto por uma série de estudos que objetivam orientar tendências e indicar as alternativas de expansão desse setor nas próximas décadas;

- A *Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)* é um agente regulador, mediador e fiscalizador do setor elétrico que realiza leilões das concessões de geração e transmissão, implementa políticas de exploração da energia e aproveitamento dos potenciais hidráulicos, faz a gestão de contratos de concessão de serviços públicos de energia elétrica, aprova regras de comercialização de energia elétrica, define tarifas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica entre outras atribuições;
- A *Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)* sucedeu o MAE em todas as suas atribuições, além de receber a atribuição de contabilizar e liquidar as diferenças dos contratos no mercado de curto prazo para permitir a comercialização de energia no SIN. Essa câmara realiza atividades como a apuração do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) do mercado de curto prazo em cada submercado, os leilões de compra e venda de energia, a manutenção dos registros de dados de interesse para o sistema, entre diversas outras atividades;
- O *ONS* é uma pessoa jurídica de direito privado que atua como uma associação civil sem fins lucrativos e busca atender dois objetivos principais: a otimização energética e a segurança do fornecimento de energia. Essa organização efetua o planejamento e a programação de operação do SIN, otimizando os recursos necessários para a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica desse sistema;
- O *SIN* é o sistema que aloca, de forma contínua, recursos de geração energética e linhas de transmissão para a migração da energia até os centros consumidores, buscando minimizar os custos de operação. É um sistema de grande porte, com uma extensão aproximada de 5 milhões de quilômetros, cobrindo dois terços do

território brasileiro e atendendo cerca de 97% do mercado total de energia elétrica. O SIN conta com cerca de 80 reservatórios localizados em diferentes rios e distribuídos em 14 bacias hidrográficas.

O SIN é dividido em quatro grandes subsistemas, considerando as bacias hidrográficas e as linhas de transmissão de alta tensão, sendo:

- 1) *Sudeste/Centro-Oeste*: Formado pelos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Rondônia e Acre.
- 2) *Sul*: Formado pelos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.
- 3) *Nordeste*: Formado pelos estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí.
- 4) *Norte*: Formado por Amazonas, Amapá, Pará, Tocantins e Maranhão.

Como a ONS realiza um trabalho de contínua coordenação da operação do SIN, ela também tem como responsabilidade elaborar os cálculos de vazões naturais médias diárias, semanais e mensais para os locais de interesse do SIN, gerando cenários que serão utilizados nos processos de planejamento e programação da operação do SIN (FAYAL, 2008).

Na figura 2 é apresentado um mapa do SIN na sua condição atual e a previsão do cenário de expansão para 2024.

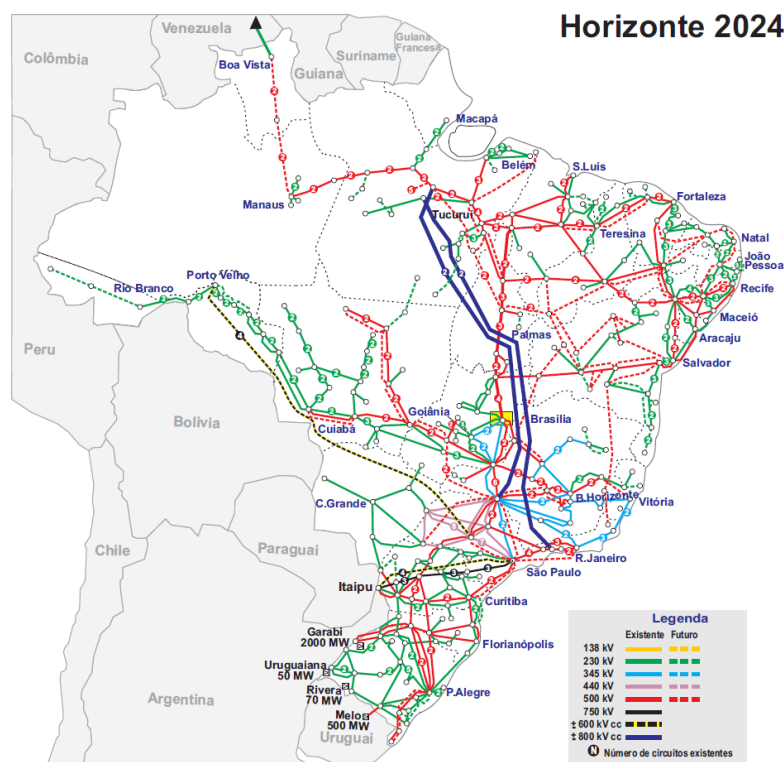


Figura 2 - Sistema Interligado Nacional horizonte 2024

Fonte: ONS (2020)

Ainda segundo Fayal (2008), nas atividades de planejamento e programação do SIN são utilizados modelos energéticos e hidráulicos de simulação e otimização que empregam as informações de vazão natural prevista ou verificada como dado de entrada para a obtenção de resultados sobre o armazenamento e a geração hidrelétrica. A eficiência desses modelos está diretamente relacionada com a execução do Programa Mensal de Operação (PMO), a referência técnica para definição das metas mensais de geração das usinas hidrelétricas, termelétricas e nucleares integrantes do SIN, devido ao fato da PMO possuir como dados de entrada os resultados dos modelos de vazão afluentes da ONS.

Os aperfeiçoamentos metodológicos relacionados à obtenção dos cenários hidrológicos de previsão ou geração de aflúências realizados pela ONS possuem grande importância para a melhoria do processo de planejamento e programação da operação do SIN (GUILHON; ROCHA; MOREIRA, 2007). Por isso, investimentos relacionados ao desenvolvimento de melhorias na previsão dos cenários futuros impactarão diretamente o planejamento do SIN e os planejamento de expansão e operação do SEB como um todo.

2.2 Geração Hidrelétrica no Brasil

As usinas hidrelétricas possuem a capacidade de transformar a energia potencial proveniente do desnível da água em energia elétrica. Esse tipo de geração de energia, amplamente utilizada no Brasil, possui como principais variáveis a altura da queda de água, a vazão, a potência instalada, o tipo de barragem e reservatório e o modelo de turbina, sendo esses fatores interdependentes.

As usinas hidrelétricas brasileiras são classificadas de acordo com a sua potência para geração de energia em Usinas Hidrelétricas (UHE), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Centrais Geradoras Elétricas (CGH). De acordo com a classificação de Brasil (2022) podem ser definidas da seguinte forma:

- UHE é aquela de potencial hidráulico de potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 50.000 kW, que está em regime de produção independente ou autoprodução. Esse tipo de usina foi regularizada pela Resolução Normativa nº 412 de 5/10/2010 da ANEEL;
- As PCH são destinadas a autoprodução ou produção independente de energia e possuem potência superior a 3.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW. Além disso a área de reservatório deve ser de até 13 km², excluindo a calha do leito regular do rio. No caso de aproveitamento hidrelétrico com área de reservatório superior a 13 km² o empreendimento só será considerado PCH se o reservatório for de regularização, no mínimo semanal, ou se o dimensionamento do reservatório tiver sido realizado para outros objetivos que não a geração de energia elétrica. As PCH possuem como regulamento a Resolução Normativa nº 673 de 4/8/2015 da ANEEL;
- Já as CGH são os aproveitamentos hidrelétricos com potência igual ou inferior a 3.000 kW, definidos pela Resolução Normativa nº 673 de 4/8/2015 da ANEEL.

De acordo com Esposito (2014), a estrutura de uma usina hidrelétrica é composta por reservatório, barragem, vertedouro, sistema de captação e adução de água, casa de força e um canal de fuga, que funcionam de maneira interligada.

A barragem interrompe o curso do rio e o armazena em um determinado local, formando o reservatório que estoca a água. A barragem também é importante para compor o desnível utilizado na geração hidráulica. Já o reservatório é utilizado para armazenar água em volume adequado e, conforme for o caso, para regularizar as vazões em períodos de seca. As turbinas convertem a energia potencial da água em energia elétrica por meio de geradores e, após passar pela turbina, a água volta para o rio pelo canal de fuga (ESPOSITO, 2014).

As usinas “a fio d’água” tem como característica a incapacidade de armazenar água no seu reservatório e, neste caso, a vazão natural do rio é utilizada para gerar energia (ESPOSITO, 2014). A figura 3 mostra o esquema de uma usina hidrelétrica:

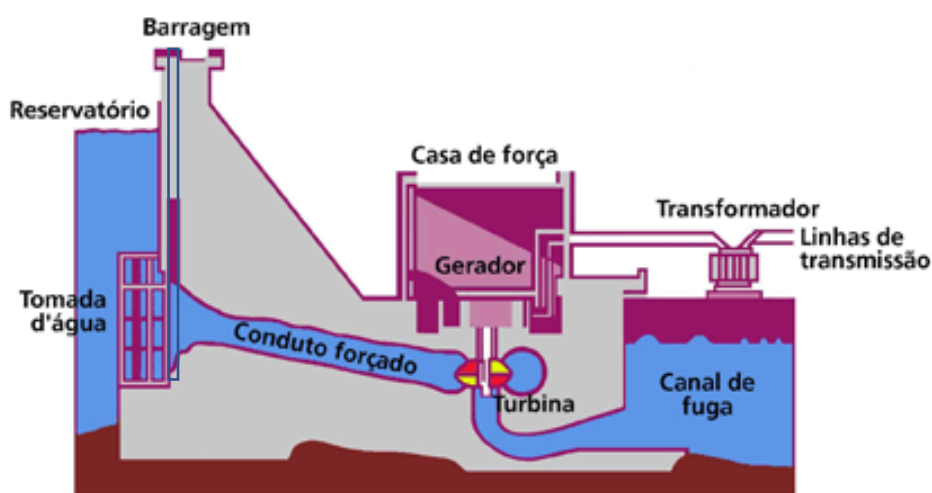


Figura 3 - Esquema de uma hidrelétrica

Fonte: Abrapch (2022)

Todas as formas de produção de energia, independentemente da fonte, impactam o meio ambiente em algum nível, pois todas advêm da transformação dos recursos naturais. Mesmo as energias renováveis, “mais limpas” que outros tipos de geração de energia, causam impacto. Dessa forma, devido a inexistência de um processo de geração

de energia perfeito e totalmente limpo, a escolha da melhor opção de geração é realizada através de um balanço entre os efeitos positivos e negativos de cada caso.

A geração de energia trabalha com um paradoxo: De um lado, a demanda da sociedade e, de outro, a necessidade de proteger o meio ambiente (MME, 2007). Nesse contexto, a utilização da geração hidrelétrica se destaca como uma boa solução de compromisso, pois havendo condições ambientais propícias, pode gerar consideráveis quantidades de energia com um impacto ambiental menor do que outros tipos de geração de energia.

A geração hidrelétrica não gera poluição, no entanto, impacta o meio ambiente devido à inundação gerada pela construção da represa. Apesar dos benefícios relacionados ao desenvolvimento social e ao lazer, essa inundação pode eliminar animais, plantas e riquezas históricas, aumentar problemas de saúde devido à retenção de poluentes produzidos a montante da represa e promover redução do fluxo de sedimentos e nutrientes para as regiões a jusante da represa (HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2017).

De acordo com o sexto relatório do IPCC (AR6), apesar da geração de energia hidrelétrica emitir menores quantidades de GEE em relação à geração de energia por combustíveis fósseis, os reservatórios hidrelétricos estão sendo cada vez mais associados às emissões de GEE, devido à mudança de uso do solo e submersão e, posterior ressurgimento da vegetação devido às flutuações no nível de água. Estudos recentes indicam que os reservatórios podem emitir mais carbono do que armazenam, especialmente na região tropical (IPCC, 2021b).

Silva (2015) aponta que as PCH emitem menores quantidades de GEE em relação às UHE devido às características de menor porte e a possibilidade de uma alta densidade de potência, ou seja, de uma maior capacidade instalada de geração de energia em relação a área de superfície do nível máximo do reservatório. Dessa forma, como a área de alagamento é menor, as emissões de GEE também são reduzidas.

No ano de 2019, a energia hidrelétrica tornou-se a maior fonte de energia renovável do mundo, com um total de 1.308 GW de capacidade instalada (IPCC, 2021b).

A geração hidrelétrica possui grande destaque na matriz elétrica brasileira, como pode ser visto na figura 4.

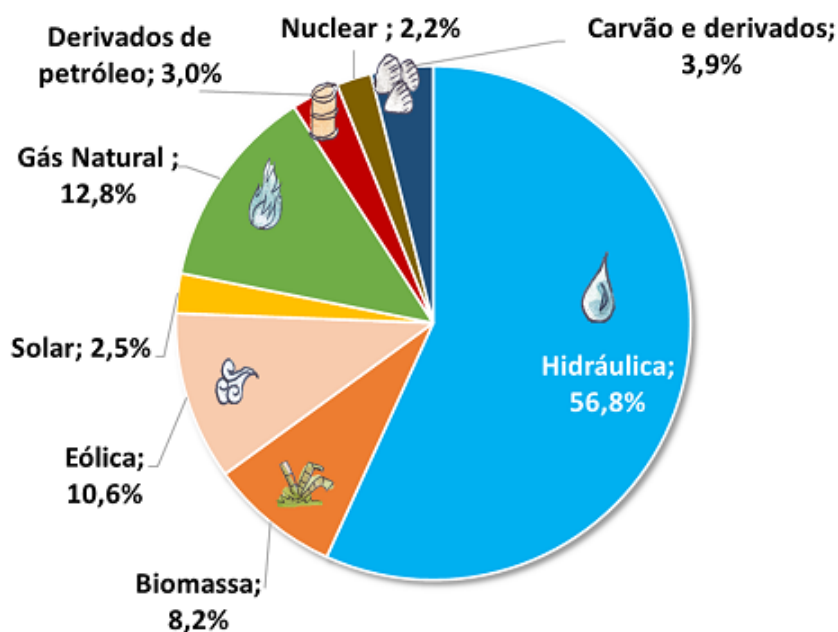


Figura 4 - Matriz elétrica brasileira 2021

Fonte: EPE (2023)

Estima-se que até 2050 a participação das energias renováveis na matriz elétrica mundial possa chegar a 40%. Devido ao aumento da preocupação social e política com o clima e o meio ambiente (HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2017) e, sobretudo, ao crescimento incentivado de outras fontes renováveis de energia, como a eólica e a solar.

O Brasil já enfrentou graves problemas de fornecimento de energia elétrica no início dos anos 2000 em decorrência de um grande período de seca acrescido da falta de planejamento dos órgãos reguladores. Esses fatores comprometeram a capacidade dos reservatórios das usinas hidrelétricas, que na época representavam 90% da oferta nacional de energia, culminando na imposição de um racionamento energético para a população (LUCENA *et al.*, 2009).

Segundo Dupont, Grassi e Romitti (2015), a geração de energia elétrica pelas hidrelétricas no Brasil vem sendo impactada devido a fatores climáticos, como as fortes secas na região sudeste, fazendo com que os reservatórios atinjam níveis críticos e com que haja a necessidade de se implementar estratégias de emergência. As condições

climáticas desfavoráveis impactam negativamente a geração hidrelétrica e afetam diretamente a disponibilidade de energia, fator essencial para o desenvolvimento econômico brasileiro. Como a maioria das hidrelétricas está localizada no Sudeste, diversas usinas ficam sujeitas à variabilidade climática da região, o que concentra o risco de falha do sistema elétrico (TUCCI; BRAGA, 2003).

Como a estimativa de produção de uma usina hidrelétrica depende da disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica, a alteração do regime de vazões da bacia causa um impacto direto na disponibilidade hidráulica, gerando descasamento das condições operativas reais em relação às energias asseguradas dessas unidades (EPE, 2018). Dessa maneira, se o volume de precipitação estiver dentro das normais climatológicas para a região, as usinas conseguem alcançar níveis adequados de produção de energia. No entanto, em épocas de seca, quando a precipitação não alcança as normais, a vazão diminui e a produção de energia é prejudicada.

O BEN (2022) mostrou as mudanças ocorridas na matriz energética brasileira em 2021 devido à escassez hídrica do período e a consequente redução dos níveis dos reservatórios das principais hidrelétricas do país. Esses acontecimentos culminaram na redução da participação da oferta de energia dessa fonte, que tem sido suprida por outras fontes de energia, como a geração eólica e solar, térmicas a gás natural, carvão e derivados de petróleo e da energia elétrica importada de países vizinhos, como pode ser visto na figura 5.

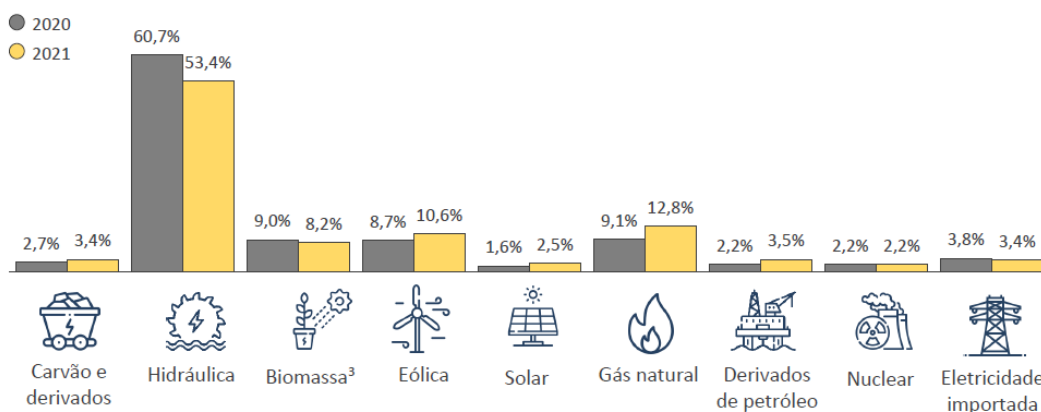


Figura 5 - Comparativo da matriz elétrica brasileira em 2020 e 2021

Fonte: EPE (2022)

Por conseguinte, houve queda de 5,7% na participação das energias renováveis na matriz elétrica brasileira, que passou de 83,8% em 2020 para 78,1% em 2021, principalmente, em decorrência da diminuição da oferta hidráulica e a sua compensação em geração termelétrica (EPE, 2022).

2.3 Aproveitamento Hidrelétrico de uma Bacia Hidrográfica

O setor elétrico possui como responsabilidade planejar a utilização dos recursos hídricos como insumos para produção de energia. Esse planejamento deve ser orientado pela racionalidade e otimização, tendo também em vista, o contexto dos outros usuários desses recursos (BRASIL-MME, 2007).

Define-se como aproveitamento hidroenergético máximo a máxima potência que pode ser explorada em uma bacia hidrográfica. As justificativas para a o aproveitamento máximo de uma bacia são descritos por Prudente (2017) como:

- O embasamento técnico existente e em desenvolvimento;
- O baixo impacto ambiental;
- Os benefícios econômicos;
- O suporte para a continuidade da matriz energética limpa;
- A proximidade da energia gerada com o centro consumidor;
- A metodologia remota de detecção e avaliação dos potenciais hidrelétricos a partir da utilização de software.

A figura 6 apresenta um esquema dos processos para a implantação de uma usina hidrelétrica, tendo em vista as orientações do Manual do Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas (BRASIL-MME, 2007).

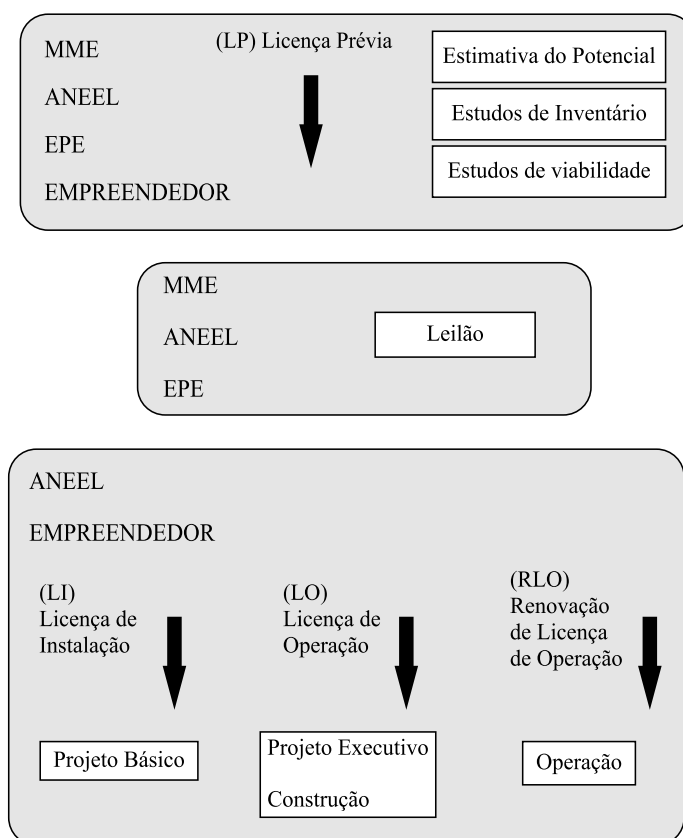


Figura 6 - Esquema do fluxo de processos para implantação de usina hidrelétrica

Fonte: Adaptado de Prudente (2017)

Esses critérios e processos para a implantação de uma usina hidrelétrica, descritos no Manual do Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas, são elencados por Prudente (2007) nas seguintes etapas:

- 1) *Estimativa do potencial hidrelétrico:* Avaliação do potencial energético de um curso d'água, realizada a partir da análise das características da bacia, principalmente em relação a topografia, hidrologia, geologia e dos recursos ambientais como um todo. Obtém-se como produto final dessas análises um mapa de possíveis locais barráveis (BRASIL-MME, 2017).
- 2) *Inventário hidroelétrico:* Análise das alternativas para a divisão de queda em uma bacia, buscando equilíbrio entre os benefícios energéticos, os custos para a implantação e os custos ambientais. Essa etapa utiliza dados secundários como dados hidrometeorológicos, energéticos e geológicos, além de dados obtidos em

campo para formar o arcabouço técnico que formará também uma parte dos estudos necessários para o licenciamento ambiental da hidrelétrica. Na fase de inventário dos potenciais hidrelétricos se vislumbra tanto as potencialidades como os impactos do aproveitamento de um rio ou de uma bacia hidrográfica (BRASIL-MME, 2007).

- 3) *Viabilidade*: Nessa etapa são realizados estudos detalhados da viabilidade técnica, energética, econômica e socioambiental para encontrar o aproveitamento ótimo do recurso hídrico. São os resultados dessa etapa que subsidiam as informações de aproveitamento ótimo necessárias ao leilão de energia e que integram o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) necessários ao licenciamento ambiental da hidrelétrica.
- 4) *Projeto Básico*: Elaboração dos *croquis* civis e eletromecânicos, inventário de máquinas e outros itens necessários para a implantação do reservatório como a implementação de programas socioambientais para minimização dos impactos de construção da usina. Nessa etapa também deve ser solicitada a Licença de Instalação (LI) e a Licença de Operação (LO).
- 5) *Enchimento do reservatório e início da operação*: Após a construção da usina a geração de energia será acompanhada para fins de monitoramento e correção.

Após decorrido o período de vigência do licenciamento estipulado na LO, deverá ser solicitada a Renovação de Licença de Operação (RLO) para atendimento dos critérios de regularidade ambiental da usina hidrelétrica.

O produto final de um inventário de geração hidrelétrica é a delimitação das melhores áreas de geração; bem como do melhor aproveitamento, incluindo requisitos e maquinário e da estimativa do custo do empreendimento.

2.4 Modelos Hidrológicos

A modelagem tem como objetivo descrever processos naturais ou não-naturais de maneira simplificada, traduzindo a realidade a partir de ferramentas matemáticas e computacionais com a finalidade de entender esses processos e conseqüentemente de prevê-los.

Os modelos são, de maneira geral, um conjunto de equações que representam quantitativamente as hipóteses utilizadas na sua construção. Essas equações são resolvidas a partir de alguns valores conhecidos ou previstos pelo modelo real e testadas a partir da comparação dos resultados do modelo com as medidas obtidas no cenário real. O modelo não tem capacidade de explicar totalmente a situação real, mas interpreta as hipóteses quantitativamente, para que se possa, a partir disso, deduzir as conseqüências e os pormenores que devem ser detalhados ou não (SODRÉ, 2007).

Ainda de acordo com Sodré (2007)   necessário que exista um arcabouo matemático suficiente para formular as hipóteses do modelo, que irão propiciar o entendimento quantitativo da realidade. Além do entendimento da resposta do mundo real, a modelagem também pode reduzir a necessidade da cria o de experimentos locais, utilizar de maneira mais eficiente os dados (que são muitas vezes de difícil obteno) e possibilitar a utilizao de dados interpolados, aproximados ou previstos.

Para Collischonn *et al.* (2014) os modelos hidrológicos podem ser definidos como a representao do comportamento físico de uma bacia hidrográfica em um dado período de tempo, através de equa es e procedimentos matemáticos.

A figura 7 apresenta um esquema das etapas de um modelo hidrológico.

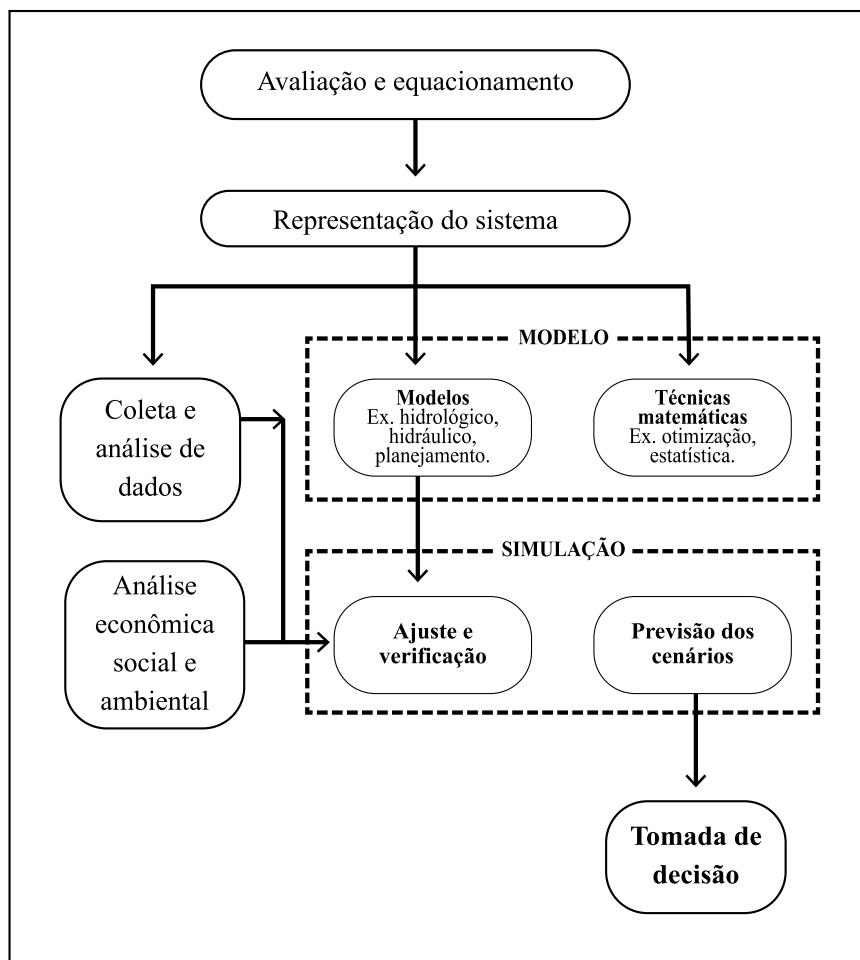


Figura 7 - Sequência de utilização de um modelo hidrológico

Fonte: Adaptado de Tucci (2005)

Em vista disso, a modelagem hidrológica tem a finalidade de representar matematicamente os fluxos de água entre o sistema hidrológico, propiciando maior entendimento sobre os fenômenos hidrológicos na área de interesse, bem como da influência desses fenômenos na geração de eventos de interesse social, como a previsão de secas e cheias, disponibilidade de água para consumo humano, balneabilidade, geração de energia, entre outros.

De acordo com Siqueira (2017) os modelos hidrológicos podem ser aplicados tanto para compreensão do regime hidrológico de uma bacia hidrográfica em diferentes cenários climáticos e de uso do solo, quanto para finalidades específicas como a previsão de vazão, as estimativas da quantidade de água no solo, taxas de sedimentação em um reservatório hidrelétrico, entre outras.

O quadro 1 apresenta diversas áreas que recebem suporte da modelagem hidrológica, bem como os modelos geralmente utilizados.

Quadro 1 - Áreas que recebem suporte da modelagem hidrológica

Área	Foco	Principais modelos
Desenvolvimento urbano	Abastecimento de água	Precipitação-vazão; Balanço de reservatório; Hidráulico da rede de condutos
	Tratamento de esgoto	Hidráulica da rede coletora; Qualidade da água de rios e reservatórios
	Drenagem urbana e controle de cheias	Precipitação-vazão; Balanço de reservatórios; Hidráulico de rios e canais; Dispositivos hidráulicos
Energia	Projeto e operação de hidrelétricas	Precipitação-vazão; Balanço dos reservatórios; Hidráulico de rios e canais; Dispositivos hidráulicos
Transporte	Navegação	Precipitação-vazão; Estimativa do calado e de operação de barragem
Controle de calamidades	Rompimento de barragens, cheias e estiagens	Hidráulicos de rompimento de barragens; Precipitação-vazão e vazão-vazão
Gerenciamento de recursos hídricos	Concessão e controle do uso da água	Precipitação-vazão; Regionalização de variáveis; Balanço e escoamento em rios
Sistema de informação	Cadastro de usuários e monitoramento	Precipitação-vazão; Estatísticos
Produção agrícola	Irrigação	Precipitação-vazão; Balanço de reservatório, Balanço agrícola e Otimização de rede de canais
Controle ambiental	Impacto de obras hidráulicas e uso de solo	Hidráulicos; Qualidade da água, Cargas difusas, Precipitação-vazão, Transporte hídrico

Fonte: Adaptado de Fayal (2008)

A bacia hidrográfica é o objeto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos, englobando as superfícies que captam e vertem água nos canais de escoamento e que desaguam em uma única saída.

A bacia pode constituir a unidade espacial para modelos agregados que consideram as propriedades médias para toda a bacia, ou então, pode ser subdividida segundo diversas abordagens a fim de considerar suas características espacialmente distribuídas. Para melhor entender os modelos hidrológicos, é necessário analisar os componentes envolvidos no ciclo hidrológico (RENNÓ; SOARES, 2000).

A principal entrada de água no sistema hidrológico ocorre pela precipitação, que pode tanto ser interceptada pela cobertura vegetal quanto atingir diretamente solo e corpos d'água. A água interceptada pela cobertura vegetal passa pelo processo de evaporação e a água que chega ao solo será em parte infiltrada e em parte escoada superficialmente. Sendo que a porção de água infiltrada será redistribuída no perfil do solo (RENNÓ; SOARES, 2000).

Rennó e Soares (2000) também definem a evapotranspiração como a somatória dos processos de evaporação da água da superfície e de transpiração das folhas das plantas. E apontam que outros processos mais específicos como perda de água por drenagem profunda, fluxo ascendente de água no solo e fluxo lateral subsuperficial também podem ocorrer.

Segundo Tucci e Braga (2003) os processos hidrológicos possuem dois fluxos principais: O fluxo vertical, representado pelos processos de precipitação, evapotranspiração, umidade e fluxo no solo; e o fluxo longitudinal, representado pelo escoamento superficial, escoamento dos rios e escoamento subterrâneo. O balanço na bacia depende inicialmente dos processos verticais e, geralmente, esse balanço é positivo devido a diferença entre precipitação e evaporação, o que resulta nas vazões dos rios (TUCCI; BRAGA, 2003).

A Figura 8 mostra os componentes do ciclo da água que são simulados na modelagem hidrológica.

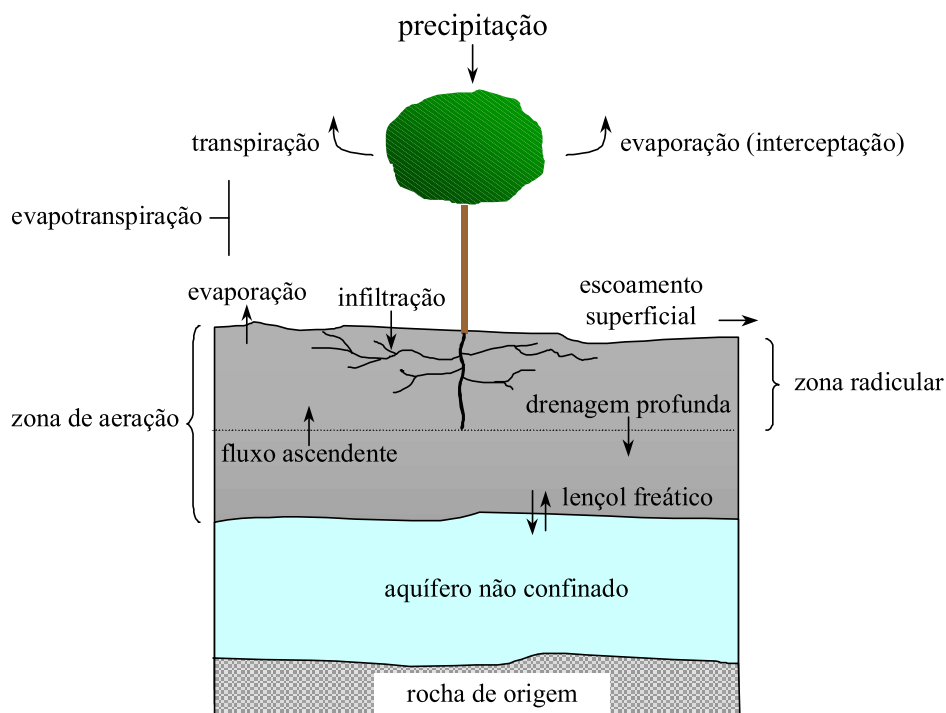


Figura 8 – Componentes do ciclo da água simulados na modelagem hidrológica

Fonte: Rennó, Soares (2000)

Ainda segundo Tucci e Braga (2003) a relação entre as variáveis de entrada e saída dos sistemas hidrológicos possui comportamento não-linear devido as diferentes características do sistema físico. Em geral a precipitação, sua distribuição temporal e espacial, são as principais variáveis de influência, já a evaporação apresenta menor variabilidade e efeito regional. Por isso a alteração da precipitação apresenta um efeito maior na vazão da bacia hidrográfica.

Como os fenômenos do ciclo hidrológico são complexos e dependem de um grande número de fatores, os modelos hidrológicos também se tornam sistemas de análise complexa. De forma que, quanto mais complexos esses sistemas, mais desafiadores e importantes se tornem os modelos (TUCCI, 2005).

A figura 9 apresenta um esquema das relações entre os diferentes processos hidrológicos no modelo.

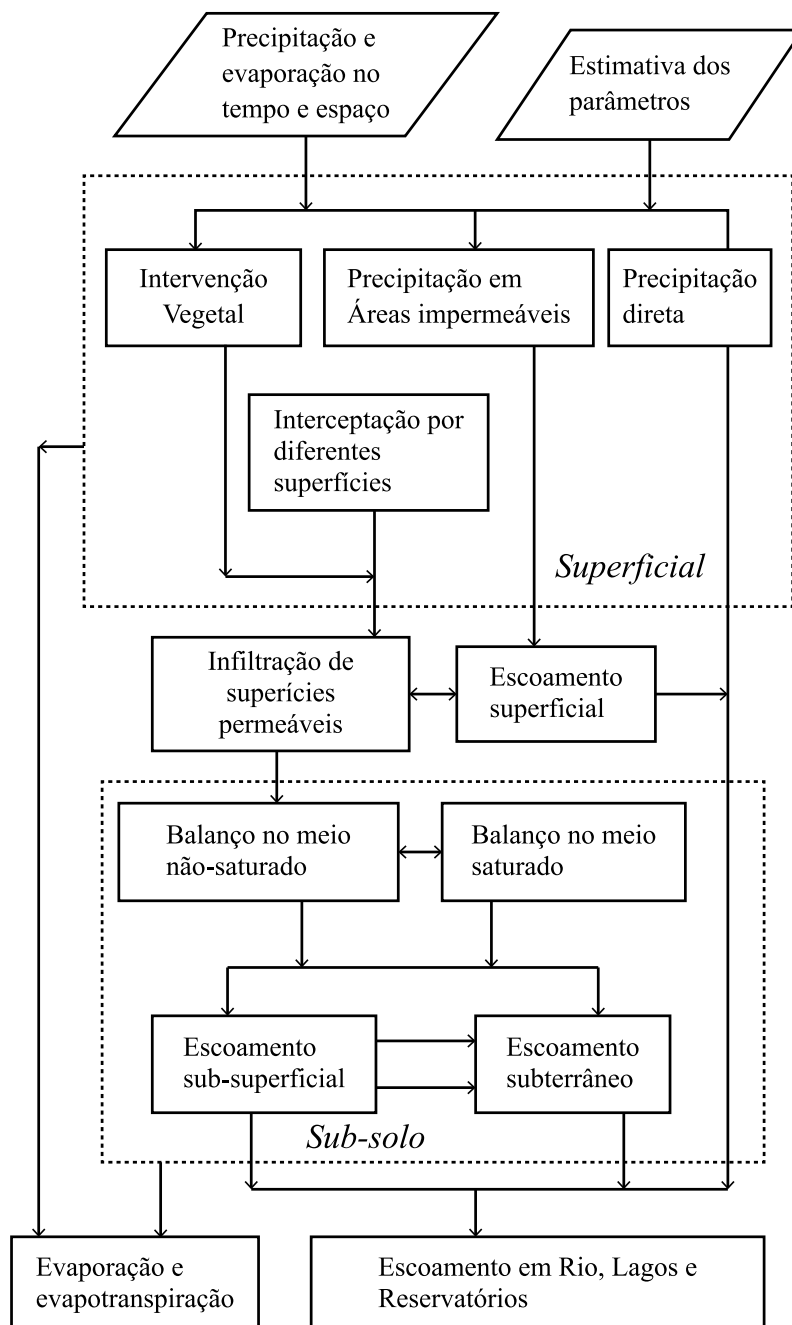


Figura 9 - Esquema das relações dos diferentes processos hidrológicos em um modelo

Fonte: Tucci (2005)

O tempo para que toda a água presente em uma bacia hidrográfica seja renovada pode ser definido como o balanço hídrico de longo termo. O número de intervalos de tempo que corresponde ao balanço hídrico de longo termo serve para indicar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica a longo prazo (OLIVEIRA; FAN; PETRY, 2021).

2.4.1 Classificação dos Modelos Hidrológicos

De acordo com Tucci e Braga (2003) os modelos hidrológicos de previsão podem ser organizados de acordo com certas características destes e das bacias hidrográficas, quanto:

- *Ao sistema simulado*: Classificando-os em modelos de propagação que simulam somente rios e utilizam apenas níveis e vazões dentro de um rio principal ou afluente; modelos de precipitação-vazão que realizam a simulação através de dados de precipitação; modelos de precipitação-vazão com propagação em rios, que simulam tanto os rios quanto as sub-bacias.
- *A utilização*: Classificando-os em adaptativos quando atualizam os valores dos parâmetros e das variáveis de estado durante a previsão e como modelos de parâmetros fixos quando não atualizam os valores dos parâmetros e variáveis de estado durante a previsão.
- *Aos objetivos*: Classificando-os em modelos de previsão contínua, como os modelos de operação de hidrelétricas ou navegação, que simulam períodos secos e de estiagem, e em modelos de previsão de períodos específicos quando a rapidez e a precisão são importantes na confiabilidade do sistema.
- *Ao uso*: São classificados em fase de ajuste off-line quando os parâmetros são determinados por ajuste utilizando dados históricos representativos e fase online quando o modelo é utilizado para previsão e ajustado em tempo real.
- *Ao tipo de modelo*: Os modelos hidrológicos podem ser classificados de acordo com diferentes aspectos, como memória, linearidade, continuidade e distribuição.

Devido a importância e a maior utilização da classificação em relação ao tipo de modelo, cabe detalhar brevemente as classificações existentes. Entre as classificações mais importantes estão a característica estocástica ou determinística de um modelo. Um modelo é dito estocástico quando a probabilidade de ocorrência de uma variável integra

o modelo, dessa forma o modelo contém deduções probabilísticas e possui saída estatística. Já os modelos determinísticos são aqueles em que as probabilidades associadas aos eventos do modelo não são utilizadas (TUCCI, 2005).

Outra classificação desses modelos os diferencia em conceituais e empíricos. O empirismo filosófico afirma que o conhecimento somente vem da experiência, da mesma forma um modelo empírico é aquele onde a observação de um fenômeno provê dados que são ajustados em uma equação que representa o fenômeno. Devido a esse fato os modelos empíricos também são chamados de modelos “caixa-preta”. Em contrapartida os modelos conceituais trazem como base a aplicação de conceitos físicos na sua formulação.

A classificação dos modelos em concentrados ou distribuídos é apresentada por Rennó e Soares (2000) da seguinte forma: Nos modelos concentrados, considera-se que todas as variáveis de entrada e de saída são representativas para a área analisada. Já nos modelos distribuídos considera-se a variabilidade espacial das variáveis do modelo, sendo que, em modelos distribuídos mais realistas é considerada também a existência de uma relação espacial entre elementos vizinhos, chamada de relação topológica.

Por fim, a classificação da dinâmica dos modelos os classifica em estáticos, quando são produzidos resultados que refletem as condições de um intervalo de tempo, e em dinâmicos, quando utilizam uma descrição das variáveis em função do tempo, de forma que o resultado de cada passo de tempo alimente a próxima iteração. O quadro 2 apresenta sucintamente as classificações dos modelos hidrológicos.

Quadro 2 - Classificações dos modelos hidrológicos

Estocásticos	Determinísticos
Pelo menos uma variável possui comportamento aleatório	Cada valor de entrada resulta em um único valor de saída
Conceituais	Empíricos
Utilizam equações físicas para descrever o sistema	Utilizam relações baseadas em observações
Concentrados	Distribuídos
Utiliza valores médios para toda área da bacia	Considera a variabilidade espacial das variáveis hidrológicas

Estáticos	Dinâmico
Descreve o fenômeno hidrológico em um determinado momento	As variáveis são descritas em função do tempo
Discretos	Contínuos
Modelagem em períodos isolados da série hidrológica	Representa longos períodos da série hidrológica

Fonte: Adaptado de Marinho Filho *et al.* (2012)

De acordo com Lucena (2010) modelos hidrológicos físicos demandam uma quantidade maior de dados por serem baseados em medições ao invés de parâmetros estimados. Isso faz com que esse tipo de modelo possa ser aplicado a poucos casos de empreendimentos hidrelétricos, como aqueles de pequeno porte e em áreas de captação pouco extensas. Já em sistemas maiores, como em bacias hidrográficas de grande porte por exemplo, a aplicação de modelos hidrológicos físicos se torna mais complexa e os modelos conceituais ou estatísticos acabam sendo mais utilizados.

Para que a modelagem hidrológica tenha sucesso é necessário entender características dos componentes hidrológicos na bacia, bem como as características específicas da área em questão. Isso proporcionará um ajuste adequado do modelo para as condições reais e, conseqüentemente, melhorará os resultados do modelo e a sua eficiência em prever os eventos de interesse.

Lucena (2010) também aponta que a escolha do tipo de modelo utilizado, bem como o seu detalhamento, dependerá diretamente do objetivo do estudo, da capacidade computacional disponível e também da disponibilidade de dados. Dessa forma, não existe um modelo ideal e sim aquele que melhor se adequa a situação (RENNÓ; SOARES, 2000).

As simulações hidrológicas são limitadas pela heterogeneidade das características físicas da bacia e da complexidade dos processos envolvidos, por isso um grande número de modelos hidrológicos tem sido desenvolvidos com a finalidade de atender as mais diversas necessidades (TUCCI, 2005).

De acordo com Fayal (2008) os modelos hidrológicos mostraram um desenvolvimento importante nos últimos 50 anos, devido principalmente a utilização dos computadores. Na década de 60 a modelagem hidrológica foi evoluindo com a utilização de novas técnicas de distribuição espacial, otimização e simplificação. Na década de 70 foram desenvolvidos tanto modelos mais simplificados com menores números de parâmetros e funções, quanto modelos de maior base física que buscavam estabelecer relações entre as características físicas do sistema e os parâmetros utilizados. Nas últimas décadas houve desenvolvimento de modelos hidrológicos em duas vertentes, a primeira focada em modelos para pequenas bacias, e a segunda vertente focada em modelos para grandes bacias.

Devido a quantidade de dados necessários para as simulações hidrológicas e as variações espaciais desses dados, diversos modelos hidrológicos têm utilizado dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para facilitar a manipulação dos dados e gerar produtos mais intuitivos.

2.4.2 Modelos de Precipitação-Vazão

Os modelos hidrológicos de precipitação-vazão ou de chuva-vazão, são aqueles que estimam o deflúvio em um sistema de drenagem que foi gerado por um evento de chuva, buscando simular as etapas do ciclo hidrológico desde a precipitação até o escoamento em um ponto (KAISER, 2006). De acordo com Tucci (2005) esses modelos surgiram a partir da escassez de séries de dados de vazões longas e representativas e da necessidade desses dados para subsidiar diversos tipos de projetos relacionados a recursos hídricos. Devido às modificações geradas por obras hidráulicas e pelas mudanças no uso do solo nas bacias, as séries de vazões deixaram de ser homogêneas ou estacionárias, sendo necessário utilizar as séries de precipitação, que são naturalmente mais longas que as séries de vazão, para estimar novos cenários de vazão ou encontrar vazões desconhecidas.

Tucci (2005) também elenca os elementos que compõe a estrutura dos modelos hidrológicos de chuva-vazão:

- *Discretização da bacia:* Critérios de subdivisão espacial utilizados para representar a bacia. Pode ser feita pelo método concentrado, quando toda a bacia é representada por um valor de precipitação média, pelo método distribuído por sub-bacias quando é realizada a subdivisão da bacia em sub-bacias de acordo com a drenagem principal dessa bacia, sendo os parâmetros e a precipitação dados como uniformes em cada sub-bacia. Já o método de distribuição por módulos utiliza as formas geométricas que mais se ajustam ao formato da bacia, caracterizando em menores dimensões os componentes dos processos.
- *Variáveis temporais de entrada:* Que são a precipitação (principal variável), a evapotranspiração (geralmente estimada) e a vazão que será utilizada para ajustar os parâmetros do modelo de precipitação-vazão.
- *Estrutura básica dos processos:* Geralmente dividida em bacia e canal. A componente bacia simula o balanço vertical dos fluxos e o escoamento na sub-bacia, já o componente canal simula o escoamento e a propagação da vazão de montante no rio, recebendo também as contribuições dos módulos da bacia.
- *Aquisição de dados físicos das bacias:* Devido à grande quantidade de dados físicos são utilizados SIG como parte da estrutura de entrada de alguns modelos.
- *Determinação de parâmetros:* Os parâmetros podem ser estimados a partir das características físicas, dados observados ou otimização.

De acordo com Kaiser (2006) existem diversos tipos de modelo de chuva-vazão, desde os mais simplificados como o método racional que estima vazão em pequenas bacias até modelos mais sofisticados com entradas distribuídas e que consideram a variabilidade espacial e temporal. Dessa forma quanto maior o nível de entendimento do fenômeno e mais próximo da realidade, mas complexo o modelo será.

2.5 Mudanças Climáticas

O IPCC define mudança climática como o fenômeno das alterações do clima ocorridas ao longo do tempo devido à variabilidade natural ou decorrente da atividade humana (IPCC, 2021b). Essa alteração climática é causada pelo aquecimento global, que, por sua vez, se origina do efeito estufa intensificado pelas emissões de GEE de origem antrópica.

Os termos efeito estufa, aquecimento global e mudanças climáticas são utilizados muitas vezes como sinônimos. No entanto, esses termos nomeiam fenômenos distintos que apresentam uma relação. Para um correto entendimento desses fenômenos e das implicações e relações entre eles cabe detalhá-los brevemente.

O *efeito estufa* é o nome dado ao processo de elevação da temperatura na atmosfera devido a presença de determinados gases, os GEE. Esses gases funcionam como o vidro de uma estufa, deixando passar a radiação de onda curta vinda do sol e formando um anteparo ao escape da radiação de onda longa emitida pela Terra, possibilitando assim a remissão dessa radiação de onda longa nos dois sentidos, para baixo e para cima. A parte reemitida para baixo será absorvida pela superfície e reemitida para a atmosfera, onde o processo se repete. De forma com que haja um "aprisionamento" de energia e uma alteração no balanço de energia no sistema climático (MARQUES, 1992).

De acordo com Molion (2007) o efeito estufa faz com que a temperatura média global do ar próximo à superfície seja cerca de 15°C. Sem a ocorrência desse efeito a temperatura global do ar próximo à superfície seria de -18°C. Ou seja, o efeito estufa promove um aumento de 33°C na temperatura do ar próximo à superfície terrestre. O *efeito estufa* é um efeito natural e um fator determinante para a existência de vida na terra. O problema climático relacionado ao efeito estufa ocorre devido a sua intensificação, causada pelo aumento da concentração dos GEE na atmosfera.

As concentrações de gases de efeito estufa como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) na atmosfera aumentaram a partir da revolução

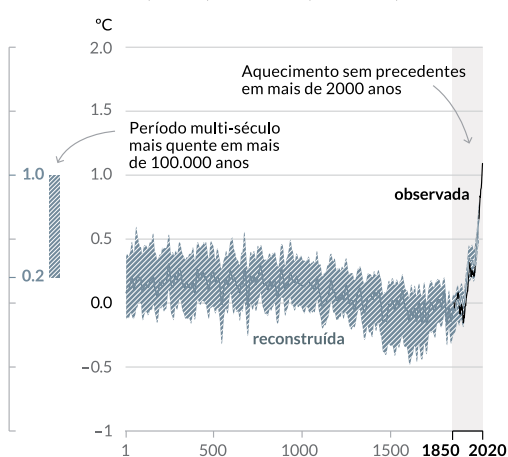
industrial e continuam aumentando até hoje. O aumento da concentração de CO₂ se deve principalmente ao uso de combustíveis fósseis e à mudança no uso da terra, já os aumentos de CH₄ e N₂O na atmosfera estão associados às atividades agropecuárias (IPCC, 2014).

Segundo dados do AR6 do IPCC (2021b) cerca de 2,4 trilhões de toneladas de CO₂ foram emitidos desde o período pré-industrial até hoje, sendo 58% emitidos entre 1850 e 1989 e 42% entre 1990 e 2019. As medições de concentração dos GEE em 2019 atingiram médias anuais de 410 partes por milhão (ppm) de CO₂, 1866 partes por bilhão (ppb) para CH₄ e 332 ppb para N₂O em 2019.

O fenômeno de incremento da temperatura ocasionado pela intensificação do efeito estufa é chamado de *aquecimento global*. De acordo com o IPCC existe uma alta confiabilidade de que esse aquecimento tenha sido causado pelas atividades antrópicas (IPCC, 2021a). A figura 10 mostra a comparação entre a temperatura relativa da superfície terrestre observada e simulada nos últimos 200 anos.

Mudanças na temperatura superficial global relativas a 1850 - 1900

(a) Mudança na temperatura da superfície global (média decadal) como *reconstruída* (1-2000) e *observada* (1850-2020)



(b) Mudança na temperatura da superfície global (média anual) como *observada* e simulada usando fatores *humanos & naturais* e *apenas naturais* (ambos 1850-2020)

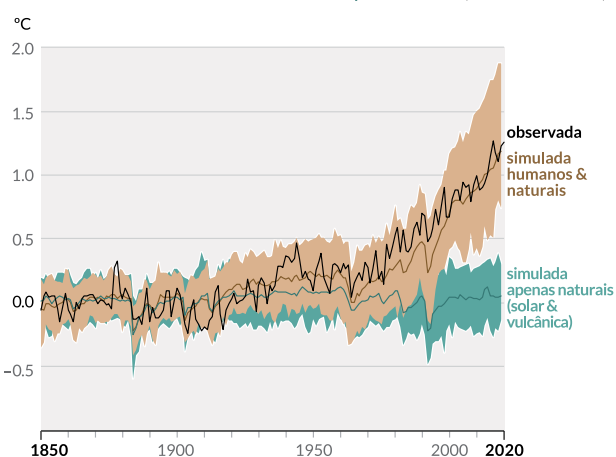


Figura 10 - Mudanças na temperatura relativa da superfície global entre 1850 e 1900

Fonte: IPCC (2021)

O acréscimo de 1 ou 2 graus na temperatura pode parecer uma alteração insignificante, no entanto, um aumento de temperatura dessa magnitude altera

profundamente o funcionamento do sistema climático. Cada meio grau faz uma grande diferença em termos de alterações climáticas (ROCHA; 2021).

Como o sistema climático depende basicamente do balanço de energia e é sensível às variações de temperatura, as mudanças nos padrões dessa variável ocasionadas pelo aquecimento global provocam efeitos diversos no sistema climático, as *mudanças climáticas*.

É consenso entre a comunidade científica que as grandes variações dessas mudanças são causadas inequivocamente pelas atividades humanas. De acordo com o AR6 do IPCC as mudanças recentes são rápidas, intensas e sem precedentes. E a cada incremento de aquecimento, essas mudanças no clima se tornarão maiores, implicando em alterações irreversíveis (IPCC, 2021a).

2.5.1 O IPCC

O *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, foi criado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) para desenvolver trabalhos científicos relacionados a avaliações do clima e aos possíveis cenários futuros de mudanças climáticas (MARENGO, 2008).

O IPCC utiliza critérios rígidos para garantir a credibilidade dos resultados e possui três grupos de trabalho. O Grupo I é responsável pela base da ciência física, ou seja, pela análise de aspectos científicos do sistema climático e das mudanças climáticas. O Grupo II é encarregado do setor de impactos, adaptação e vulnerabilidade; e elabora os conteúdos referentes aos efeitos das mudanças climáticas sobre meio ambiente e sociedade. Já o Grupo 3 discorre sobre métodos de adaptação e mitigação das mudanças climáticas no segmento mitigação da mudança do clima.

Os relatórios do IPCC são considerados a referência em pesquisa climática, pois fornecem periodicamente uma revisão atualizada de todas as informações e estudos feitos em áreas relacionadas às mudanças climáticas, como clima, oceanografia, ecologia, entre

outras ciências. O que faz desses relatórios um compêndio de informações extremamente úteis para a comunidade científica, público em geral, promotores de políticas públicas e tomadores de decisão (MARENGO; SOARES, 2003). De acordo com as informações do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), desde a década de 90 o IPCC produz relatórios referentes às mudanças climáticas. O quadro 3 apresenta os relatórios já publicados pelo IPCC de acordo com os dados do MCTI (2022).

Quadro 3 – Relatórios e produções do IPCC

Ciclo de Avaliação	Produções	Publicação
Primeiro Ciclo de Avaliação (AR1)	Estratégias de Resposta	Out/1990
	Avaliação de Impactos da Mudança do Clima	Jun/1990
	Avaliação Científica da Mudança do Clima	Jun/1990
	Síntese	Mar/1990
Segundo Ciclo de Avaliação (AR2)	Relatório Completo da Segunda Avaliação	Jun/1996
	Relatório de Síntese	Out/1995
	Dimensões Sociais e Econômicas da Mudança do Clima	Jul/1995
	Impactos, Adaptações e Mitigação da Mudança do Clima: Análises Técnico-Científicas	Jul/1995
	A Ciência da Mudança do Clima	Fev/1995
	Diretrizes Revisadas para Inventários de GEE	Mai/1996
	Forçante Radiativa da Mudança do Clima	Mar/1994
	Diretrizes Técnicas para Avaliação dos Impactos da Mudança do Clima e Adaptações	Mar/1994
	Relatório Suplementar da Avaliação Científica	Jun/1992
	Relatório Suplementar da Avaliação dos Impactos	Jun/1992
	Avaliações de 1990 e de 1992	abril 1992
Terceiro Ciclo de Avaliação (TAR)	Relatório de Síntese	Out/2001
	Mitigação	Jul/2001
	Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade	Mai/2001
	A Base Científica	Jan/2001
	Questões Metodológicas e Tecnológicas da Transferência de Tecnologia	Mar/2000

	Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Silvicultura	Mar/2000
	Cenários de Emissões	Mar/2000
	Aviação e a Atmosfera Global	Mar/1999
	Impactos Regionais da Mudança do Clima: Uma Avaliação da Vulnerabilidade	Mar/1997
Quarto Ciclo de Avaliação (AR4):	Relatório de Síntese	Set/2007
	Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade	Jul/2007
	A Base da Ciência Física	Jun/2007
	Mitigação da Mudança do Clima	Jun/2007
	Diretrizes para Inventários de GEE	Mai/2006
	Salvaguardando a camada de ozônio e o sistema climático global	Mar/2005
	Captura e Armazenamento de Dióxido de Carbono	Mar/2005
Quinto Ciclo de Avaliação (AR5)	Mudança do Clima	Out/2014
	Mitigação da Mudança do Clima	Abr/2014
	Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade	Mar/2014
	A Base da Ciência Física	Set/2013
	Gerenciando os riscos de eventos extremos e desastres para promover a adaptação à mudança do clima	Mar/2012
	Fontes Renováveis de Energia e Mitigação da Mudança do Clima	Abr/2011
Sexto Ciclo de Avaliação (AR6)	Relatório de Síntese	Jun/2022
	Mitigação da Mudança do Clima	Jul/2021
	A Base da Ciência Física	Abr/2021
	Refinamento das Diretrizes 2006 para Inventários Nacionais de GEE	Mai/2019
	Relatório de Metodologia sobre forçantes Climáticas de Vida-Curta das Reuniões de Especialistas AFOLU & Setores de Resíduos	Out e Dez/2020
	Aquecimento global de 1,5°C	Out/2018
	Mudança do clima e terra	Ago/2019
	O Oceano e a criosfera em um clima em Mudança	Set/2019

Fonte: Elaborado pela autora

2.5.2 O Sexto Relatório AR6 do IPCC

O sexto relatório do IPCC (2021b), AR6 do IPCC, afirma que é inequívoco que a influência humana causou o aquecimento da atmosfera, do oceano e da terra. E que as emissões de CO₂ causadas pelo homem são o principal motor da atual crise global. Entre os principais apontamentos desse relatório, estão os seguintes:

- Cada uma das últimas quatro décadas foi sucessivamente a mais quente do que qualquer década anterior desde 1850. Os estudos analisados mostram que houve um acréscimo de 0,99°C na temperatura global da superfície nas duas primeiras décadas do século 21 em comparação ao período de 1850–1900;
- É provável que GEE tenham contribuído para um aquecimento de 1,0°C a 2,0°C, além disso outros componentes como os aerossóis contribuíram com um resfriamento de 0,0°C a 0,8°C. O que indica que a contribuição dos aerossóis pode estar mascarando o aquecimento global, de certa forma;
- Os países mais pobres e principais vítimas das mudanças do clima foram responsáveis por menos de 4% das emissões de 2019;
- Houve recuo global das geleiras desde a década de 1990 e uma diminuição da área de gelo marinho do Ártico em 2010–2019 em comparação com 1979–1988;
- É praticamente certo que o oceano aqueceu desde a década de 1970 e é extremamente provável que o homem foi a causa dessa alteração;
- Entre as mudanças do sistema climático devido ao aquecimento global estão: aumento na frequência e intensidade de extremos de calor, ondas de calor marinhas, precipitação intensa, secas agrícolas e ecológicas, aumento na proporção de tempestades tropicais e ciclones, redução da cobertura de neve e do *permafrost*, uma camada do subsolo da crosta terrestre que está permanentemente congelada;

- Os extremos de calor (incluindo ondas de calor) se tornaram mais frequentes e intensos, em contrapartida os extremos de frio (incluindo ondas de frio) tornaram-se menos frequentes e menos severos;
- É previsto que a proporção de ciclones tropicais intensos (categoria 4-5) aumente e que as velocidades do vento dos ciclones tropicais aumentem em escala global devido ao aquecimento global.

Entre as consequências mais importantes do aquecimento global está o aumento do nível do mar, uma alteração sem precedentes e de caráter irreversível. Mesmo que as emissões zerassem hoje o nível do mar ainda continuaria a subir por pelo menos alguns séculos ou milênios, devido ao tempo que o calor leva para ser absorvido e dissipado no oceano (ROCHA, 2021).

O AR6 mostra que todos os componentes do ciclo hidrológico sofreram alterações devido às mudanças climáticas nas últimas décadas. E aponta que essas alterações estão afetando sociedades e ecossistemas em todo mundo. Centenas de milhões de pessoas já estão passando regularmente por condições hidrológicas nunca antes enfrentadas. Dentre as mudanças associadas ao ciclo hidrológico em decorrência das mudanças climáticas apresentadas no AR6 do IPCC (2021b), estão:

- Diminuição da transpiração das plantas, afetando a umidade do solo, escoamento, o retorno da umidade à atmosfera e a temperatura da superfície;
- Alteração da permeabilidade da superfície terrestre;
- Mudança no escoamento e nas vazões dos recursos hídricos;
- Mudança nos padrões de precipitação em escalas global e regional. A precipitação média anual está aumentando em muitas regiões e diminuindo em um menor número de regiões;

- Aumento da frequência e da intensidade de eventos de precipitação intensa. Na escala global, os eventos diários extremos de precipitação devem se intensificar em cerca de 7% para cada 1°C de temperatura global.

De maneira geral, é previsto que a precipitação média anual aumente ou diminua em até 40% ou mais num cenário de 4°C de aquecimento global em muitas áreas terrestres. Existem projeções muito variadas em relação a períodos de seca, no entanto essas projeções aumentam em cenários de maior aquecimento (IPCC, 2021b).

De acordo com Marengo (2008) as mudanças climáticas representam um grande risco para os recursos hídricos no Brasil. As regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste são regiões altamente vulneráveis às mudanças climáticas devido a natural presença ou ausência de água. Já na Amazônia, os problemas são mais associados a possível perda de biodiversidade e aos impactos no ciclo hidrológico. As simulações a partir do cenário de altas emissões de GEE mostram que as chuvas na Amazônia e no Nordeste podem diminuir em até 20% no final do século XXI.

Em seu estudo sobre o futuro climático de Minas Gerais, Reboita *et al.* (2018) gerou projeções com o *Regional Climate Model Version 4* (RegCM4) a partir do cenário RCP8.5 para o período de 2070-2095. Entre os resultados obtidos estão o aumento da temperatura do ar em todo o estado em até 5° C; o aumento do total sazonal da precipitação no verão e redução no inverno; o aumento do volume de chuva nos eventos extremos de precipitação, exceto no inverno e a redução do número de dias úmidos entre o outono e a primavera e o aumento do número de dias secos consecutivos em todas as estações do ano.

2.5.3 Cenários de Mudanças Climáticas

Os cenários de emissões são enredos desenvolvidos para representar as possíveis emissões de GEE e as mudanças climáticas ocasionadas pela ocorrência de cada um desses cenários. De acordo com as definições do IPCC (2021a) os 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.

Esses cenários são baseados em *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) e são úteis para desenvolver projeções dos impactos nas mudanças climáticas e para analisar políticas voltadas para o clima, fornecendo um panorama das potenciais consequências de cada grupo de possibilidades. Os cenários também podem ser usados para apoiar o gerenciamento de risco e identificar políticas robustas e adaptáveis sob condições de profunda incerteza.

No AR6 o IPCC apresentou 5 novos cenários do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) em tradução livre Projeto de Intercomparação de Modelos Climáticos. Esses cenários foram projetados para o período de 2015 a 2100 e utilizaram modelos climáticos mais sofisticados para preencher lacunas das últimas publicações. Cabe ressaltar que em todos os cenários o aquecimento global continuará por pelo menos algumas décadas.

Dos 5 cenários do AR6, 2 apresentam prognósticos mais otimistas (SSP1-1.9 e SSP1-2.6), 1 apresenta prognóstico intermediário (SSP2-4.5) e 2 apresentam prognósticos mais pessimistas (SSP3-7.0 e SSP5-8.5). A seguir são abordadas as principais características de cada cenário, do mais otimista para o mais pessimista.

- SSP1-1.9 – É o cenário mais otimista e o único que atende o objetivo do Acordo de Paris de manter o aquecimento global em até 1,5° acima das temperaturas pré-revolução industrial. Nesse cenário o aquecimento chega a cair para 1,4° até o final do século e as emissões de CO₂ chegam a 0 em 2050. A sociedade está organizada para o bem-estar geral ao invés do desenvolvimento econômico, os princípios sustentáveis são amplamente aplicados, com investimentos na saúde e na educação e diminuição na desigualdade. Eventos extremos climáticos são comuns, mas considera-se que os piores impactos das mudanças climáticas foram evitados.

De acordo com Rocha (2021) nesse cenário se cumprem medidas para remover o excesso de carbono da atmosfera, como o plantio de árvores em todo o planeta, de forma que a sociedade remova mais carbono da atmosfera do que acrescenta.

- SSP1-2.6 - No segundo cenário mais otimista as emissões chegam a 0 somente após 2050. As mudanças socioeconômicas e o direcionamento sustentável são semelhantes ao cenário SSP-1.9 e o aquecimento global se estabiliza em 1,8° acima das temperaturas pré-revolução industrial até o final do século.
- SSP2-4.5 – Cenário de média emissão onde as emissões de CO₂ estão nos níveis atuais e caem a partir do meio do século, no entanto não chegam a 0 em 2100. Em relação aos fatores socioeconômicos a tendência histórica é mantida e não surgem mudanças, há pouco engajamento em relação a sustentabilidade e a igualdade social. Nesse cenário o aquecimento global chega a 2,7° acima dos limites pré-revolução industrial.
- SSP3-7.0 – No segundo pior cenário as emissões e o aquecimento global continuariam aumentando de forma constante. Sendo que até o final do século as emissões de CO₂ dobram em relação aos níveis atuais e o acréscimo às temperaturas pré-revolução industrial chega a 3,6°. Nesse cenário existe um ambiente de competição entre os países, com tendência de aumento da segurança nacional e de medidas de garantia de suprimento de alimentos em cada país.
- 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 combustível fóssil e grandes aportes de energia.

A tabela 1 traz as estimativas para o aquecimento global em todos os cenários apresentados no AR6 para os intervalos de curto, médio e longo prazo.

Tabela 1- Acréscimos da temperatura global em casa cenário do AR6

Cenário	Curto prazo (2021 – 2014)		Médio prazo (2041 – 2060)		Longo prazo (2081 – 2100)	
	Melhor estimativa (°C)	Intervalo mais provável (°C)	Melhor estimativa (°C)	Intervalo mais provável (°C)	Melhor estimativa (°C)	Intervalo mais provável (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 a 1.7	1.6	1.2 a 2.0	1.4	1.0 a 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 a 1.8	1.7	1.3 a 2.2	1.8	1.3 a 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 a 1.8	2.0	1.6 a 2.5	2.7	2.1 a 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 a 1.8	2.1	1.7 a 2.6	3.6	2.8 a 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 a 1.9	2.4	1.9 a 3.0	4.4	3.3 a 5.7

Fonte: Adaptado de IPCC (2021)

Segundo o AR6 do IPCC a temperatura da superfície global continuará aumentando até pelo menos meados do século em todos os cenários de emissões. O aquecimento global de 1,5°C e 2°C será excedido durante o século XXI, a menos que reduções intensas nas emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa ocorram nas próximas décadas (IPCC, 2021a).

De acordo com Rocha (2021) dos novos cenários apresentados no AR6 do IPCC o que melhor representa a situação do planeta é o SSP3-7.0, o segundo pior cenário. O que implicaria em mudanças climáticas intensas e potencialmente catastróficas, tanto para os seres humanos como para todos os ecossistemas.

Não podemos estabelecer qual cenário é o mais provável devido a diversidade de fatores envolvidos, no entanto, fica claro que a grandeza dos impactos dependerá principalmente de qual caminho a sociedade decidirá seguir.

2.5.4 Impacto das Mudanças Climáticas no Setor Energético

De acordo com Lucena (2010), sistemas energéticos estão sujeitos a impactos decorrentes das alterações do clima, tanto na produção de energia, em suas diversas formas, quanto no seu consumo. Fontes renováveis são especialmente relevantes nesse

sentido, uma vez que possuem alta dependência dos recursos naturais (SCHAEFFER R. *et al.*, 2012).

Ward (2013) elenca em seu estudo diversos aspectos relacionados aos eventos climáticos extremos que possuem acentuada influência na confiabilidade e operação do sistema elétrico, sendo elas:

- Limite da capacidade de transferência de linhas de transmissão e aumento de perdas da energia, relacionadas às altas temperaturas e ondas de calor;
- Perigo potencial aos equipamentos de subestações relacionado a chuvas e inundações;
- Perda de eficiência das usinas termelétricas relacionada ao aumento da temperatura ambiente;
- Influência sofrida pelo setor de energia hidrelétrica relacionada aos padrões de precipitação;
- Influência sofrida pelas usinas térmicas e nucleares relacionada aos períodos de estiagem.

Grande parte da produção científica sobre relação entre mudanças climáticas e energia está orientada para o papel da energia como principal fonte de emissão de GEE e em alternativas de mitigação dessas emissões. No entanto, as condições climáticas afetam diversas frentes do setor energético, como a demanda por energia e o planejamento da operação e expansão de sistemas energéticos por exemplo (LUCENA, 2010).

Devido à grande participação das energias renováveis na matriz elétrica brasileira a adaptação ao cenário de ocorrência das mudanças climáticas deverá ocorrer em algum grau, no entanto ainda resta estabelecer as melhores soluções para contornar os problemas que poderão surgir. Por isso, é necessário que o sistema energético brasileiro se prepare para as vulnerabilidades decorrentes dos impactos das mudanças climáticas na

distribuição dos recursos renováveis e na oferta de energia, tanto na infraestrutura energética existente quanto na futura infraestrutura energética (EPE, 2018).

O PDE 2031 compilou um capítulo inteiramente dedicado a energia e as mudanças no clima. Nesse capítulo, foram relatadas diversas informações relacionadas aos planos setoriais e políticas públicas para mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Para o PDE 2032 as informações relacionadas às mudanças climáticas também estão sendo consideradas.

A nota técnica de Energia e Meio Ambiente do PDE 2032 aponta que as questões climáticas estão se tornando cada vez mais importantes para a expansão energética. No Brasil, devido a renovabilidade da matriz energética, existe um cenário tanto de vulnerabilidade, relacionada principalmente à dependência dos recursos hídricos, quanto a um panorama atual de baixas emissões (NT EPE/DEA/SMA/018/2022 apud SEEG, 2022).

O documento ainda complementa que é necessário investir na transição energética e em medidas de mitigação e adaptação para o fomento de um sistema energético mais resiliente e seguro. Entre os desafios socioambientais estratégicos elencados na supracitada nota técnica estão a mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Já no item de oportunidades ambientais e estratégias, um dos pontos salientados é a otimização de recursos e infraestrutura (NT EPE/DEA/SMA/018/2022). Esses itens são detalhados brevemente abaixo.

- Em relação à adaptação das mudanças climáticas, ressalta-se que o Brasil enfrenta o desafio de se adaptar a essas mudanças no clima já observadas e de se preparar para as mudanças que irão advir dos possíveis cenários de aquecimento global. Além disso aponta-se que os impactos das mudanças climáticas ao sistema energético, como aumento da temperatura média e diminuição da precipitação, de forma isolada ou combinada amplificam as vulnerabilidades e diminuem a eficiência das fontes energéticas, afetando de formas distintas a população, devido ao contexto da desigualdade socioeconômica.

- Como o sistema energético está interconectado com diversos setores da sociedade, são necessárias tanto ações de adaptação para proteger os ativos, quanto o desenvolvimento de estratégias inovadoras, que considerem as ameaças e o potencial de contribuição dos sistemas energéticos para a redução das vulnerabilidades dos outros setores. Dessa forma, existe uma tendência por parte do setor energético de direcionar cada vez mais esforços no desenvolvimento de novas tecnologias para mitigação e adaptação as mudanças do clima.
- Em relação a otimização de recursos e infraestrutura o documento define que os empreendimentos de produção, geração e transporte de energia já instalados podem ser otimizados, para que contribuam num melhor aproveitamento energético e na minimização dos impactos ao meio ambiente. Entre as opções para essa finalidade, são citadas a repotenciação, ou seja, o ganho de potência e a modernização de usinas hidrelétricas, a reativação ou repotenciação de PCHs e a hibridização das fontes de empreendimentos já existentes.

O PNE também inclui a temática das mudanças climáticas e seus prospectos na sua versão para 2050. E elenca que entre os desafios para o tomador de decisão no setor energético estão as incertezas sobre o efeito das mudanças climáticas na oferta de energia e a garantia da segurança de abastecimento em eventos extremos relacionados às mudanças climáticas. Para o enfrentamento desses desafios, o documento traz as seguintes recomendações: Aprimorar e ampliar a base de informação, ferramentas computacionais e metodologias; Aumentar a articulação com outros planos e políticas setoriais; e Criar um plano de mitigação de relativos à segurança do abastecimento em caso de eventos extremos.

Na recomendação de aprimoramento de informações, ferramentas e tecnologias, destaca-se ainda que as pesquisas de adaptação não estão no mesmo estágio de maturidade que as pesquisas relacionadas à mitigação. Dessa forma, se faz necessário construir conhecimento e desenvolver ferramentas e para auxiliar na compreensão dos impactos futuros e, com isso, contribuir na diminuição da vulnerabilidade dos empreendimentos atuais e futuros.

2.5.5 Impacto das Mudanças Climáticas na Geração Hidrelétrica

Considerando que, nas décadas recentes, a energia hidrelétrica foi categorizada como uma alternativa econômica e sustentável para o suprimento primário de eletricidade, torna-se imperativo avaliar as potencialidades e desafios que esta modalidade energética enfrentaria diante de um espectro diversificado de possíveis cenários climáticos futuros (WASTI et al., 2021).

Como a vazão de um corpo hídrico está diretamente relacionada com a ocorrência de eventos de precipitação, se o nível da precipitação se encontra dentro das normais para a região, as usinas hidrelétricas conseguem alcançar níveis adequados de produção de energia, no entanto em épocas de seca, essa produção é prejudicada. Isso faz com que as informações relacionadas aos eventos climáticos e ao regime de precipitação sejam essenciais para o planejamento desse tipo de geração.

A variabilidade climática natural possui grande influência no planejamento e operação de sistemas hidrelétricos devido a utilização de registros climáticos históricos para subsidiar os estudos sobre a quantidade e a variabilidade da quantidade de energia que pode ser produzida. Conseqüentemente, mudanças nas condições climáticas podem afetar tanto a operação do sistema hidrelétrico já existente como comprometer a viabilidade de empreendimentos futuros (SCHAEFFER R. *et al.*, 2012).

De acordo com Lucena (2010) a geração hidrelétrica depende das vazões afluentes aos empreendimentos, que por sua vez são influenciadas pelas variáveis de temperatura, precipitação e evaporação. Como essas variáveis tendem a sofrer alterações devido ao fenômeno das mudanças climáticas, os sistemas de geração hidrelétrica também são afetados.

Além dos impactos das mudanças climáticas na geração de energia hidrelétrica associados às mudanças nas variáveis do ciclo hidrológico, também são projetadas variações nas entradas sazonais de água nas hidrelétricas e eventos climáticos extremos, como ciclones, deslizamentos de terra e inundações, que podem danificar a infraestrutura

energética, impactar a operação das hidrelétricas e diminuir a capacidade destas (IPCC, 2021b).

O AR6 do IPCC (2021b) também prevê com alta confiabilidade que as mudanças climáticas afetem positivamente a produção de energia hidrelétrica nos países do norte da Europa. Já nos países mediterrâneos como Grécia, Espanha e Portugal é projetada uma redução de aproximadamente 10% na geração hidrelétrica em um cenário de aquecimento de 2°C, sendo que essa redução poderia ser reduzida pela metade se o aquecimento global pudesse ser limitado a 1,5°C.

Os impactos das mudanças climáticas associados à geração hidrelétrica também são dependentes dos processos tecnológicos utilizados, das características da geração e da localização das plantas. As bacias hidrográficas menos reguladas com usinas a “fio d’água” são mais impactadas pelos eventos extremos, já as bacias hidrográficas exploradas de maneira indevida apresentam maior vulnerabilidade aos efeitos das mudanças climáticas (FREITAS e SOITO, 2008).

Além disso, impactos nas infraestruturas de geração de energia também são previstos, o que implica em processos mais cuidadosos na determinação da localização das plantas. Mudanças nos protocolos de operação e nos projetos das plantas de geração hidrelétrica também podem ser úteis, no entanto não conseguirão mitigar todos os riscos futuros relacionados ao aumento das inundações e das descargas de sedimentos.

Wasti et al (2021) realizaram uma revisão global da literatura para estudar os impactos das mudanças climáticas na geração hidrelétrica e identificar oportunidades de melhoria nas abordagens de avaliação dos impactos dessas mudanças do clima nos projetos hidrelétricos. Os autores ressaltam que os impactos das mudanças climáticas no setor hidrelétrico são difíceis de prever e não são globalmente uniformes, podendo ser positivos, negativos ou insignificantes, a depender do local, da magnitude dessas mudanças do clima, do tamanho do reservatório, prioridade de alocação e do mercado de energia.

Wasti et al (2021) classificaram os principais impactos das Mudanças Climáticas no Setor Hidroelétrico para diversas regiões, como pode ser visto na figura 11.

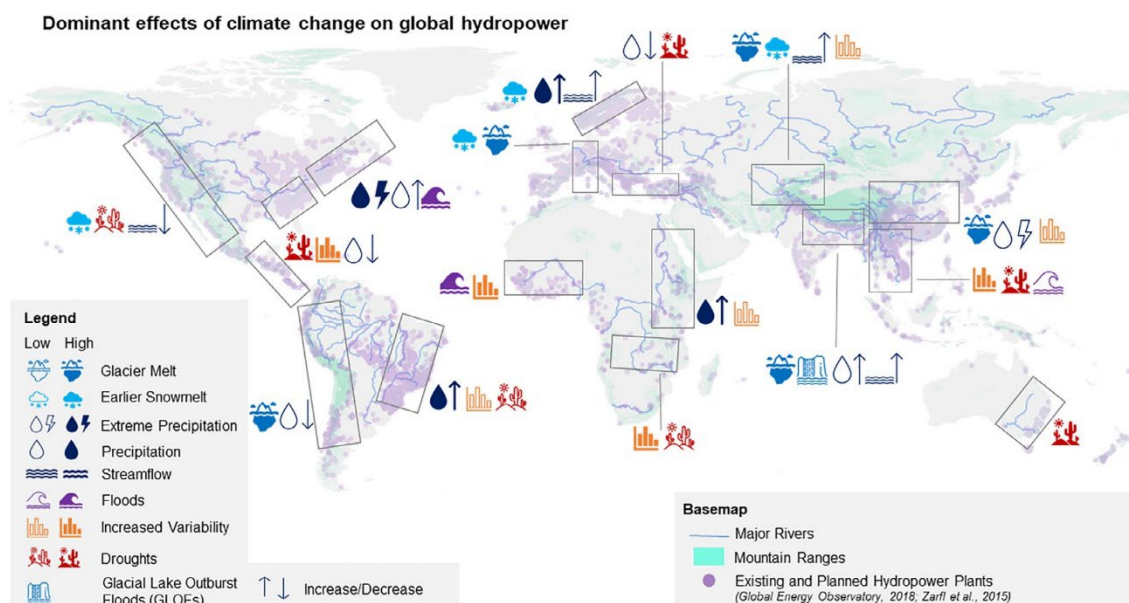


Figura 11- Efeito das mudanças climáticas na geração hidrelétrica global

Fonte: Wasti et al (2021)

De acordo com os autores, 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. No entanto, outras alterações relacionadas às mudanças climáticas, como o aumento da variabilidade da precipitação e a intensificação dos extremos de precipitação; a intensificação de ENOS (*El Nino* Oscilação Sul); o aumento da intensidade da precipitação, o aumento da evaporação e da demanda de água e a mudança na cobertura de solo como a perda de áreas florestadas também podem afetar a geração hidrelétrica no Brasil.

Wasti et al (2021) também ressaltam que outros fatores como a sazonalidade da temperatura e da precipitação, o horário de pico de demanda da eletricidade, as características da bacia e projeto da instalação hidrelétrica, também possuem potencial para criar mudanças favoráveis, desfavoráveis ou inexistentes na geração hidrelétrica em escala regional ou local.

Lucena (2010) estudou a vulnerabilidade da geração hidrelétrica frente as mudanças climáticas globais. Entre os resultados encontrados pelo autor estão:

- Queda na confiabilidade da geração hidrelétrica brasileira devidos aos impactos das mudanças climáticas;
- Queda da energia firme do sistema nos cenários A2 e B2 do Quarto Relatório do IPCC (AR4) (IPCC, 2007) em cerca de 31% e 29% respectivamente;
- Prejuízo na geração de energia hidrelétrica nas regiões norte e nordeste, tanto em termos de energia firme quanto de energia média;
- Prejuízo em menor grau na energia firme das regiões sul e sudeste;
- Demanda de políticas de adaptação para reduzir a vulnerabilidade do SIN como um todo.

O livro organizado por Lima, Collischonn e Marengo (2014) apresenta os principais resultados do Projeto Estratégico de P&D “Efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico de bacias hidrográficas e na energia assegurada de aproveitamentos hidrelétricos” da ANEEL. Sendo as análises dos impactos nas vazões naturais realizadas considerando todas as usinas hidrelétricas do SIN.

Devido ao caráter multidisciplinar do estudo de Lima, Collischonn e Marengo (2014) foram formadas equipes sendo: duas equipes que trabalharam com cenários de mudanças climáticas e as possibilidades de comportamento do clima a partir de modelos globais; duas equipes de hidrologia que utilizaram as variáveis climáticas obtidas da simulação dos modelos globais para converter as precipitações em afluências aos reservatórios das usinas do SIN; uma equipe de uso consuntivo que estudou cenários de uso do solo e de demanda de água para uso urbano e uma equipe de energia que calculou as energias asseguradas para os casos apresentados pela equipe de clima. Entre os resultados encontrados estão:

- Aumento da temperatura do ar em todas as regiões do país e redução da precipitação principalmente na região amazônica e na região nordeste do Brasil;

- As alterações previstas para as vazões médias mostram que o padrão espacial dos impactos das mudanças climáticas sobre a vazão depende fortemente dos padrões de chuva projetados pelos modelos climáticos utilizados;
- Como a energia assegurada depende das vazões e estas dependem da precipitação, a energia gerada também varia em função do cenário mudança climática;
- Redução na geração de energia prevista para o parque gerador futuro devido a maior concentração de usinas na região amazônica (onde é prevista diminuição da precipitação) e a diminuição dos períodos úmidos e aumento dos períodos secos;
- Os panoramas futuros de mudanças climáticas mostram uma possível tendência de diminuição das energias asseguradas caso o cenário A1B de emissões do IPCC (2014) se concretize;
- Como o impacto das mudanças climáticas no comportamento das precipitações pode alterar a disponibilidade de recursos hídricos afetando a produção e aumentando o custo da energia no futuro, a avaliação dos impactos das mudanças climáticas se torna uma área primordial para direcionar a política energética do país, pois garante a orientação e a definição de medidas com potencial de mitigar os efeitos desse fenômeno no parque gerador atual e futuro;
- Uma solução para diminuir a ocorrência de déficits na produção de energia seria planejar um parque gerador que supra a demanda energética brasileira, mesmo em condições adversas. No entanto a construção de um sistema de geração e transmissão que atenda esse nível de segurança carece de grandes investimentos, o que implicaria na geração de tarifas de energia mais elevadas;
- Outra solução seria melhorar os modelos de previsão de precipitação de curto e longo prazo nas grandes bacias para prover um melhor dimensionamento das fontes de energia e das suas complementaridades.

Schaeffer *et al.* (2012) fizeram uma revisão sobre a vulnerabilidade do setor energético às mudanças climáticas, buscando consolidar a literatura existente e levantar as lacunas nessa área de conhecimento. Entre as constatações e resultados encontrados nesse trabalho estão os seguintes:

- A modelagem dos impactos das mudanças climáticas na geração hidrelétrica pode variar dependendo da complexidade do sistema e do papel que a geração hidrelétrica possui nesse sistema. Se a hidroeletricidade é complementar como no caso dos EUA e Europa Ocidental, os valores médios da geração de energia hidrelétrica geralmente fornecem uma medida suficiente do impacto das mudanças climáticas. Já nos casos onde a geração é complementada por outras fontes de energia como no caso do Brasil e Noruega por exemplo, o impacto das mudanças climáticas deve ser analisado a partir de uma abordagem mais conservadora, como a energia firme;
- As mudanças climáticas podem adicionar uma quantidade significativa de incerteza a operação já incerta de sistemas hidrelétricos;
- Em regiões onde existem geleiras as mudanças climáticas podem causar impactos nas dotações hidrelétricas. Nessas regiões a capacidade de armazenar água pode ajudar a reduzir potenciais mudanças sazonais do derretimento das geleiras;
- O efeito das mudanças climáticas sobre a demanda de energia no mundo pode ser ambíguo, pois o aumento da temperatura pode reduzir a demanda por aquecimento em algumas áreas enquanto aumentaria a demanda por resfriamento em outras.

Marengo, Rodrigues-Filho e Santos (2020) elaboraram um dossiê sobre os avanços no desenvolvimento de estudos relacionados a identificação de impactos e avaliação de vulnerabilidades às mudanças climática no Brasil, tendo como objetivo fornecer insumos técnicos para subsidiar a promoção de políticas públicas em torno do tema. Nesse estudo foram considerados os impactos relacionados ao clima já observados para o território brasileiro, bem como cenários de aquecimento global de 1,5° C, 2° C e 4° C acima dos níveis pré-industriais.

O estudo de Marengo, Rodrigues-Filho e Santos (2020) utilizou a abordagem *Nexus+* que integra métodos qualitativos e quantitativos das ciências naturais e sociais em diversas escalas, além de cenários e indicadores que conciliam as dimensões econômica, social e ambiental na produção agrícola, energética e no uso de recursos naturais (NEXUS, 2022). Entre os apontamentos dos autores destacam-se os seguintes:

- As projeções de mudanças climáticas indicam alterações nas características climáticas regionais, incluindo o aumento na temperatura mínima e máxima do ar próximo à superfície para todas as regiões do País; o aumento dos eventos de calor extremo, principalmente no norte do Brasil; o aumento da ocorrência de eventos de precipitação intensa no Sul e Sudeste do Brasil e o aumento da probabilidade de ocorrência de secas e déficits de chuva em algumas regiões da Amazônia e da região nordeste;
- Em relação a disponibilidade hídrica o estudo sugere um cenário de amplificação dos desafios já existentes no futuro próximo, com maior frequência de crises hídricas como a ocorrida no verão de 2014 na região sudeste do Brasil;
- O direcionamento de ações de adaptação na gestão dos recursos hídricos ainda carece de articulação entre diferentes instituições e da promoção de políticas públicas com abordagem multiescalas (municipal, de bacias hidrográficas, estadual e federal) e da inclusão da incerteza climática nas ações de planejamento;
- Os impactos negativos e os riscos relacionados aos eventos extremos e as mudanças climáticas superam os benefícios e são agravados por fatores antrópicos.

O estudo de Marengo, Rodrigues-Filho e Santos (2020) também cita os resultados de Vasquez-Arroyo *et al.* (2020) que analisaram os impactos das mudanças climáticas na geração hidrelétrica e suas consequências para o sistema elétrico brasileiro utilizando modelos climáticos regionais e dados de cenários de aquecimento médio global SWL2 e SWL4. Entre os resultados levantados nesse estudo, estão:

- A capacidade adaptativa do sistema elétrico, relacionada a possível queda de geração hidrelétrica devido as mudanças climáticas, demandará uma maior participação de outras fontes renováveis e de termelétricas a gás natural, ocasionando um aumento no custo marginal de geração de energia do sistema para atender a demanda em 2030.
- No caso do cenários SWL2 devido ao incremento do despacho de termelétricas projeta-se um aumento das emissões de gases de efeito estufa. Já no cenário SWL4 nota-se uma redução das emissões devido ao aumento da participação de outras fontes renováveis na matriz elétrica brasileira.
- O aumento da ocorrência e da intensidade de eventos extremos e o prejuízo destes aos sistemas energéticos pode ocasionar impactos na geração hidrelétrica, nos sistemas de transmissão e distribuição e no cultivo voltado para biocombustíveis.

Zákhia *et al.* (2021) estudaram os impactos das mudanças climáticas na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguará, na Região do Alto Rio Grande, no sul estado de Minas Gerais, utilizando o modelo hidrológico MHD-INPE para avaliar o desempenho desse modelo numa bacia de pequeno porte e para estudar os possíveis impactos hidrológicos na vazão futura dessa bacia. Para isso foram utilizadas previsões de três modelos (HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2) e dois cenários do AR5 do IPCC (RCP4.5 e RCP8.5) sendo a regionalização dos modelos realizada com o modelo ETA. Entre os resultados encontrados pelos autores estão a representatividade do modelo hidrológico MHD-INPE para a bacia estudada e a previsão de redução da vazão sazonal média para o clima futuro (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099) nos dois cenários utilizados e em todas as estações do ano, sendo que as maiores reduções de vazão seriam para o verão.

Os autores ainda pontuam que caso as previsões se concretizem até o final do século, é previsto um grande impacto nas atividades dependentes de recursos hídricos para a região, uma vez que se observou elevada redução da precipitação e da vazão ao longo das análises. Além disso, também é citado que do ponto de vista do ciclo hidrológico, o constante aumento da temperatura induz o aumento das taxas de

evaporação, elevando os níveis de vapor d'água na atmosfera, fazendo com que a disponibilidade hídrica da região se torne imprevisível (ZÁKHIA *et al.*, 2021).

O Documento de Apoio ao Planejamento Nacional Energético (PNE) Mudanças Climáticas e Desdobramentos sobre os Estudos de Planejamento energético: Considerações iniciais, elaborado pela EPE (2018) trouxe em suas considerações que:

- A redução na disponibilidade hídrica em algumas regiões pode acarretar uma queda na geração de energia e a uma maior complexidade na operação dos reservatórios de regularização;
- O aumento na frequência dos eventos extremos pode ocasionar maior vertimento nas hidrelétricas e um conseqüente menor aproveitamento da água aflúente. No entanto em algumas regiões esse fato pode ocasionar em um acréscimo à disponibilidade de água e uma maior capacidade de geração de energia;
- As mudanças climáticas também sugerem um aumento das vazões nos meses de inverno e primavera, possivelmente impactando positivamente na geração de energia. Entretanto, devido aos ambíguos padrões de precipitação previstos nos cenários climáticos o panorama geral ainda é incerto;
- Apesar das consideráveis variações regionais, globalmente espera-se um impacto pequeno ou ligeiramente positivo na geração hidrelétrica.

2.5.6 Mitigação e Adaptação aos Impactos das Mudanças Climáticas na Geração Hidrelétrica

Como nas últimas décadas a energia hidrelétrica foi classificada como uma opção econômica e sustentável para o fornecimento básico de eletricidade, há uma necessidade crucial de avaliar as oportunidades e os riscos que essa forma de geração de energia experimentaria em uma ampla gama de potenciais condições climáticas futuras (WASTI *et al.*, 2021).

O IPCC (2021c) descreve a mitigação das mudanças climáticas como a intervenção humana voltada para reduzir as emissões de GEE e aumentar os sumidouros desses gases. Podemos citar como exemplos de medidas de mitigação as tecnologias, processos ou práticas que contribuam nesses esforços, como a utilização de energia renovável e a minimização da produção de resíduos por exemplo.

A principal medida de mitigação às mudanças climáticas do ponto de vista físico é limitar o aquecimento global e conseqüentemente limitar as emissões cumulativas de GEE. No entanto, apesar da grande necessidade de limitar o aquecimento global os resultados do AR6 mostram o crescimento das emissões. Se considerarmos as emissões das infra-estruturas de combustíveis fósseis já existentes ou planejadas, já ultrapassaríamos o limite para deter o aquecimento global (IPCC, 2021a).

Já a adaptação é o processo de ajuste às condições climáticas reais ou esperadas, para reduzir os impactos negativos e explorar possíveis oportunidades (IPCC, 2021c). A adaptação depende de duas variáveis, a vulnerabilidade e a resiliência. A vulnerabilidade pode ser definida como o grau de sensibilidade dos sistemas em relação aos impactos das mudanças climáticas (WWF, 2022). Já a resiliência pode ser definida como a capacidade de resistir ou se recuperar dos impactos das mudanças climáticas.

De acordo com Lucena (2010) a vulnerabilidade ao efeito das mudanças climáticas não depende somente da intensidade do fenômeno em si, mas também das medidas adotadas em preparação à ocorrência dos impactos desse fenômeno. A mitigação pode evitar, reduzir ou postergar os impactos e o desenvolvimento sustentável pode reduzir a vulnerabilidade a essas alterações climáticas.

A vulnerabilidade de um sistema às mudanças climáticas também depende da exposição do mesmo ao fenômeno e da sua habilidade de adaptação, podendo essa adaptação ser no sentido de compensação de possíveis danos ou até mesmo do aproveitamento de oportunidades associadas às mudanças do clima (FREITAS e SOITO, 2008). Assim, essas alterações climáticas podem ocasionar custos (ou benefícios) difíceis de quantificar, pois incluem além do custo do impacto direto ocasionado pelas mudanças

climáticas, os custos relacionados às medidas de adaptação às novas condições climáticas (LUCENA, 2010).

Entre as medidas de adaptação aos impactos das mudanças climáticas citadas pelo AR6 estão o aumento da eficiência das hidrelétricas. Estudos mostram que aumentar a eficiência de hidrelétricas em até 10% poderia compensar os impactos da diminuição de disponibilidade de água na maioria das regiões (VAN VLIET *et al.*, 2016, apud IPCC, 2021b).

O AR6 também cita que uma medida para mitigação dos impactos das mudanças climáticas nas hidrelétricas é a diversificação dos portfólios de geração de energia. A geração complementar de energia pode ser uma estratégia adotada nesse sentido, pois a integração de energias renováveis como a energia hídrica, solar e eólica pode trazer vários benefícios relacionados ao aumento da produção e da confiabilidade do sistema. Além disso essa medida apresenta co-benefícios de mitigação como descarbonização e atendimento a normativas ambientais (IPCC, 2021b).

A dispersão geográfica das linhas de transmissão de energia pode desempenhar um papel importante no enfrentamento das mudanças climáticas. Em países com uma grande rede de transmissão de energia, como é o caso do Brasil, a capacidade de transmitir energia entre diferentes regiões do país ajuda a compensar as variações sazonais regionais de produção de energia, otimizando a operação do sistema. Além disso, a capacidade dos reservatórios das hidrelétricas atuarem como amortecedores das variações de vazão, armazenando energia potencial e ajudando a lidar com as mudanças climáticas (SHAEFFER R. *Et al.*, 2012).

O estudo sobre os desdobramentos das mudanças climáticas no planejamento energético realizado pela EPE (2018) mostra que as pesquisas relacionadas a adaptação aos cenários de mudança climática não estão no mesmo estágio de maturidade em relação aos estudos relacionados à mitigação. Uma das razões desse fato são as dificuldades relacionadas à previsão climática de longo prazo, o que faz com que a utilização dos seus resultados em processos decisórios importantes seja limitada.

Cabe ressaltar que, apesar da possibilidade de aplicação de diversas medidas de adaptação para reduzir o impacto das mudanças climáticas na geração de energia, diversos riscos e impactos ainda permanecerão, especialmente em níveis mais elevados de aquecimento. Por isso, de acordo com o estudo de Lucena (2010), a combinação de medidas de adaptação e mitigação é a melhor alternativa para diminuir os riscos associados às mudanças climáticas.

Entre os principais desafios na abordagem das mudanças climáticas no planejamento energético de longo prazo levantadas pela EPE (2018) estão a crescente dificuldade em garantir a segurança energética, devido a tendência de maior participação de energias renováveis que são mais vulneráveis às mudanças climáticas; a necessidade de melhorar a compreensão acerca dos fenômenos relacionados a distribuição e disponibilidade dos recursos hídricos em cenários de mudança climática; e a necessidade de maiores investimentos em medidas de mitigação e adaptação.

2.5.7 Metodologias para Estudo dos Impactos das Mudanças Climáticas na Geração Hidrelétrica

No contexto atual das mudanças climáticas e da influência desse fenômeno na disponibilidade de água e na geração de energia, se torna imprescindível analisar as capacidades de geração das hidrelétricas tendo em vista os cenários de ocorrência desse fenômeno, buscando medidas de adaptação para manter os níveis de exploração do recurso e a geração de energia.

Segundo Shaefer *et al.* (2012) a abordagem metodológica mais utilizada para avaliações de impactos climáticos sobre energia hidrelétrica fundamenta-se em traduzir o clima de longo prazo em variáveis de escoamento. No entanto o autor ressalta que a previsibilidade da capacidade real de geração irá depender da quantidade de informações sobre os parâmetros técnicos/econômicos e das alternativas de geração hidrelétrica.

Uma análise mais profunda dos impactos das mudanças climáticas às usinas hidrelétricas pode ser complexa devido à falta de dados dos parâmetros técnicos de usinas mais novas. Por isso, a medida de potencial hidrelétrico bruto se torna uma ferramenta

interessante para avaliar os impactos climáticos nos países em desenvolvimento, onde geralmente a disponibilidade de dados é mais preocupante (SHAEFER *et al.*, 2012). Geralmente os estudos sobre os impactos das mudanças climáticas globais na produção ou potencial de geração de energia hidráulica, seguem o esquema apresentado na figura 12.

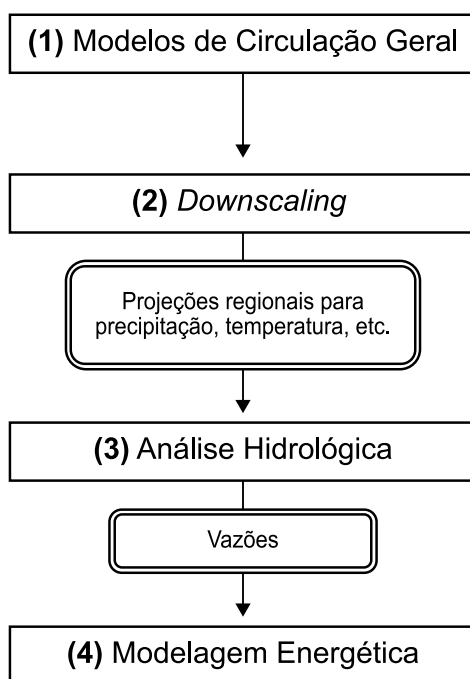


Figura 12 - Esquema geral dos estudos de impactos de mudanças climáticas na geração hidrelétrica

Fonte: Lucena (2010)

De acordo com Lucena (2010) esses estudos utilizam dados de projeções climáticas globais e seu *downscaling* (redução de escala) em projeções regionais para alimentar os modelos hidrológicos, gerando informações sobre os impactos na geração de energia hidroelétrica. Como os resultados da modelagem hidrológica fornecem subsídio para a modelagem energética, o ajuste adequado do modelo hidrológico se torna essencial para produção de resultados satisfatórios, que possuam potencial de aplicação à modelagem energética.

Lucena (2010) estudou as alternativas de adaptação a possíveis impactos a partir da proposição de um procedimento metodológico para análise da vulnerabilidade desses

sistemas hidroelétricos. A metodologia adotada utilizou vários estágios da modelagem de impactos e adaptação às mudanças climáticas, como pode ser visto na figura 13.

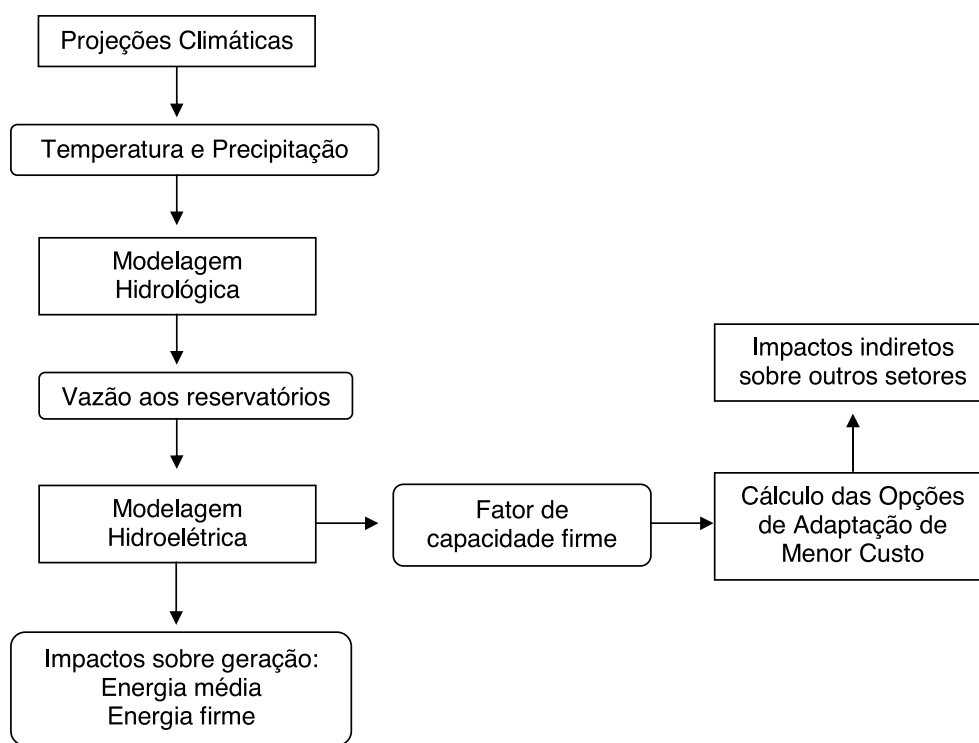


Figura 13 - Esquema metodológico para análise do impacto das mudanças climáticas na geração hidrelétrica e adaptações

Fonte: Lucena (2010)

De maneira geral a metodologia traduz as projeções climáticas em escala regional (pós-*downscaling*) em variações de temperatura e precipitação, que são modeladas para vazões naturais afluentes aos reservatórios das usinas hidroelétricas do SIN. Posteriormente simula-se a operação do SIN com base nas séries de vazão projetadas com o Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas para Subsistemas Hidrotérmicos Interligados (SUIISHI-O). E finalmente, estuda-se o planejamento energético integrado, delimitando as opções de adaptação de menor custo.

O estudo de Wasti et al (2021) buscou identificar oportunidades de melhoria nas abordagens de avaliação dos impactos das mudanças climáticas nos projetos hidrelétricos através da análise dos desafios associados à quantificação dos riscos das mudanças climáticas em escala local ou regional. Entre os desafios da quantificação dos riscos das mudanças climáticas na geração hidrelétrica está a cascata de incertezas decorrente dos

processos de obtenção de resultados. Essa cascata de incertezas se origina nos registros hidroclimáticos, se estende à representação da dinâmica das bacias, aos modelos de reservatório e de geração energética e, finalmente, à modelagem climática, que introduz incertezas devido às limitações dos modelos em representar tendências locais. Os autores ainda ressaltam que embora muitas incertezas sejam atribuídas às projeções dos MCGs, é crucial considerar todas as fontes de incerteza relacionadas a análise dos impactos das mudanças climáticas nos projetos hidrelétricos.

Como nossa capacidade de projetar mudanças no clima em escala local é limitada, os autores apontam que o monitoramento contínuo em tempo real de indicadores de mudança climática, como vazão e precipitação em escala local, é importante. Além disso aprimoramentos nas capacidades de previsões de curto prazo, revisões periódicas das diretrizes operacionais dos reservatórios, análise da integração de empreendimentos hidrelétricos preexistentes com outros tipos de geração renovável e análises recorrentes dos mercados energéticos são essenciais para a gestão eficaz de projetos hidrelétricos em cenários de mudanças climáticas (WASTI et al., 2021).

Além disso, Wasti et al (2021) também apontam que o padrão internacional para a avaliação dos riscos associados às alterações climáticas no âmbito hidrelétrico apresenta lacunas, particularmente em relação aos eventos de inundação, acúmulo de sedimentos e deslizamentos de terra. O que mostra que existe um espaço considerável para aprimoramento na nossa percepção dos efeitos das mudanças climáticas em variáveis como demanda energética e usos concorrentes de recursos hídricos.

3. METODOLOGIA

A metodologia proposta neste estudo é a simulação do aproveitamento hidroenergético da Bacia Hidrológica do Rio Sapucaí frente as condições de mudanças climáticas, por meio da análise das futuras vazões afluentes e potências das áreas com potencial de aproveitamento hidrelétrico da bacia.

As áreas com potencial de aproveitamento hidrelétrico utilizadas foram selecionadas a partir dos estudos de revisão do inventário hidrelétrico da Bacia do Rio Sapucaí de Elias *et al.* (2013), aceitas pela ANEEL pelo despacho SGH/ANEEL 3.957/2009. Esse inventário avaliou integralmente o potencial energético do Rio Sapucaí e selecionou onze locais barráveis que apresentam características favoráveis para a geração de energia hidrelétrica, desses foram selecionados para análise dois aproveitamentos, a PCH Gabiru, localizada na porção mais à montante da Bacia do Sapucaí e a PCH Guaipava na porção mais a jusante.

Para a geração das vazões afluentes nas áreas com potencial de aproveitamento hidrelétrico nos cenários de mudanças climáticas será utilizado o Modelo de Grandes Bacias (MGB) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), um modelo hidrológico de transformação chuva-vazão, distribuído e de grande escala que simula processos hidrológicos em bacias com áreas maiores que 10.000 km². Para subsidiar a execução do MGB, será utilizado o software Visual Studio e algoritmos do MGB em linguagem FORTRAN.

Além disso, será utilizada a calibração do MGB para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí realizada por Santos (2022), que obteve bons ajustes do modelo e representou de maneira adequada tanto os valores máximos e mínimos de vazão, quanto o balanço de água na bacia.

As projeções de mudanças climáticas utilizadas para subsidiar a modelagem com o MGB foram obtidas no conjunto de dados do NASA *Earth Exchange* (NEX) *Global Daily Downscaled Projections* (GDDP) e disponibilizadas pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). O período selecionado para ajuste foi de 1970 a 2014 e o

período selecionado para a modelagem de 2015 a 2060. Os cenários SSP utilizados serão: SSP2-4.5 de prognóstico intermediário e o cenário mais pessimista SSP5-8.5.

A partir dessa metodologia será possível analisar as respostas das áreas de aproveitamento hidroenergético da Bacia do Rio Sapucaí frente às condições de mudanças climáticas nos cenários analisados e quantifiNa figura temos um fluNa figura temos o fluxograma de car os impactos para a geração hidrelétrica em cada cenário. A figura 14 apresenta o fluxograma da metodologia utilizada no estudo.

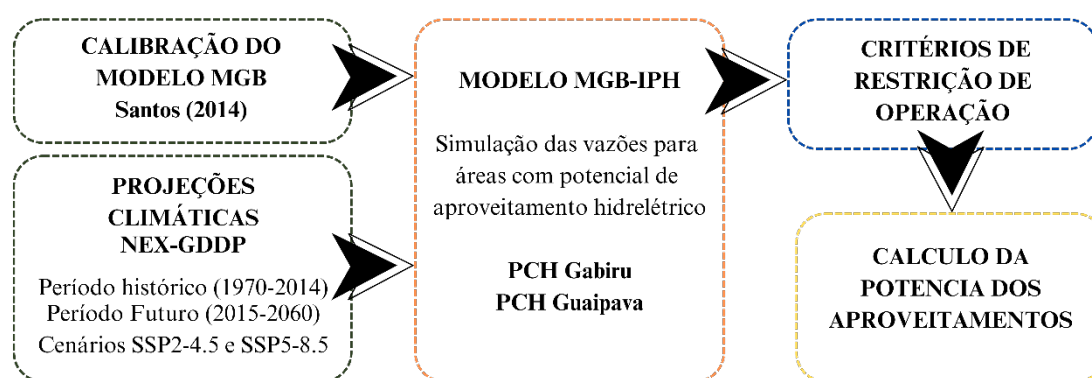


Figura 14 - Fluxograma da Metodologia

Fonte: Elaborado pela autora

3.1 Local de Estudo

A Bacia hidrográfica do Rio Sapucaí integra a Bacia hidrográfica do Rio Grande e está localizada na região sudeste do Brasil, entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, possuindo uma área de drenagem de 8.824 Km². A Bacia do Sapucaí corresponde a Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) GD5 do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) (COPASA, 2010).

O Rio Sapucaí nasce na Serra da Mantiqueira, no município de Campos do Jordão (SP) a 1620 m de altitude e desemboca na Represa de Furnas entre Elói Mendes e Paraguaçu, (MG) a 780 m. de altitude. É um afluente da margem esquerda do rio Grande, integrante da bacia do rio Paraná. Seus principais tributários são os rios Sapucaí-Mirim, Lourenço Velho, Itaim, Ribeirão do Mandu, Rio do Cervo, Rio Turvo e Rio Dourado (IGAM, 2015).

De acordo com o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (COPASA, 2010) o Rio Sapucaí possui extensão aproximada de 248 Km de comprimento, sendo dividido em três trechos:

- 1) Alto-Sapucaí, que compreende os municípios de Brasópolis, Conceição dos Ouros, Conceição das Pedras, Consolação, Delfim Moreira, Gonçalves, Itajubá, Maria da Fé, Marmelópolis, Paraisópolis, Pedralva, Piranguinho, Piranguçu, São José do Alegre, Sapucaí – Mirim, Wenceslau Brás, Virgínia, Passa Quatro, Campos do Jordão (SP), Santo Antônio do Pinhal (SP) e São Bento (SP).
- 2) O Médio Sapucaí com os municípios de Borda da Mata, Cachoeira de Minas Cambuí, Careaçú, Congonhal, Córrego do Bom Jesus, Espírito Santo do Dourado, Estiva, Heliódora, Lambari, Natércia, Ouro Fino, Pouso Alegre, Santa Rita do Sapucaí, São João da Mata, São Sebastião da Bela Vista, Senador José Bento, Silvianópolis, Munhoz, Senador Amaral e Camanducaia.
- 3) O Baixo Sapucaí que conta com os municípios de Carvalhópolis, Cordislândia, Eloí Mendes, Machado, Monsenhor Paulo, Paraguaçu, Poço Fundo, São Gonçalo do Sapucaí e Turvolândia.

A figura 15 apresenta o mapa da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, indicando também os seus principais afluentes.

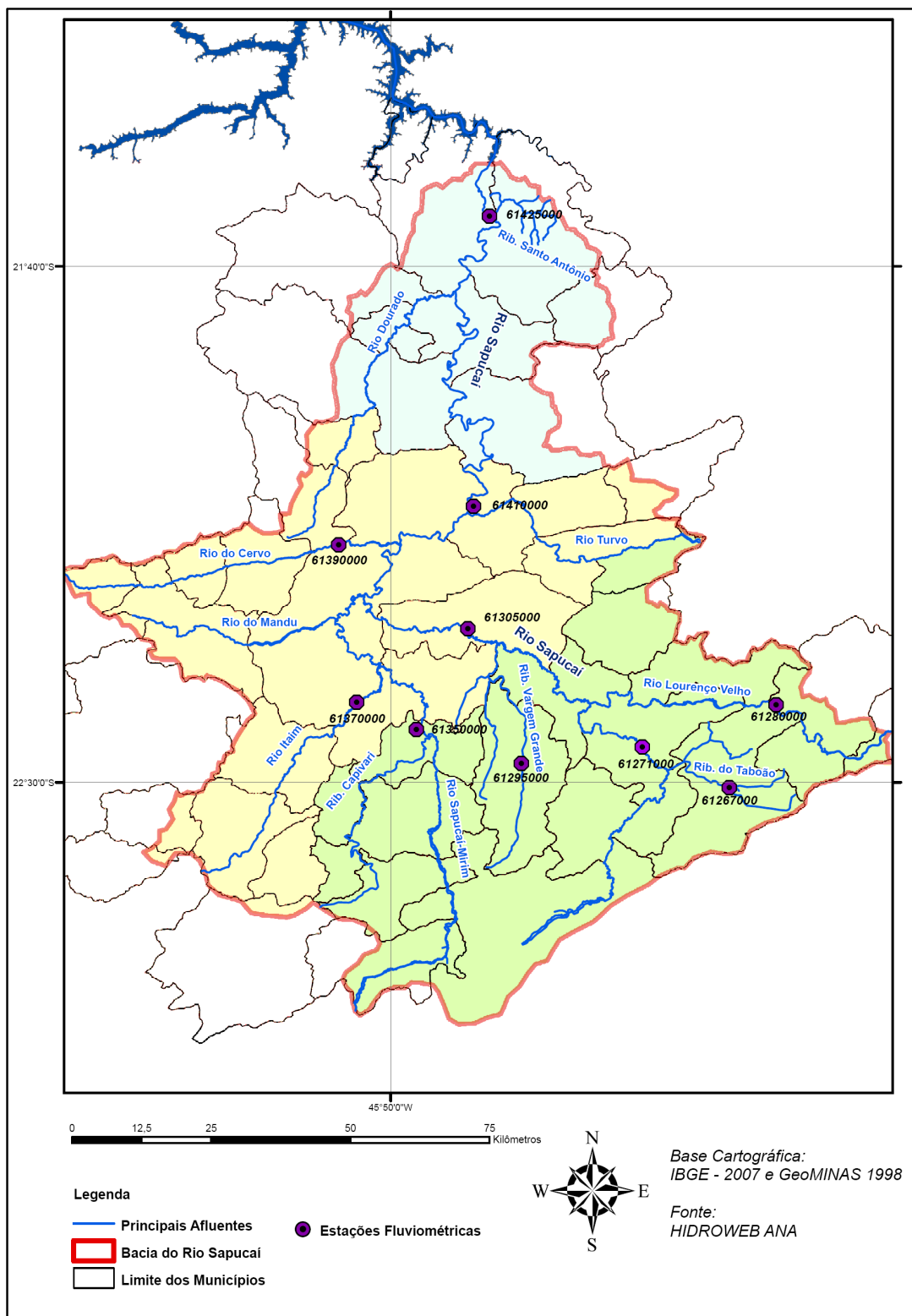


Figura 15 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí

Fonte: IGAM (2010)

Elias *et al.*, (2005) apontam que a área do Alto-Sapucaí apresenta baixa disponibilidade hídrica, encostas muito íngremes e calha do rio com elevada declividade

natural, possuindo longos segmentos de cachoeiras e quedas naturais concentradas de grande relevância. Nessa região também há baixa ocupação antrópica e a presença de grandes áreas preservadas.

Na área do Médio-Sapucaí, o rio encontra-se em um vale pouco encaixado, com encostas suaves, baixa declividade natural e grande ocupação antrópica. Entre as cidades que margeiam o Rio Sapucaí nesse trecho, estão: Santa Rita do Sapucaí, Pouso Alegre, Careaçú e Cordislândia. As rodovias BR-459, Fernão Dias, BR-267 também ladeiam o rio praticamente em quase toda a região (ELIAS *et al.*, 2005).

Já a região do Baixo-Sapucaí possui geomorfologia pouco movimentada, leito do rio localizado em um vale de ombreiras pouco expostas e calha com baixa declividade, apresentando, dessa forma, poucos segmentos encachoeirados. As margens do rio possuem baixa ocupação antrópica, no entanto, a região é intensamente antropizada devido as grandes áreas de cultivo de café e agropecuária (ELIAS *et al.*, 2005).

3.2 Dados de Projeção Climática do CMIP6

De acordo com Meehl *et al.*, (1997) o CMIP foi organizado pelo World Climate Research Programme's (WCRP) do Working Group on Coupled Modelling (WGCM), para realizar experimentos de performance de alguns modelos climáticos globais acoplados a um oceano dinâmico, a superfície terrestre simples e ao gelo marinho termodinâmico (apud EYRING *et al.*, 2016).

O objetivo geral do CMIP é entender melhor o passado, o presente e o futuro das mudanças climáticas decorrentes da variabilidade natural ou em resposta a mudanças nas forçantes radiativas. Os dados gerados nesses experimentos possuem formato padronizado para facilitar a análise pela comunidade científica e estão publicamente disponíveis através da Earth System Grid Federation (ESGF). Fazendo do projeto uma importante atividade de pesquisa em nível internacional e tornando essa base de dados um elemento fundamental dos estudos sobre mudanças climáticas. No entanto a iniciativa enfrenta desafios relacionados ao aumento da complexidade à medida que inclui mais

modelos, com mais processos e a aplicação destes a uma ampla gama de questões (EYRING *et al.*, 2016).

O estudo de Eyring *et al.*, (2016) também afirma que os experimentos do CMIP6 trarão um importante entendimento de três questões de grande relevância para o fenômeno das mudanças climáticas: A resposta do sistema terrestre ao forçamento, as origens e consequências das tendências do modelo e em como podemos avaliar a mudança climática futura dada a variabilidade climática interna, a previsibilidade do clima e as incertezas nos cenários.

A preparação do CMIP6, a sexta versão do modelo, envolveu a comunidade científica na identificação e solução das lacunas científicas que ficaram do CMIP5, a versão anterior do modelo. De acordo com Xue *et al.* (2022) o CMIP6 apresenta melhoria na resolução e aumento do acoplamento bidirecional do ciclo do carbono, ciclo do nitrogênio e química atmosférica em comparação ao CMIP5.

Os esforços dos cientistas envolvidos propiciaram o desenvolvimento de uma nova estrutura do CMIP, elencada por Eyring *et al.*, (2016) com três componentes principais:

1. Identificação de experiências comuns a partir do *Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima*¹ (DECK) e simulações históricas do CMIP, que são utilizadas para estabelecer características do modelo e também funcionam como um cartão de visita para a participação de uma das fases do CMIP ou de outros *Models Intercomparison Projects* (MIP), modelos de intercomparação voltados para a análise de fenômenos específicos, inclusos nas fases do CMIP;
2. Padrões comuns, coordenação, infraestrutura e documentação que facilitem a distribuição das saídas do modelo e a caracterização do conjunto de modelos;
3. Adoção de uma estrutura mais integrada, baseada na construção de MIP endossados pelo CMIP.

¹ *Klima é o grego para clima*

A figura 16 apresenta o arranjo geral da organização do CMIP/CMIP6. Segundo Neto (2020) o anel interno representa as funções padronizadas de todas as experiências do CMIP/DECK e as simulações históricas do CMIP6, o anel intermediário mostra os tópicos científicos relacionados ao CMIP6 que são abordados pelos MIP e aprovados pelo CMIP e o anel externo mostra os tópicos dos MIP.

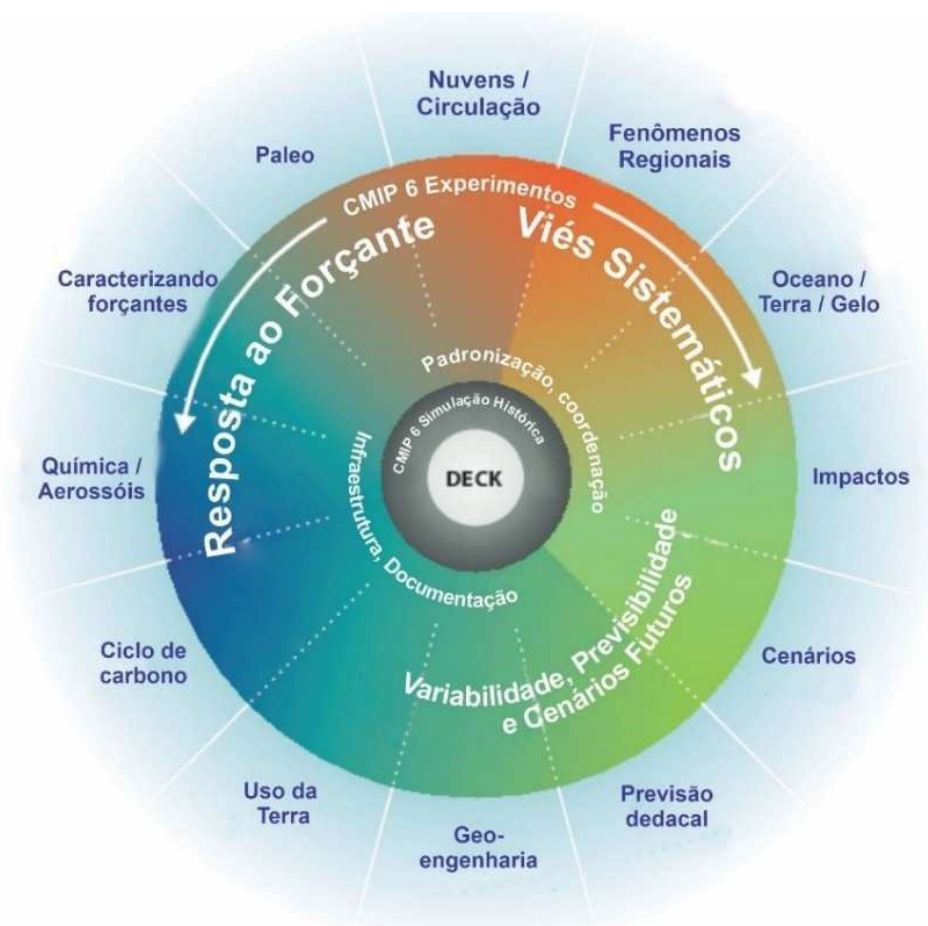


Figura 16 - Esquema do experimento CMIP/CMIP6

Fonte: Neto (2020)

3.2.1 Conjunto de dados NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections*

Uma fonte de grande relevância desses dados é conjunto da NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) preparados pelo *Climate Analytics Group* e *NASA Ames Research Center* utilizando o *NASA Earth Exchange* e distribuído pelo *NASA Center for Climate Simulation* (NCCS).

Esse conjunto de dados é composto por cenários climáticos globais de alta resolução e escala reduzida, obtidos nas simulações dos MCGs realizadas sob CMIP6. Os dados incluem projeções reduzidas de execuções do modelo *ScenarioMIP* para escala diária e são distribuídos por meio da ESGF e tem como objetivo subsidiar a análise dos impactos das mudanças climáticas em processos sensíveis a gradientes climáticos de escala mais refinada e sensíveis a efeitos da topografia (THRASHER ET AL, 2021; NCCS-NASA, 2023).

Os dados do NEX-GDDP-CMIP6 tem a resolução espacial de 0,25 x 0,25 graus e, portanto, fornecem condições para captar os detalhes espaciais nos padrões climáticos que muitas vezes são necessários em análises climáticas regionais ou locais. Outro ponto importante é que o método de desagregação espacial de correção de viés utilizado para a geração desse conjunto de dados foi um algoritmo estatístico de redução de escala desenvolvido por Wood et al. (2002); Wood et al. (2004); Maurer et al. (2008) e Thrasher et al. (2012) que ajustou as projeções climáticas futuras em relação aos registros climáticos históricos, fazendo com que esses dados sejam mais consistentes e realistas (THRASHER ET AL., 2012)

3.2.2 Modelos escolhidos

Foram escolhidos cinco modelos do NEX-GDDP-CMIP6, para subsidiar as análises desse estudo, sendo eles: ACCESS-ESM1-5, CanESM5, INM-CM4-8, IPSL-CM6A-LR e MPI-ESM1-2-HR.

O modelo climático ACCESS-ESM1-5, desenvolvido pelo *Australian Community Climate and Earth System Simulator* (ACCESS) é um projeto colaborativo liderado pelo CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*), em parceria com várias instituições australianas, apoiado pelo governo australiano que foca no desenvolvimento de modelos para a compreensão e previsão de mudanças climáticas (CSIRO, 2024). O ACCESS-ESM1-5 representa um avanço significativo em relação ao seu antecessor, o ACCESS-ESM1 e foi especialmente preparado para participar do CMIP6, apresentando melhorias notáveis em termos de acoplamento e precisão, como o

aprimoramento no tratamento da atmosfera para simulações que envolvem emissões de CO₂ interativas (CSIRO, 2024; ACCESS-NRI, 2024).

O modelo CanESM5, desenvolvido pelo *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis*, é a versão atual do modelo global do CCCma (*Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis*), um braço do *Environment and Climate Change Canada*. Esse modelo traz atualizações significativas em relação ao modelo anterior, o CanESM2, com novos desenvolvimentos nas áreas de oceanografia, gelo marinho e ecossistemas marinhos, além de um novo sistema de acoplamento (CANADIAN CENTRE FOR CLIMATE MODELLING AND ANALYSIS, 2019; CANESM USER GUIDE, 2021).

Já o modelo INM-CM4-8, desenvolvido pelo *Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences* é reconhecido por suas abordagens inovadoras na solução de equações da dinâmica atmosférica por métodos de diferenças finitas. A incorporação de parametrizações detalhadas dos processos físicos, seguindo o modelo INM-CM5, fortalece sua capacidade de simulação. Na representação da superfície, solo e vegetação, o INM-CM4-8 utiliza o esquema desenvolvido por Volodin e Lykossov, resolvendo as equações de temperatura, água do solo e gelo do solo em 23 níveis da superfície até 10 m de profundidade (VOLODIN et al., 2019).

O modelo climático IPSL-CM6A-LR, desenvolvido pelo *Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)* é a sexta versão do modelo IPSL-CM. Este modelo incorpora uma ampla gama de componentes para simular diversos aspectos do sistema climático da Terra, incluindo a atmosfera, oceanos, terra e gelo marinho. Uma característica do IPSL-CM6A-LR é a sua capacidade de representar o ciclo do carbono, além de oferecer módulos para química estratosférica interativa e química troposférica com aerossóis.

Finalmente, o modelo MPI-ESM1-2-HR, desenvolvido pelo *Max Planck Institute for Meteorology Earth System Model*, é uma versão de alta resolução do anterior MPI-ESM1.2-LR. Uma das principais metas desse modelo é melhorar a representação do estado médio do clima na atmosfera e no oceano. Além do aumento na resolução, o modelo também incorpora avanços na física dos oceanos, incluindo uma parametrização vertical mais sofisticada, que contribui para uma melhor simulação de fenômenos

climáticos importantes, como a circulação meridional do Atlântico (GUTJAHR et al., 2019).

3.2.3 Tratamento dos dados

O conjunto de dados NEX-GDDP-CMIP6 está disponibilizado em escala diária, para o período de 1950 a 2100 e é composto por diversos modelos que, por sua vez, disponibilizam uma coleção de variáveis meteorológicas: Umidade específica, umidade relativa, precipitação, radiação de onda longa, radiação de onda curta, velocidade do vento, temperatura média, temperatura máxima e temperatura mínima. Os dados são disponibilizados no formato *Network Common Data Form* (netcdf) para cada ano do período, de acordo com a variável e modelo escolhido. Cada arquivo netcdf contém, dessa forma, os valores diários da variável para cada dia do ano em questão, para todo o globo.

Para ajustar os dados para a grade do modelo MGB foram utilizados algoritmos desenvolvidos em Bash (*Bourne Again SHell*) e CDO (*Climate Data Operators*). A linguagem Bash possibilita criar scripts de linha de comando e foi empregada para automatizar a sequência de processos e gerenciar os fluxos de trabalho de manipulação de dados. Já o CDO, uma coleção de operadores para manipulação e análise de dados climáticos e meteorológicos, foi utilizado para realizar operações específicas como a conversão de coordenadas, o recorte espacial, a conversão de unidades e a concatenação dos dados.

Para a interpolação dos pontos de grade dos modelos climáticos para os pontos de grade do MGB foi utilizado o método do inverso do quadrado da distância, a partir de um script na linguagem Fortran. Após a interpolação foram gerados arquivos binários de precipitação que, juntamente a arquivos de informações de calibração, alimentaram as rodadas do modelo MGB.

3.3 O Modelo Hidrológico MGB-IPH

O Modelo de Grandes Bacias (MGB) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS) é um modelo hidrológico de

transformação chuva-vazão distribuído e de grande escala que utiliza equações físicas e conceituais para simular processos hidrológicos em um determinado período (COLLISCHONN, 2020) e permite a simulação hidrológica em bacias com áreas maiores que 10.000 km² (LIMA; COLLISCHONN; MARENGO, 2014).

As primeiras iniciativas no campo de simulação hidrológica de grandes bacias partiram de meteorologistas que procuravam representar a parte terrestre do ciclo hidrológico em escalas suficientemente grandes para serem utilizadas nos modelos numéricos de clima. Como a escala de caracterização climática envolvia dimensões planetárias a compatibilização das escalas dos modelos hidrológicos e meteorológicos se tornou o primeiro desafio (COLLISCHONN, 2001).

De acordo com o Manual de Referência Técnica do MGB a primeira versão desse modelo foi descrita por Collischonn (2001) e Collischonn *et al.* (2007), sendo melhorada desde então. Entre as principais aplicações do modelo MGB-IPG citadas por Collischonn, (2020), estão:

- Estimativa de vazões para o suporte a tomadas de decisão referentes a planejamento de recursos hídricos;
- Reanálise hidrológica para estudos de eventos extremos históricos;
- Processos hidrológicos e ambientais;
- Previsão de vazões em curto e médio prazo para eventos de cheia e operação de reservatórios;
- Efeitos e impactos de reservatórios nos regimes hidrológicos de sistemas como barragens e geração de energia;
- Avaliação de impactos relacionados a mudanças no uso do solo e às mudanças climáticas;

- Avaliação e medidas de controle a eventos de inundação.

De acordo com Lima, Collischonn, Marengo (2014) são necessários dados pluviométricos e parâmetros da bacia como dados de entrada no modelo e dados fluviométricos para comparação e calibração do modelo. O quadro 4 apresenta os dados de entrada do MGB-IPH de acordo com os apontamento de Fan, Collischon (2014)

Quadro 4 - Dados de entrada do modelo MGB-IPH

Dados de Entrada	Descrição
Dados de chuva	Precipitação diária em pontos da bacia hidrográfica em milímetros de chuva.
Dados de vazão	Informações diárias de vazão providas de estações fluviométricas na bacia hidrográfica.
Dados de clima	Médias climáticas mensais dos parâmetros Temperatura, Vento, Umidade Relativa, Insolação e Pressão Atmosférica da região de estudo. Adicionalmente podem ser utilizados dados diários.

Fonte: Adaptado de Fan, Collischon (2014)

Ainda de acordo com Lima, Collischonn, Marengo (2014) os parâmetros fixos das Unidades de Resposta Hidrológica (URH) são os valores que podem ser medidos ou relacionados à vegetação, não sendo alterados no processo de calibração. Já os parâmetros calibráveis associados às URH ou às minibacias são alterados durante a calibração de forma que exista um bom ajuste entre a vazão observada e calculada.

3.3.1 Discretização

Na etapa de Discretização do modelo MGB-IPH a área de estudo é dividida em três unidades básicas:

1. Minibacias: Áreas adjacentes a um determinado segmento de rio delimitadas a partir da topografia;
2. Sub-bacias: Grupos regionais de minibacias;

3. Unidades de Resposta Hidrológica (URH): Subdivisões das minibacias baseadas em características específicas, como tipo de solo e vegetação, por exemplo.

O modelo MGB-IPH necessita da aplicação de geoprocessamento para a preparação de dados de entrada e das informações espaciais, como a discretização da bacia em minibacias e a definição das URH. A integração do modelo MGB-IPH com os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) promoveu melhoria nas etapas de pré e pós-processamento do modelo, com técnicas de pré-processamento a partir de dados do relevo dos Modelos Digitais de Elevação (MDE) e rotina de calibração automática que utiliza uma técnica de otimização multiobjetivo (LIMA; COLLISCHONN; MARENGO, 2014).

De acordo com Lima, Collischonn, Marengo (2014) o comportamento hidrológico das URH pode ser explicado por características físicas dos solos e da vegetação. Por isso, essas unidades são definidas através da superposição de mapas dessas variáveis para uma mesma região. Adicionalmente podem ser incluídos outros tipos de informação como topografia e litologia advindas de imagens de satélite ou de mapas digitalizados. As ferramentas SIG também auxiliam na compreensão das etapas de simulação, pois as informações podem ser espacializadas e diferentes dados podem ser sobrepostos, o que possibilita uma análise integrada (SIQUEIRA, 2017).

O quadro 5 apresenta as informações geradas a partir de SIG para a utilização do modelo MGB-IPH.

Quadro 5 - Dados espaciais gerados a partir da utilização de SIG

Informação	Descrição
Modelo Digital de Elevação (MDE)	Topografia digital da bacia em células quadradas, geralmente utiliza-se a disponibilizada pela <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (SRTM).
Direções de Fluxo	Arquivo em que cada célula quadrada tem um código indicador da direção em que a água escoar naquele local.
Área Acumulada	Arquivo em que o valor de cada célula que compõe a bacia corresponde ao número de células localizadas a montante

Rede de Drenagem	Mapa com a rede de drenagem representada por células quadradas
Minibacias	Bacia hidrográfica de cada trecho de rio.
Sub-bacias	Unidades maiores do que as minibacias e menores do que a bacia, úteis para a definição de valores de parâmetros e para os procedimentos de calibração
Unidades de Resposta Hidrológica	Unidades de Resposta Hidrológica, definidas pelo cruzamento de informações de uso do solo, solo e geologia.

Fonte: Adaptado de Lima, Collischon, Marengo, (2014).

3.3.2 Estrutura

De maneira geral a estrutura do modelo MGB-IPH pode ser separada em três módulos (COLLISCHONN, 2020):

- 1) *Módulo de balanço de água e energia no solo*: Contabilizam os processos hidrológicos verticais, como o balanço da energia solar na superfície, a interceptação de água da chuva, o balanço de água no solo, a percolação da água para o aquífero, o fluxo ascendente e a geração dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo. A figura 17 apresenta o esquema do balanço de água no solo utilizado no modelo MGB-IPH.

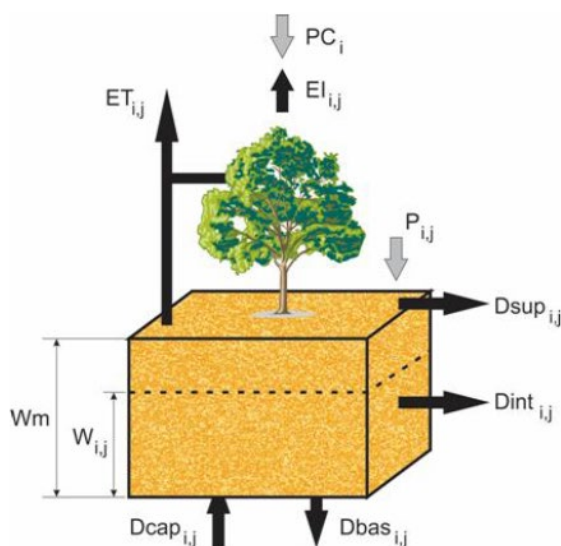


Figura 17 - Esquema do balanço de água no solo no modelo MGB-IPH

Fonte: Collischonn, (2020)

- 2) *Módulo de escoamento interno*: Estima os processos hidrológicos horizontais da minibacia, desde sua origem até a drenagem. Nesse módulo os fluxos de água são separados em superficiais, subsuperficiais e subterrâneos.
- 3) *Módulo de escoamento na rede de drenagem*: contém os processos horizontais ao longo dos principais rios da bacia.

A figura 18 apresenta um esquema geral de execução do modelo MGB-IPH, incluindo os dados necessários para cada etapa e o processamento das informações até o resultado final.

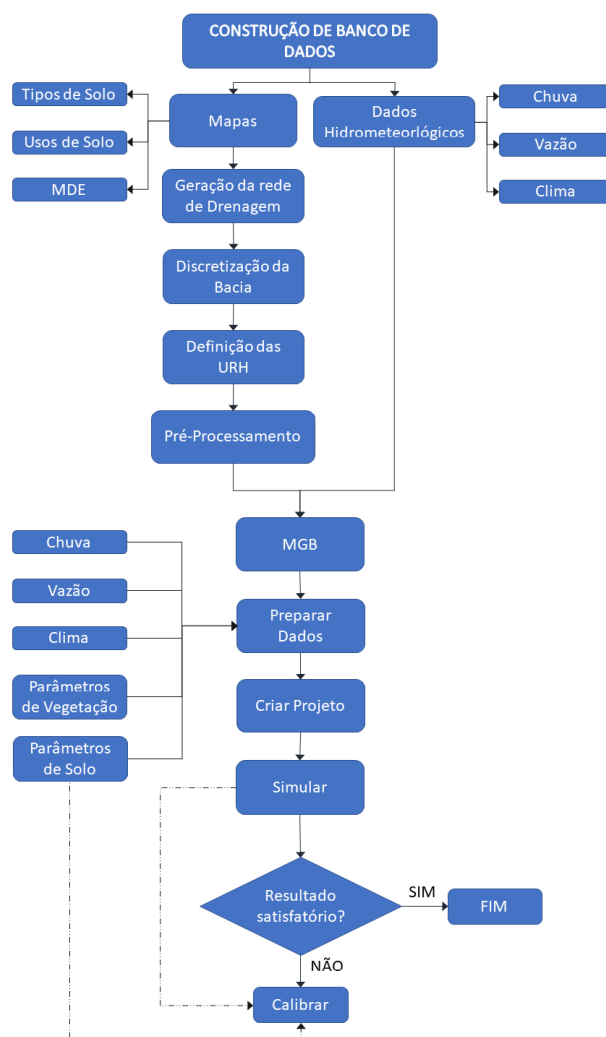


Figura 18 - Fluxograma da aplicação do modelo MGB-IPH

Fonte: Medeiros (2019)

3.3.3 Calibração do MGB-IPH para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí

Nesse estudo será utilizada a calibração do MGB-IPH para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí realizada por Santos (2022), que teve como base o período de 1980 a 1989. A autora utilizou o MDE do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) para a etapa de pré-processamento do modelo. A figura 19 mostra o mapa do MDE do STRM para a Bacia do Rio Sapucaí.

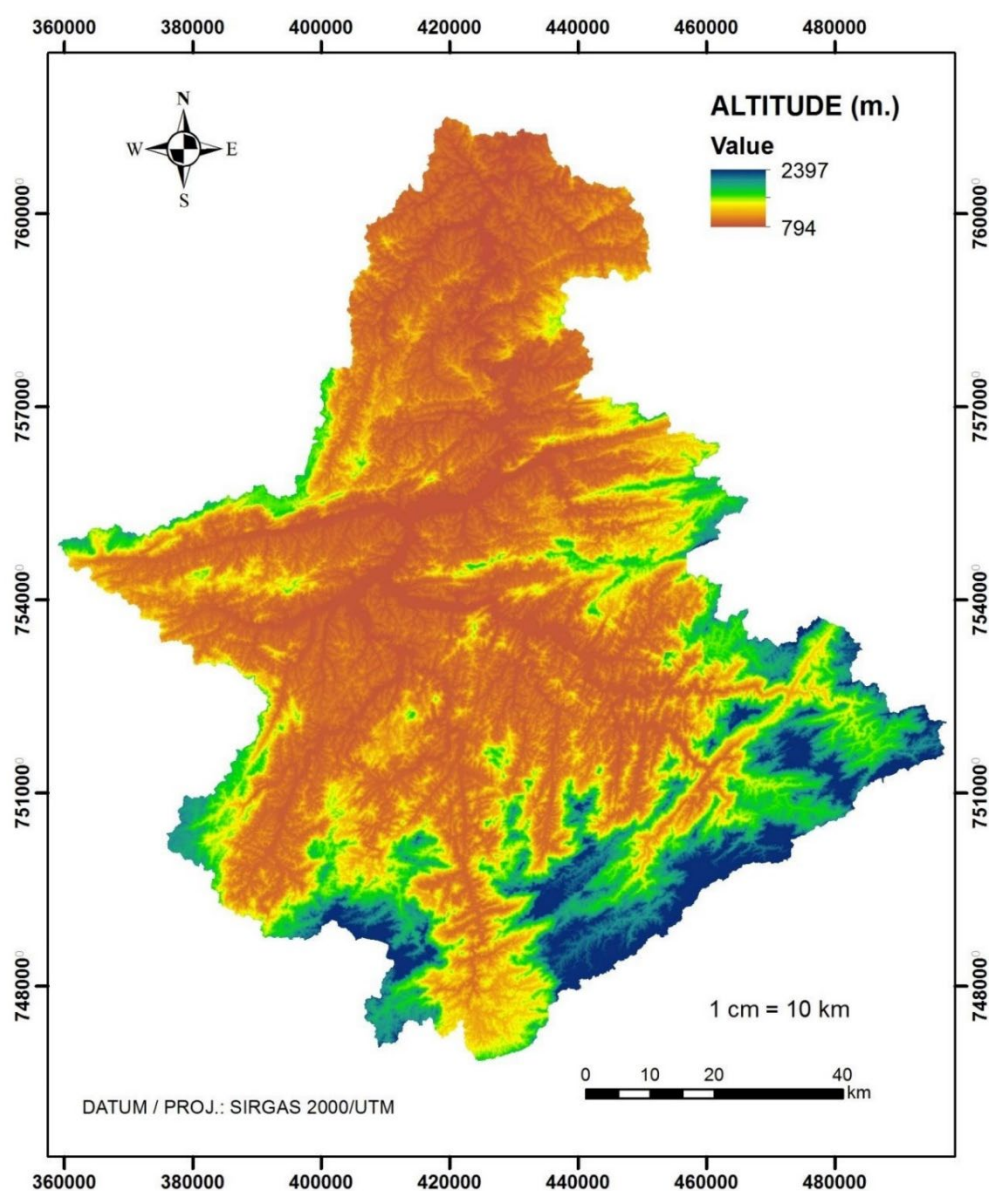


Figura 19 – Modelo Digital de Elevação da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí

Fonte: Siqueira (2017)

Os MDE's são arquivos de registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas, representados como uma imagem com um valor de elevação para cada pixel. A partir desse arquivo serão obtidas as direções de fluxo de água, rede de drenagem, sub-bacias e diversos outros parâmetros necessários (SIQUEIRA, 2017).

Santos (2022) utilizou o limiar de área de 2 km² para o processamento das direções de fluxo e adotou distância mínima de 5 km para a segmentação da rede de drenagem, possibilitando a geração de 1966 minibacias, que são apresentadas na figura 20.

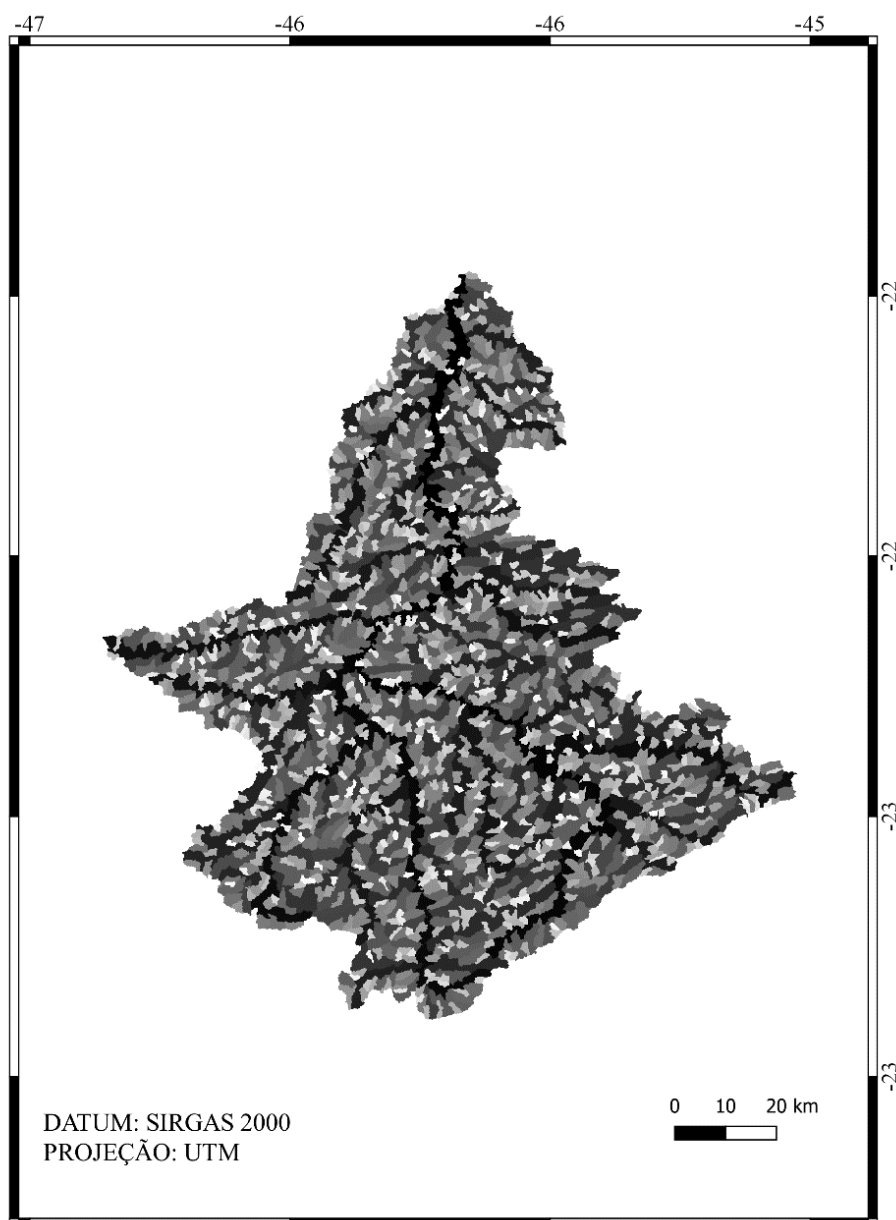


Figura 20 - Minibacias para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí

Fonte: Santos (2022)

Para a delimitação das sub-bacias foram utilizados dados de vazão observada de 15 postos fluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA), sendo que o critério de escolha das estações foi a disponibilidade dos dados fluviométricos a partir de 1980 (SANTOS, 2022). A figura 21 apresenta a localização dos postos fluviométricos utilizados na região da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí:

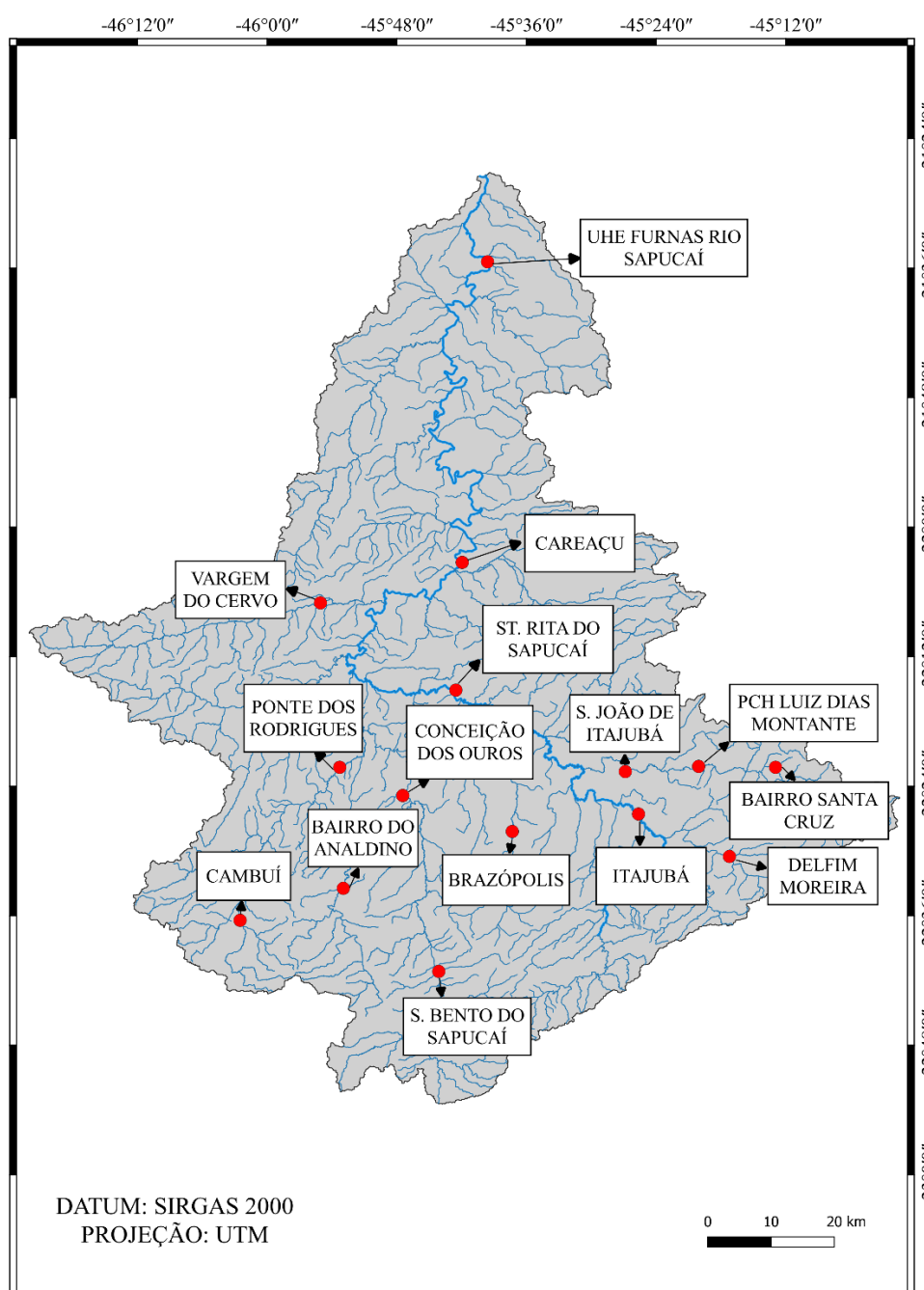


Figura 21 - Postos Fluviométricos utilizados para calibração do MGB-IPH na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí
 Fonte: Santos (2022)

Na determinação das sub-bacias, Santos (2022) utilizou os 15 postos fluviométricos e o exutório do Rio Sapucaí. Gerando, desta forma, 16 sub-bacias. A figura 22 apresenta as sub-bacias obtidas para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí:

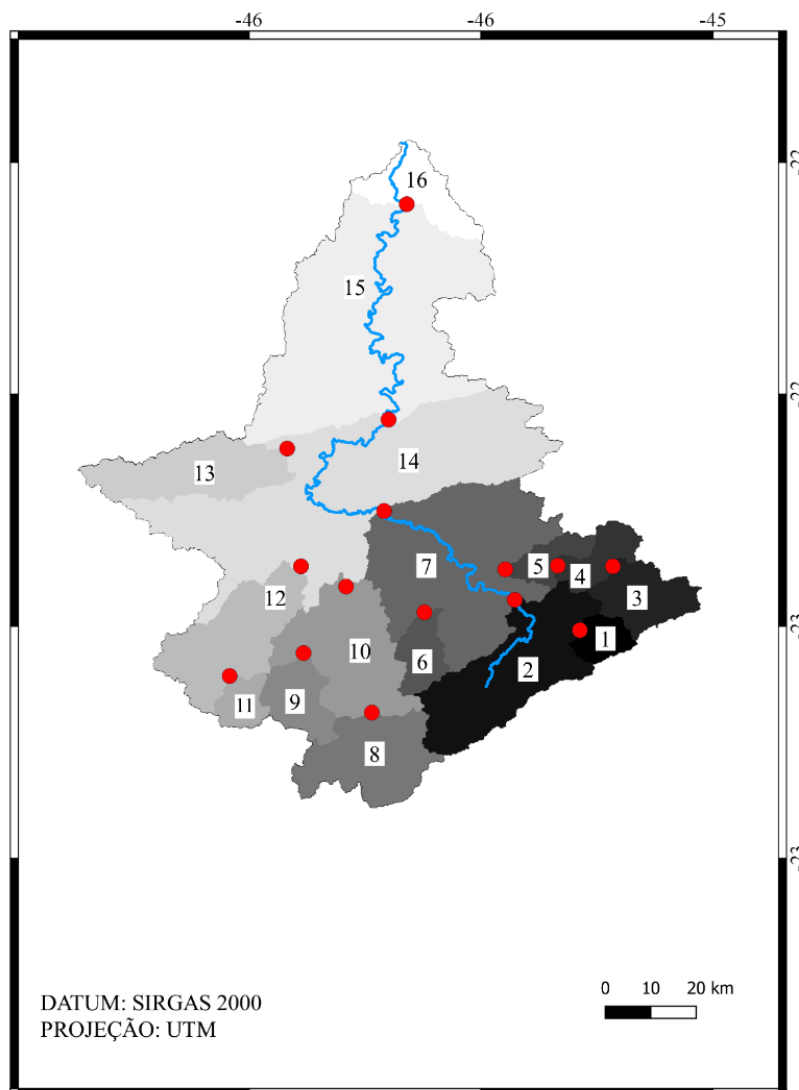


Figura 22 - Sub-bacias obtidas para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí

Fonte: Santos (2022)

Na execução do modelo foram utilizados dados de precipitação de 257 postos pluviométricos da ANA, além dos dados das 14 estações fluviométricas já citadas. Já os dados climáticos foram provenientes de dez estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Para analisar o ajuste do modelo, Santos (2022) utilizou três funções objetivo: Nash Sutcliffe (NS), que é amplamente utilizado para análise de desempenho de modelos hidrológicos (MANSUR, 2011) e que indica o desempenho das vazões médias e altas; Nash Sutcliffe dos logaritmos (NS log), que indica o desempenho nas mínimas e o Erro de Volume (EVOL). A tabela 2 apresenta os resultados das estatísticas de ajuste analisadas.

Tabela 2 - Estatísticas de Ajuste

Sub-bacia	NS	NS log	EVOL
1	0,449	0,415	-1,9
2	0,769	0,672	1,72
3	0,671	0,791	-2,99
4	-	-	-
5	0,819	0,826	8,64
6	0,647	0,55	34,86
7	0,615	0,813	5,2
8	0,479	0,549	23,39
9	0,472	0,675	29,49
10	0,474	0,469	41,12
11	0,51	0,733	7,87
12	0,752	0,851	-4,04
13	0,717	0,747	-0,62
14	0,745	0,856	1,68
15	0,697	0,821	10,29

Fonte: Santos (2022)

De acordo com Mansur et. al (2011) o coeficiente NS é uma medida normalizada que varia entre $-\infty$ e 1.0 e compara o erro quadrático médio da simulação com a variância da série. Ou seja, o coeficiente NS compara o tamanho médio dos resíduos do modelo com os dados observados. E segundo os apontamentos de Felix (2015) os melhores resultados tanto de NS quanto de NS log são aqueles mais próximos de 1.

Os resultados obtidos por Santos (2022) mostram que o ajuste do modelo para NS e NS log variaram de bom (entre 0,4 e 0,7) a muito bom (acima de 0,7), dessa forma,

tanto os valores máximos quanto os mínimos estarão bem representados. Contudo, o melhor ajuste ocorre nas mínimas.

Já para o coeficiente EVOL, quanto mais próximo de zero, mais próximo da condição ideal (FELIX, 2015). Como a maioria das bacias apresentou valores de EVOL menores que 10% podemos inferir que o modelo apresenta um ótimo ajuste e que o balanço de água na bacia estará bem representado utilizando essa calibração (SANTOS, 2022).

3.3.4 Modelagem

O modelo MGB foi executado no ambiente de compilação do software Visual Studio, a partir de algoritmos próprios para modelagem do MGB em linguagem FORTRAN, disponibilizados pelo IPH. No ambiente computacional do Visual Studio foi possível alterar parâmetros dos algoritmos e realizar as simulações necessárias.

Inicialmente o MGB foi executado com dados de vazão e precipitação observados no período de 1970 a 2014, utilizando o mesmo banco de dados de entrada da calibração. Essa rodada formou a “linha de base” para a análise da performance dos períodos históricos dos modelos analisados e por consequência da performance geral dos modelos. Os dados dessa etapa serão referidos na seção de resultados como a série histórico observado.

Posteriormente, utilizaram-se dados binários de precipitação para realizar as simulações dos períodos históricos e cenários de cada modelo. Mantiveram-se os mesmos dados de vazão observada, ajustando-se, no caso de períodos futuros, os dados conforme necessário. A climatologia de outras variáveis meteorológicas também foi preservada.

3.4 Aproveitamentos Hidrelétricos na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí

Elias *et al.* (2013) elaboraram a revisão dos estudos de inventário hidrelétrico da Bacia do Rio Sapucaí que foram considerados ativos pela ANEEL pelo despacho

1.683/2009 e considerados aptos em outubro de 2009, com aceite no despacho SGH/ANEEL 3.957/2009.

Esse estudo avaliou integralmente o potencial energético do Rio Sapucaí e selecionou onze locais barráveis e 17 alternativas de arranjo que foram dispostas em cinco alternativas de partição de quedas. A alternativa escolhida apresentou uma potência total instalada de 83,90 MW, o que corresponde a energia firme de 46,1 MW distribuída em 10 aproveitamentos (ELIAS *et al.*, 2013). A tabela 5 apresenta os dados referentes aos Aproveitamentos Hidrelétricos (AHE) selecionados.

Tabela 3 - Aproveitamentos Hidrelétricos Selecionados

Identificação	DF (km)	PI (MW)	EF (MW*)	NAM (m)	NAJ (m)	AR (km²)
AHE Balsa da Cachoeira	2,0	19,8	10,9	779,00	768,00	4,34
AHE Guaipava	13,2	24,3	13,4	793,00	779,00	9,54
AHE Gabiru	288,1	5,3	2,9	894,50	857,00	1,95
AHE Freire	293,4	2,9	1,6	916,00	894,50	0,61
AHE Borges	300,2	2,5	1,4	939,00	916,00	0,49
AHE São Bernardo	305,1	4,1	2,2	993,00	939,00	0,31
AHE Tabaco	308,7	3,3	1,8	1039,00	993,00	0,10
AHE Cachoeira do Diamante	311,2	5,8	3,2	1143,00	1039,00	0,01
AHE Horto	316,7	9,0	4,9	1332,00	1173,00	0,18
AHE Campos do Jordão	319,5	6,9	3,8	1485,00	1132,00	0,03

AHE: Aproveitamento Hidrelétrico; DF: Distância à foz; PI: Potência Instalada; EF: Energia firme; NAM: Nível de água à montante, NAJ: Nível de água a jusante; AR: Área do reservatório. (*) MW Médio

Fonte: Adaptado de Elias *et al.*, (2013)

A seleção dos pontos de análise de aproveitamento hidroenergético foi fundamentada nos pontos de aproveitamento identificados Inventário Hidroenergético. Dessa forma, foram escolhidos a PCH Gabiru, localizada a montante, e a PCH Guaipava, situada a jusante. Esta seleção permitiu analisar tanto a parte superior quanto a inferior da bacia e a influência das alterações climáticas, nestas.

Para a análise hidroenergética da PCH Guaipava, utilizou-se o posto da Sub-bacia 15, enquanto para a PCH Gabiru, utilizou-se o posto da sub-bacia 2, o mais próximo disponível.

As áreas dos aproveitamentos hidrelétricos utilizadas são descritas por Elias *et al.*, (2005) da seguinte forma:

- *AHE Guaipava*: Proposto no rio Sapucaí a aproximadamente 13,2 km da sua foz, possui coordenadas de latitude 21°35'10" S e longitude 45°39'51" W e foi arranjado como circuito de geração conjugado com o barramento. A região se localiza no trecho baixa declividade do Sapucaí relevo topográfico assimétrico no vale. A área de drenagem da bacia hidrográfica abrangida por esse AHE é de 9.256 km², a vazão média de longo período é de 173,58m³/s e a vazão mínima, Q(7,10), de 42,0 m³/s.
- *AHE Gabiru*: Proposto no curso principal do rio Sapucaí, está a 288,1 km de sua foz, na latitude 22°31'49" S e longitude 45°24'15" W e possui arranjo com adução sem derivação. A região desse aproveitamento possui domínio de Morros, topografia medianamente acidentada e declividade do rio moderada. A área de drenagem da bacia hidrográfica desse AHE é de 414 km², a vazão média de longo período de 11,60 m³/s e vazão mínima Q(7,10) de 3,2 m³/s.

Devido a distância entre o posto da sub-bacia 2 e a PCH Gabiru foi realizado o procedimento de transposição de vazões a partir do método de correlação de área. Para o cálculo das áreas de contribuição das bacias associadas a cada ponto, foi utilizado o software de geoprocessamento *Qgis* e a biblioteca de plugins de análise hidrológica *IPH tools* e para o cálculo da transposição foi utilizado o software Microsoft Excel.

O processo de transposição de vazões assegurou que a vazão que seria utilizada para os cálculos refletisse as características hidrológicas específicas do local, permitindo uma avaliação mais realista do potencial hidroenergético.

3.5 Cálculo da Potência

Após a realização da transposição de vazão, procedeu-se ao ajuste dos valores de vazão de acordo com os limites operacionais das turbinas, conforme os critérios especificados no Inventário Hidroenergético da Bacia do Rio Sapucaí. Esse ajuste foi importante para alinhar os dados de vazão com as capacidades reais das turbinas dos aproveitamentos hidrelétricos. A abordagem utilizada no ajuste é apresentada na expressão abaixo:

$$Q_{Max.} \leq Q_{Sim.} \geq Q_{Min}$$

Onde:

$Q_{Max.}$ = Vazão Máxima Operacional

Q_{Min} = Vazão Mínima Operacional

$Q_{Sim.}$ = Vazão Simulada

Se a vazão simulada fosse menor do que a vazão mínima operacional da turbina, então a vazão mínima operacional seria utilizada. Por outro lado, se a vazão simulada excedesse a vazão máxima de operação da turbina, seria utilizada a vazão máxima de operação.

Após a aplicação dos critérios de restrição de operação, foi calculada a potência gerada pelas turbinas. A potência foi determinada utilizando a equação de potência hidráulica (Equação 1), que correlaciona diretamente a vazão com a geração de energia:

$$P = \eta \times \rho \times g \times H \times Q \quad (1)$$

Onde:

P = Potência hidráulica,

η = Eficiência da turbina,

ρ = Densidade da água,

g = Aceleração da gravidade,

H = Altura de queda e

Q = Vazão

4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados da análise do potencial hidroenergético da Bacia do Sapucaí, focando especialmente nos aproveitamentos hidrelétricos da PCH Gabiru, situada na porção superior da bacia, e a PCH Guaipava, localizada mais a jusante no curso do Rio Sapucaí.

Inicialmente, apresentaremos o desempenho das projeções dos modelos, no período histórico, explorando sua habilidade em capturar as dinâmicas hidrológicas da bacia estudada e fornecendo uma análise da confiabilidade desses modelos em simular os períodos futuros. Posteriormente, analisaremos as vazões nas duas PCHs estudadas, uma vez que essas vazões são diretamente responsáveis pela capacidade de geração de energia das usinas. Essa abordagem permite identificar padrões, anomalias e tendências nas vazões, fornecendo subsídios sobre os impactos potenciais de variações climáticas na geração hidrelétrica.

Por fim, a análise das potências nos aproveitamentos Gabiru e Guaipava oferece uma visão sobre a capacidade de geração de energia elétrica de cada PCH, enfatizando as implicações das variações de vazão para a eficiência operacional. Investigamos também as curvas de permanência de potência para cada cenário modelado, revelando como as usinas podem responder a diferentes condições hidrológicas projetadas.

4.1 Desempenho das projeções para o período histórico

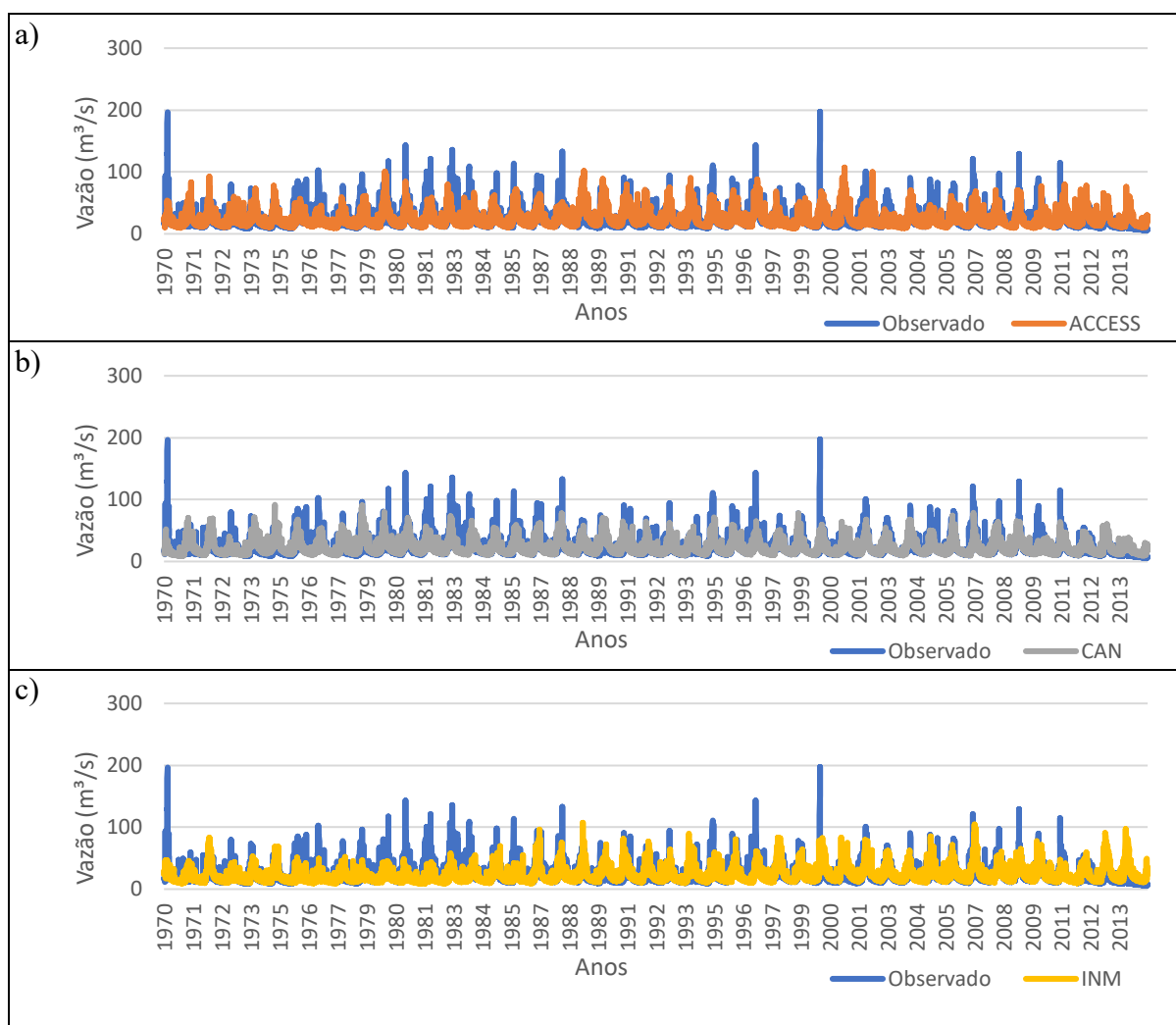
Para analisar a capacidade dos modelos utilizados nesse estudo em representar as características da vazão da região, foi realizada uma comparação entre os dados históricos observados e as simulações históricas de cada modelo. Embora existam variações entre os 15 postos das sub-bacias analisadas, essas variações são relativamente pequenas e as características hidrológicas se mantêm de forma consistente. Esta consistência permite que um posto específico seja utilizado para ilustrar as tendências gerais e a performance dos modelos.

Após estabelecer essa correspondência histórica, a investigação será ampliada para incluir a climatologia e a curva de permanência do período histórico dos modelos. Estas

análises subsidiarão a avaliação do alinhamento dos padrões médios simulados pelos modelos com as observações reais, o que é essencial para entender a capacidade dos modelos de simular as condições hidrológicas predominantes e fornecer projeções futuras em cenários de mudança climática.

Através desta análise, será possível avaliar a acurácia de cada modelo em reproduzir o as características hidrológicas da bacia, estabelecendo uma linha de base para validar a confiabilidade dos modelos antes de aplicá-los em cenários projetados de mudança climática. Assegurando que as previsões futuras sejam baseadas em modelos que tenham demonstrado capacidade de capturar com fidelidade as dinâmicas históricas de vazão.

A figura 23 apresenta a comparação entre os as vazões geradas a partir de dados observados e dos dados simulados pelos modelos para o período histórico na PCH Gabiru.



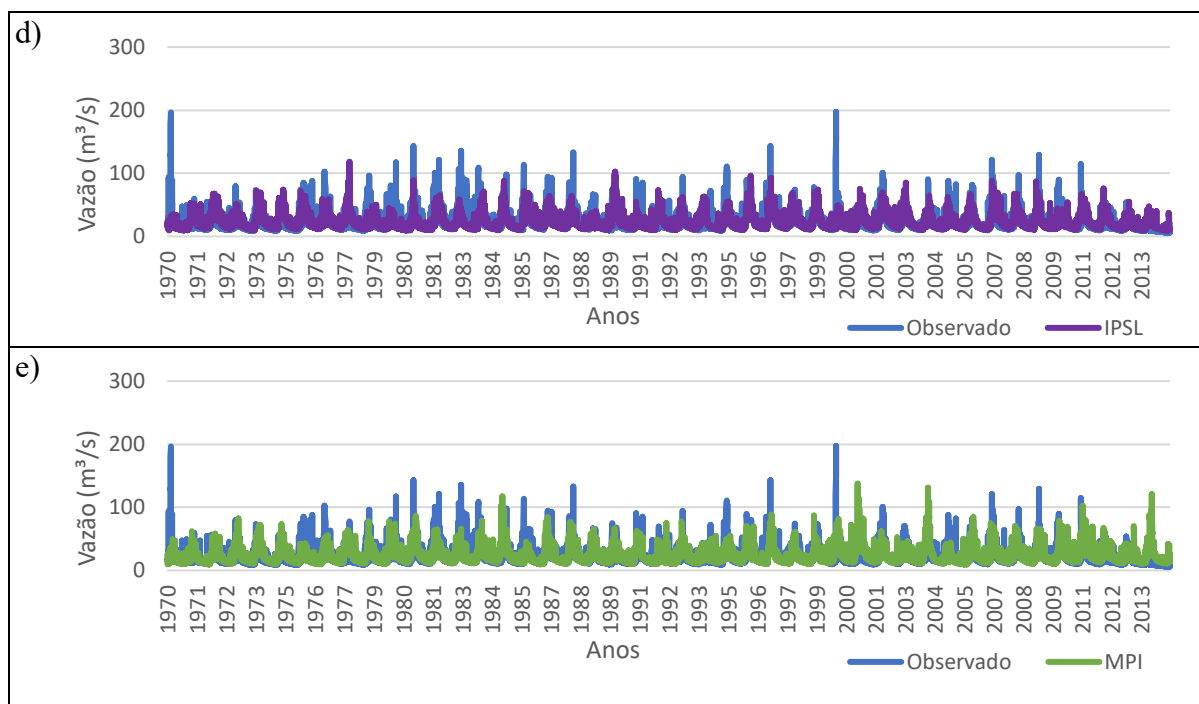


Figura 23 - Comparação entre os dados históricos observados e os dados históricos simulados para os modelos: (a) ACCESS, (b) CAN, (c) INM, (d) IPSL e (e) INM

Considerando o objetivo principal de avaliar a capacidade dos modelos de representar as tendências sazonais observadas nos dados históricos, é importante enfatizar que não é esperado que os modelos capturem com precisão os picos de vazão ou outros eventos extremos, pois esses extremos podem ser influenciados por eventos específicos e variáveis locais. Dessa forma, focaremos na análise da capacidade dos modelos de reproduzir a dinâmica sazonal geral e o comportamento médio das vazões, ao longo das estações do ano.

Na análise comparativa dos dados históricos observados com os dados simulados pelos modelos para o período histórico (Figura 23), nota-se que o modelo tem a capacidade de seguir a tendência geral dos dados históricos. Em alguns anos o modelo subestima ou superestima a vazão quando comparado com os dados históricos. Mas, apesar dessas variações pontuais, os modelos parecem capturar adequadamente a vazão média ao longo dos anos.

4.1.1 Climatologia

A análise da climatologia das vazões é fundamental para entender como cada modelo se alinha com as características hidrológicas da região. A análise comparativa da climatologia das vazões simuladas com dados observados e simuladas com dados dos modelos para o período histórico permite avaliar a capacidade dos modelos em representar a sazonalidade geral das vazões e consequentemente a habilidade desses de representar as vazões em cenários futuros. A figura 24 mostra a climatologia do período histórico simulada com dados observados e com dados dos modelos para a PCH Gabiru:

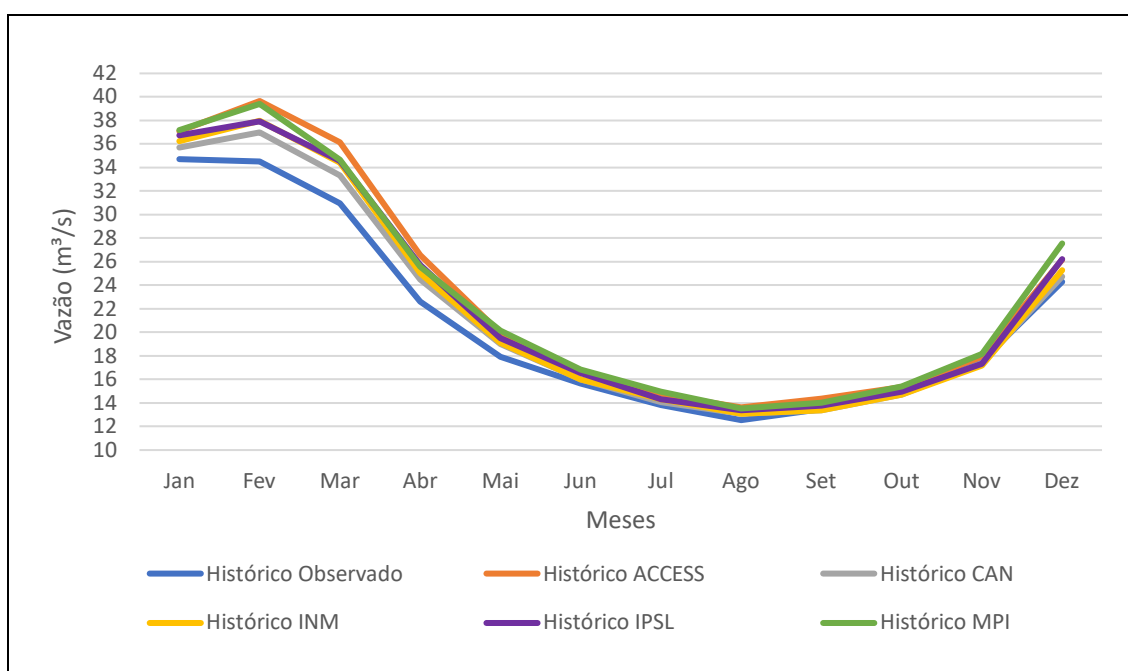


Figura 24 – Climatologia das vazões no período histórico para os dados observados e para os dados simulados pelos modelos analisados (PCH Gabiru)

De forma geral, todos os modelos capturam bem a sazonalidade das vazões, o que corrobora com a utilização destes modelos na previsão de cenários futuros. No entanto, pode-se observar uma superestimativa na maior parte do período analisado, com todos os modelos apresentando vazões projetadas superiores às observadas.

Durante o verão, a superestimativa se torna mais pronunciada, e a divergência entre os modelos é mais visível. Isso pode ser atribuído a diversos fatores, incluindo a complexidade inerente à modelagem de períodos mais úmidos pelos modelos meteorológicos. No verão, a ocorrência de forte atividade convectiva e a alta variabilidade

dos padrões de chuva apresentam um desafio para os modelos, que muitas vezes têm dificuldade em capturar esses eventos devido ao seu caráter pontual e distribuição irregular. Além disso, a interação entre vários processos atmosféricos e de superfície no modelo hidrológico, como a evapotranspiração e o armazenamento de água no solo, pode ser difícil de parametrizar corretamente, o que pode levar a projeções menos precisas durante esta estação.

Nos meses de outono, a superestimativa persiste, mas diminui consideravelmente em relação a superestimativa do verão. A consistência entre os modelos nessa estação de transição sugere uma melhor representação dos processos hidrológicos pelos modelos. O outono geralmente é caracterizado condições climáticas mais previsíveis e uma menor ocorrência de eventos extremos, o que simplifica a tarefa dos modelos de prever as vazões. As condições atmosféricas menos voláteis e a menor incidência de eventos climáticos extremos também facilitam uma representação mais precisa e uniforme entre os diferentes modelos, resultando em previsões mais consistentes.

Embora a análise da climatologia dos períodos históricos dos modelos tenha revelado uma superestimativa nas vazões, o que, em circunstâncias normais, justificaria a aplicação de uma correção de viés, optou-se por não realizar essa correção porque a superestimativa é relativamente pequena. Além disso, é importante considerar que a correção de viés, embora útil para ajustar as diferenças entre os dados modelados e observados, introduz uma camada adicional de incerteza ao processo. Isso ocorre porque tais correções dependem de metodologias que, por sua vez, baseiam-se em suposições e aproximações que podem não ser inteiramente precisas ou aplicáveis em todos os contextos. No caso desse estudo, que já envolve incertezas inerentes às simulações hidrológicas e projeções climáticas, adicionar mais um elemento potencialmente incerto poderia comprometer, em vez de melhorar, a clareza e a confiabilidade dos resultados.

4.1.2 Curva de Permanência

A curva de permanência é um instrumento estatístico utilizado para caracterizar a distribuição temporal de uma variável, sendo comumente utilizada na hidrologia para analisar as características da vazão em um curso de água. Este gráfico fornece uma

representação visual de quão frequentemente, ou por quanto tempo, diferentes vazões são iguais ou excedidas ao longo de um ano. Permitindo, assim, entender a regularidade ou variação dessas vazões.

A figura 25 mostra a curva de permanência do período histórico para a simulação com dados observados e para as simulações com dados históricos dos modelos utilizados, para a PCH Guaipava.

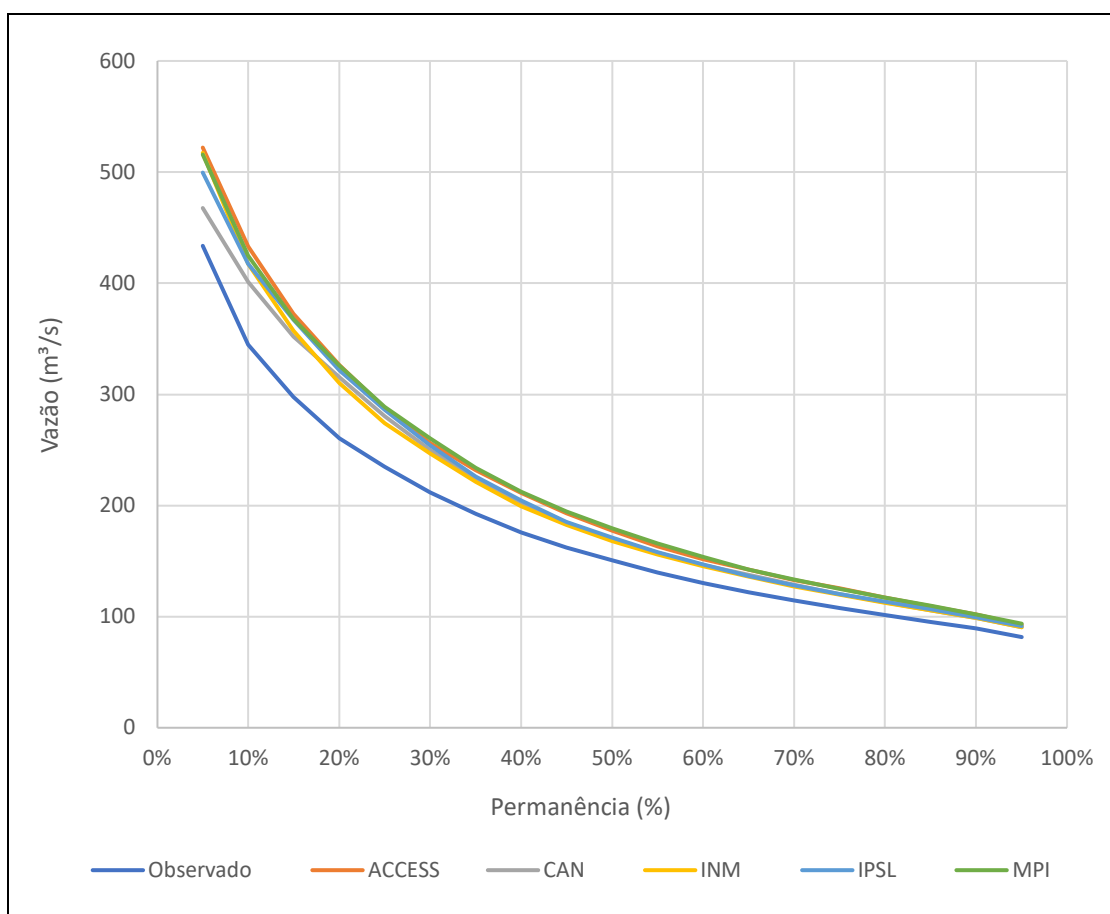


Figura 25 - Curva de permanência do período histórico para a simulação com dados observados e simulações com dados históricos dos modelos utilizados (PCH Guaipava)

A análise da curva de permanência revela que as projeções de vazão dos modelos tendem a superestimar as medidas observadas, com essa superestimativa se mostrando mais pronunciada nas maiores vazões e correspondentes menores permanências. Essa tendência indica que, nos eventos de pico de vazão, que ocorrem de forma menos frequente, os modelos tendem a estimar vazões mais altas do que as historicamente registradas. À medida que avançamos para vazões mais baixas e maiores permanências,

a superestimativa por parte dos modelos diminui, sugerindo que eles têm maior dificuldade em simular precisamente os eventos mais extremos, que são por natureza mais imprevisíveis e sujeitos a maior variabilidade.

Nas faixas de vazão mais elevada, observamos uma pequena variação entre os modelos. Essa pequena divergência pode ser decorrente das diferentes formas como cada modelo meteorológico representa os eventos de precipitação mais extrema, e, como o modelo hidrológicos representa, por sua vez, essas precipitações em vazão. Cabe salientar que entre as variações intermodelos, o modelo CAN apresenta a menor superestimativa, como observado também na climatologia.

Em contrapartida, nas faixas de menor vazão e maior permanência, os modelos tendem a concordar mais entre si e a superestimativa se torna menos acentuada. Isso sugere que os modelos estão mais alinhados e possivelmente mais acurados na simulação das condições hidrológicas que são mais frequentes e menos extremas.

A avaliação do desempenho das projeções dos modelos para o período histórico destaca uma caracterização eficiente quanto às variações sazonais e de permanência. Dessa forma, como os modelos representam bem as características gerais das variações hidrológicas da bacia do Sapucaí para o período histórico, podemos considerar que eles irão representar as características gerais dessas variações hidrológicas também para o período futuro. Podendo, assim, inferir que esses modelos são adequados para projetar as alterações hidrológicas em cenários futuros de mudança climática de maneira satisfatória.

4.2 Análise dos cenários de mudança climáticas nos aproveitamentos hidrelétricos

Para analisar o impacto dos cenários de mudanças climáticas sobre as vazões e a capacidade de produção de energia nos aproveitamentos hidroenergéticos utilizaremos as simulações dos períodos históricos dos modelos como ponto de referência. Isso nos permitirá avaliar o impacto potencial dessas alterações climáticas, através da comparação entre simulações de períodos futuros e período histórico.

Nessas análises, focaremos em dois aproveitamentos hidrelétrico, a PCH Gabiru, posicionada na porção mais a montante da bacia e a PCH Guaipava, localizada na porção mais a jusante. Analisando essas duas usinas, poderemos investigar como as mudanças climáticas afetam as áreas mais importantes para a geração hidrelétrica na bacia do Sapucaí, abordando também as diferenças nas vazões, das menores às maiores.

Além da análise da climatologia e das curvas de permanência, serão utilizadas também as anomalias dos cenários de mudança climática em relação ao período histórico. Essas anomalias destacam as disparidades entre as previsões futuras e os período histórico e contribuem para identificar os possíveis desvios nas vazões na geração de energia a partir do que era esperado. Ao combinar essas análises temos uma visão mais detalhada de como as usinas podem operar diante dos novos cenários climáticos, considerando cada modelo e cenário específico.

4.2.1 Análise das vazões nos aproveitamentos hidrelétricos

A análise das vazões é um componente essencial no estudos hidroenergéticos, pois reflete diretamente na capacidade de geração de energia das usinas hidrelétricas. Vazões adequadas são fundamentais para a manutenção da produção energética, enquanto variações nessas vazões podem impor desafios operacionais e econômicos para o setor.

Dentro do contexto das mudanças climáticas, o entendimento preciso das variações nas vazões torna-se ainda mais importante. As alterações previstas no clima podem resultar em padrões hidrológicos alterados, como mudanças nos períodos de seca e de chuva, afetando diretamente as vazões dos rios e, por consequência, o aproveitamento hidroenergético.

4.2.1.1 Climatologia

A figura 26 mostra a climatologia das vazões nos aproveitamentos Gabiru e Guaipava, para os modelos e cenários analisados:

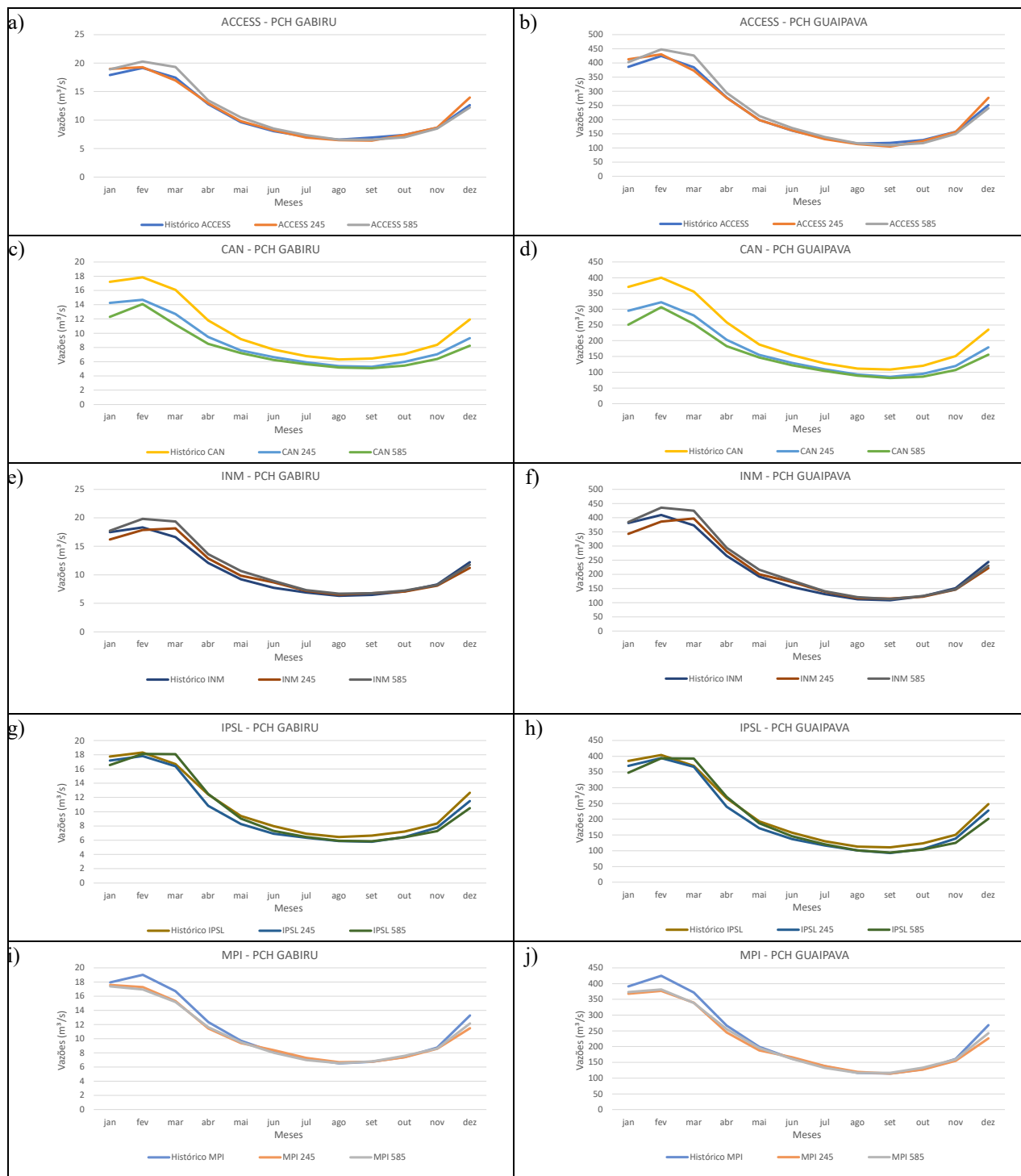


Figura 26 - Climatologia das vazões nos aproveitamentos analisados para os modelos: ACCESS (a,b); CAN (c,d); INM (e,f); IPSL (g,h) e MPI (i,j).

Para o modelo ACCESS (Figura 30 a,b) observamos um aumento notável nas vazões, do início até meados do ano, para ambos os aproveitamentos no cenário SSP5-8.5. Para o cenário SSP2-4.5 não há uma variação da vazão em relação ao período

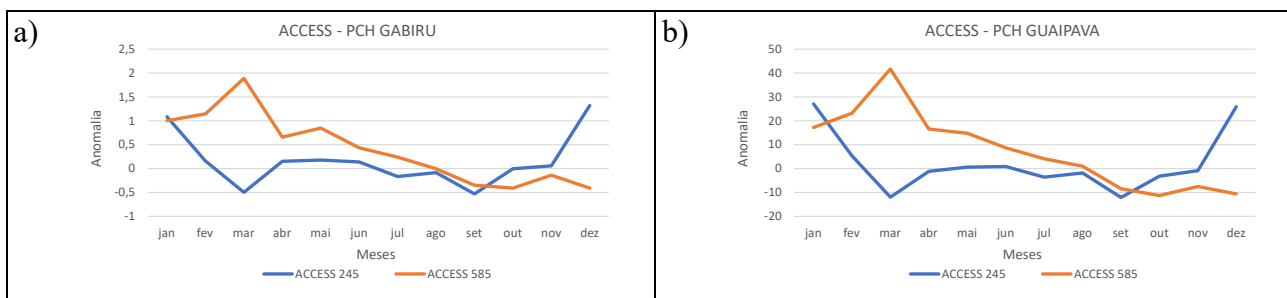
histórico, exceto no começo da estação chuvosa, onde há um incremento da vazão para ambos os aproveitamentos.

Analisando os resultados do modelo CAN para as PCH's Gabiru e Guaipava (Figura 30 c,d) percebemos padrões distintos em relação aos outros modelos analisados. As projeções de vazão para os cenários SSP2.4.5 e 5.8.5 ficam abaixo da vazão histórica em todo ano, sugerindo uma redução nas vazões futuras.

Para o modelo INM (Figuras 30 e,f) em ambos os aproveitamentos e cenários, há tendência de vazões ligeiramente acima das médias históricas na maior parte do ano. Já para nas projeções do modelo IPSL a linha histórica mostra um comportamento muito próximo aos cenários SSP2.4.5 e SSP5.8.5, com variações sutis entre eles. E para o modelo MPI (Figura 30 i,j), as projeções dos cenários seguem o mesmo padrão sazonal do período histórico, com uma pequena redução nas vazões na estação chuvosa para ambos os aproveitamentos Gabiru e Guaipava.

4.2.1.2 Anomalias

A anomalia de vazão é calculada como a diferença entre a média da vazão em um determinado período e a média de vazão para esse mesmo período em um registro histórico de referência. A figura 27 mostra as anomalias de vazão para os dois aproveitamentos hidrelétricos estudados, nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para todos os modelos analisados.



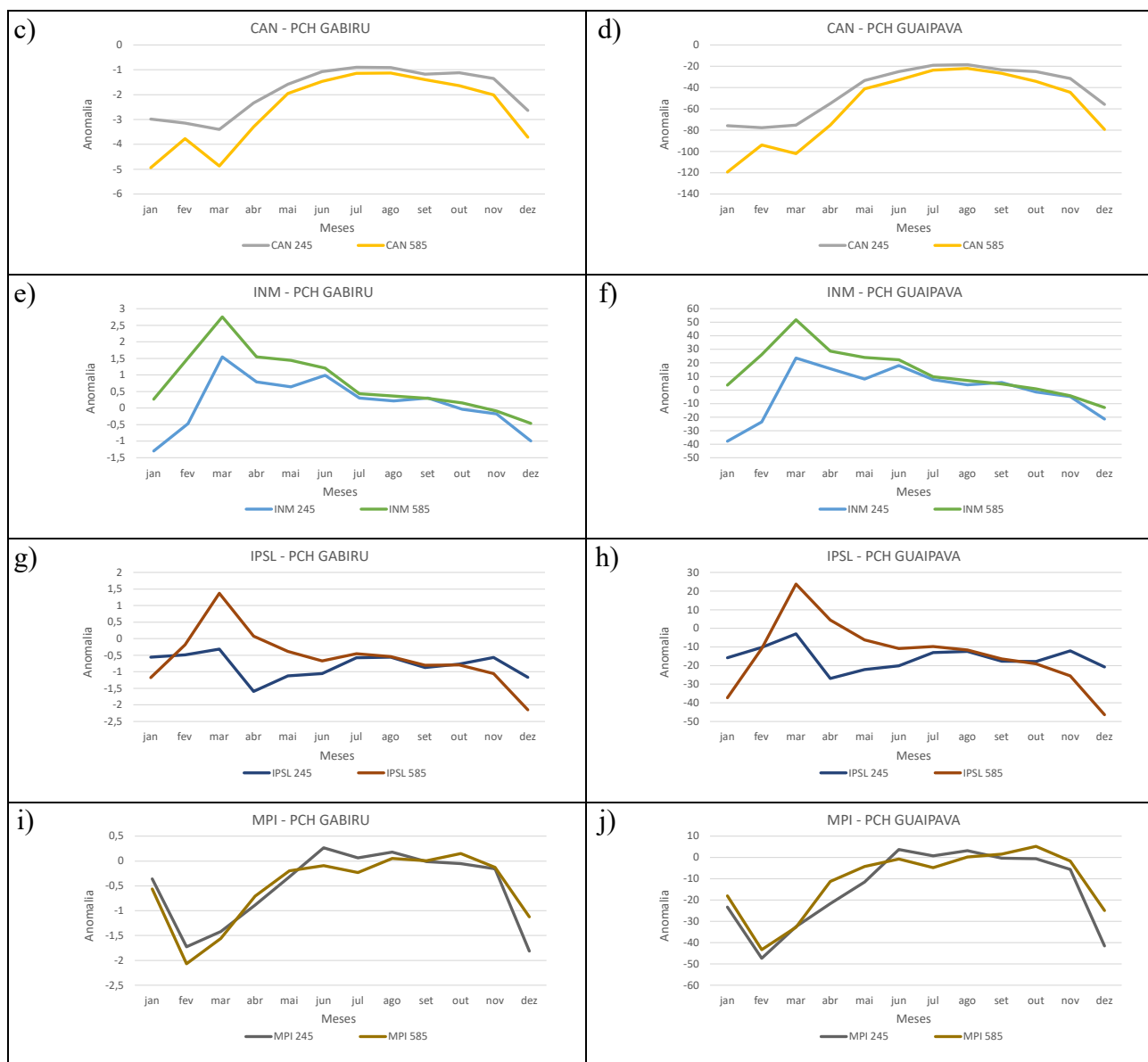


Figura 27 - Anomalias de vazão nos dois aproveitamentos analisados para os modelos: ACCESS (a,b); CAN (c,d); INM (e,f); IPSL (g,h) e MPI (i,j)

Os modelos ACCESS (Figura 31 a,b) e IPSL (Figura 31 g, h) exibem padrões semelhantes em termos de comportamento dependendo do cenário considerado, com previsões de aumento de vazão para a estação úmida no cenário SSP5-8.5 e previsão de diminuição da vazão no verão (ou outono para o modelo IPSL) no cenário SSP2-4.5. Já o modelo INM (Figuras 31 e, f) exibe padrões de anomalia positiva do verão até o inverno para os dois cenários.

O modelo MPI (Figura 31 i, j) também mostra um padrão consistente, mas na direção oposta, com uma diminuição das vazões que se estende do verão ao início do inverno em ambos os cenários e nos dois aproveitamentos hidrelétricos. O modelo CAN

(Figura 31 c,d) segue a tendência de redução nas vazões, no entanto, possui uma viés claro para subestimativa, intrínseco ao modelo.

4.2.1.3 Curva de Permanência

A figura 28 apresenta as curvas de permanência para a vazão para os aproveitamentos hidrelétricos e cenários estudados, incluindo a média histórica dos modelos nos cenários futuros.

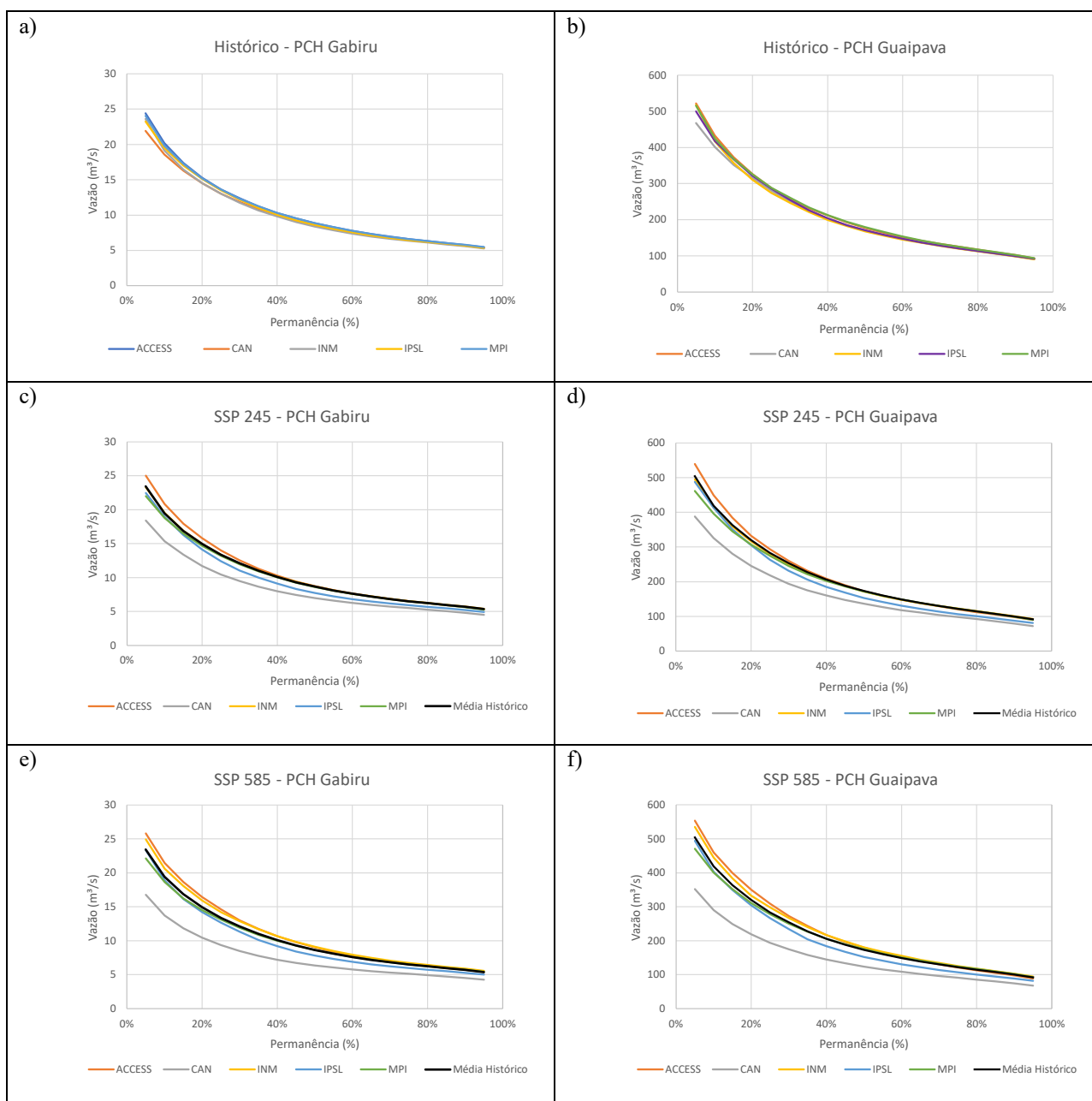


Figura 28 - Curva de permanência nos aproveitamentos Gabiru e Guaipava, para o período histórico e cenários futuros nos modelos analisados

Na figura 28, observa-se uma distribuição muito similar para todos os modelos, principalmente no cenário histórico. Para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 o modelo CAN se distancia dos demais, apresentando vazões mais baixas em todo. Cabe ressaltar que para as vazões mais altas e menores permanências há já uma pequena variação intermodelos, para os dois cenários futuros, o que pode estar relacionado com a maior dificuldade dos modelos em prever esses eventos de maiores vazões. A comparação direta dos dois cenários sugere que as mudanças climáticas podem não alterar significativamente a distribuição das vazões mínimas, mas há indícios de que as vazões máximas podem ter uma variabilidade maior.

As análises das vazões nos aproveitamentos estudados mostram uma tendência de aumento da vazão no cenário SSP5.8.5 em comparação com o histórico e com o cenário 2.4.5 nos modelos ACCESS, INM e IPSL. No cenário SSP2-4.5 essa tendência também aparece, mas de forma menos pronunciada e somente para o modelo ACCESS. Isso pode refletir uma expectativa de períodos chuvosos mais intensos ou prolongados nesses modelos, o que pode estar relacionado com impactos das mudanças climáticas.

Já no caso de vazões menores que as do período histórico durante o período analisado, ou especificamente na estação chuvosa, como demonstrado pelos modelos CAN e MPI, respectivamente, podemos inferir uma projeção com chuvas menos intensas ou menos frequentes em comparação ao padrão histórico. No entanto, devido as tendências de subestimativa previamente identificadas no modelo CAN, é importante destacar que essa subestimativa provavelmente reflete uma característica inerente ao próprio modelo.

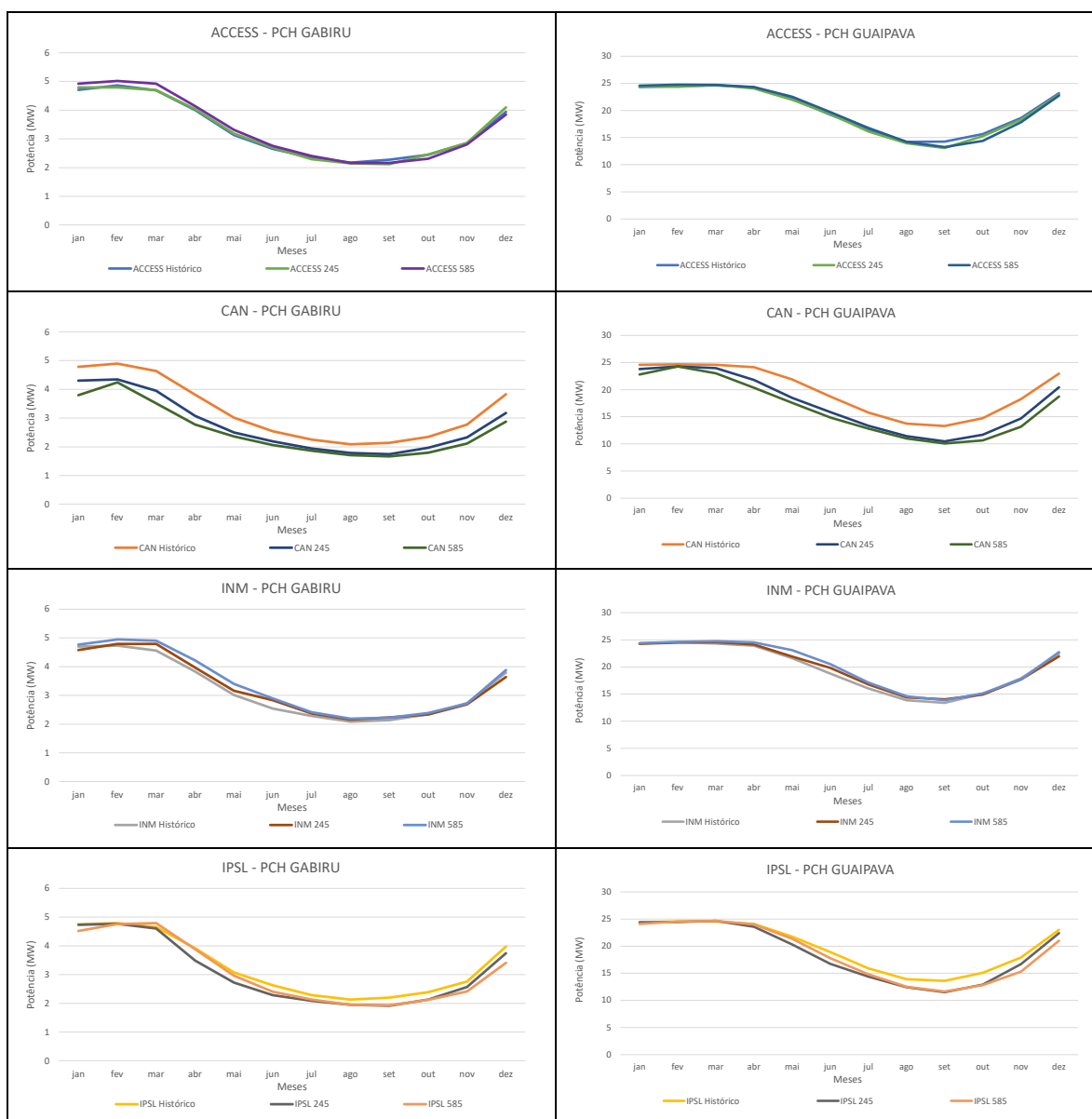
De forma geral, as análises das vazões mostram de maneira mais consistente uma tendência de aumento das vazões, principalmente em cenários de emissões mais intensas, o que pode ser explicado pelo aumento na ocorrência de eventos climáticos extremos (IPCC, 2021b) e a maior variabilidade na precipitação decorrente das mudanças climáticas (Wasti et al.,2021).

4.2.2 Análise das potências nos aproveitamentos hidrelétricos

Entender a capacidade de geração de energia em cada PCH em cenários de mudança climática é fundamental para identificar tendências de geração e possíveis alterações nas infraestruturas para garantir a resiliência da operação. Nas análises subsequentes apresentaremos o potencial de geração energética das PCHs diante dos cenários de mudanças climáticas e avaliaremos os impactos que tais mudanças podem ter na operação dessas usinas.

4.2.2.1 Climatologia

A figura 29 apresenta a climatologia das potências para os aproveitamentos e modelos utilizados:



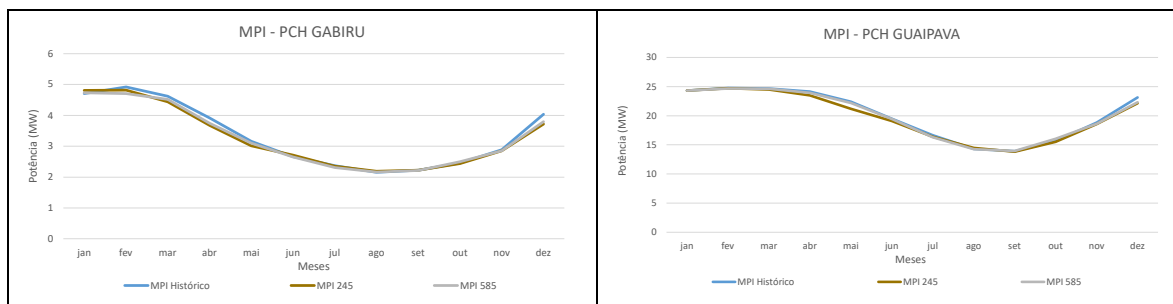


Figura 29 - Climatologia das potências nos aproveitamentos analisados para os modelos: ACCESS (a,b); CAN (c,d); INM (e,f); IPSL (g,h) e MPI (i,j)

A partir da análise da figura 29 é possível notar uma grande concordância entre o cenário histórico e os cenários futuros, com exceção do modelo CAN (Figura 33 c,d) onde os cenários futuros mostram subestimativa em relação ao período histórico. Além disso, destaca-se a maior extensão dos períodos de aproveitamento máximo na PCH Guaipava em relação à PCH Gabiru, assim como uma tendência de menor geração de energia durante a primavera em ambos os empreendimentos.

4.2.2.2 Anomalia percentual da potência média

A figura 30 mostra os resultados das anomalias percentuais da potência média. Nessa análise considera-se a variação da média da potência em relação à média histórica do período histórico. Isso permite identificar, percentualmente o quanto a potência se desvia da linha de base do período histórico.

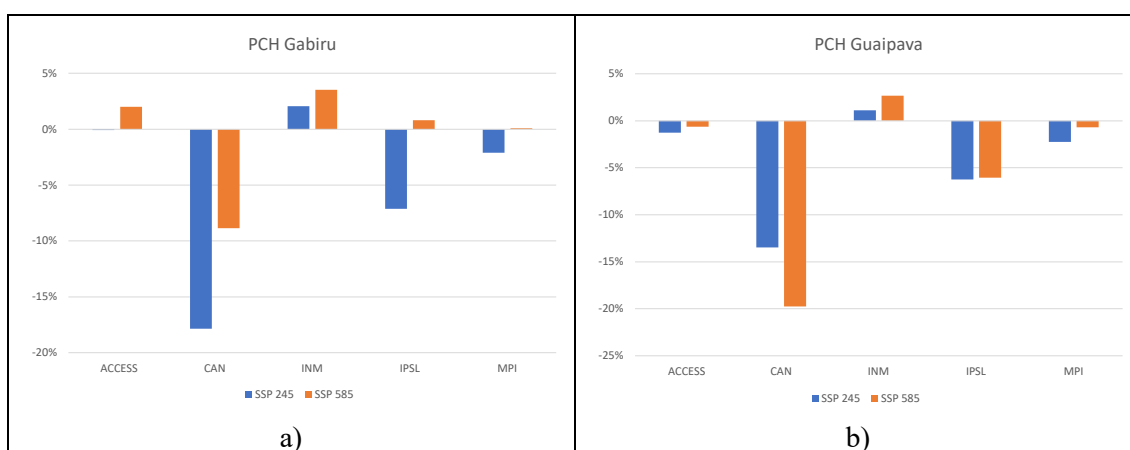


Figura 30 - Anomalias percentuais da potência média para os aproveitamentos Gabiru (a) e Guaipava (b).

Na análise de tendências anuais, é importante considerar que muitas tendências sazonais podem não estar caracterizadas, pois a média anual pode suavizar essas

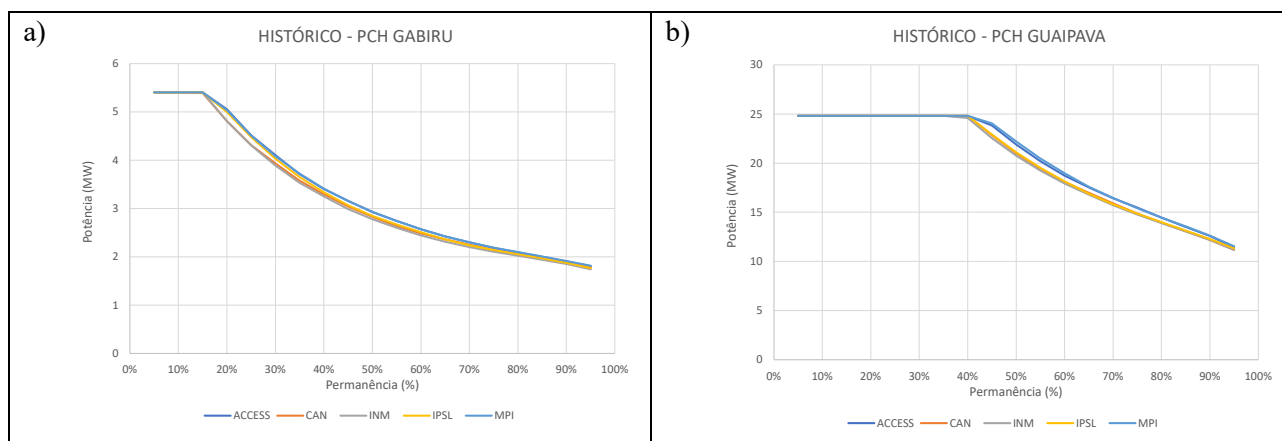
variações. Assim, um aumento na geração de energia durante a estação chuvosa pode ser compensado por uma diminuição durante a estação seca, resultando em pouca ou nenhuma mudança na média anual. Portanto, os resultados apresentados devem ser interpretados como tendências gerais.

Para a PCH Gabiru, o cenário SSP5.8.5 revela tendências positivas nos modelos ACCESS, INM e IPSL, indicando potenciais aumentos na potência média. No cenário SSP2.4.5, o modelo INM também aponta para um aumento, enquanto IPSL e MPI mostram uma diminuição. Já para a PCH Guaipava, no cenário SSP5.8.5, somente os modelos ACCESS e INM mostram um aumento na potência média, enquanto IPSL e MPI indicam uma diminuição. No cenário SSP2.4.5, novamente o INM é o único modelo que apresenta um aumento, com ACCESS, MPI e IPSL mostrando diminuições.

De forma geral, no cenário SSP5-8.5 notam-se tendências de aumento de potência, enquanto no cenário SSP2.4.5 nota-se uma tendência de diminuição da potência ou de um crescimento mais modesto. Além disso, assim como nas análises anteriores, o modelo CAN mostra um comportamento de subestimativa característico, dessa forma seu comportamento deve ser analisado com ressalvas.

4.2.2.3 Curva de Permanência

A figura 31 mostra as curvas de permanência para a potência nos aproveitamentos hidrelétricos e cenários estudados:



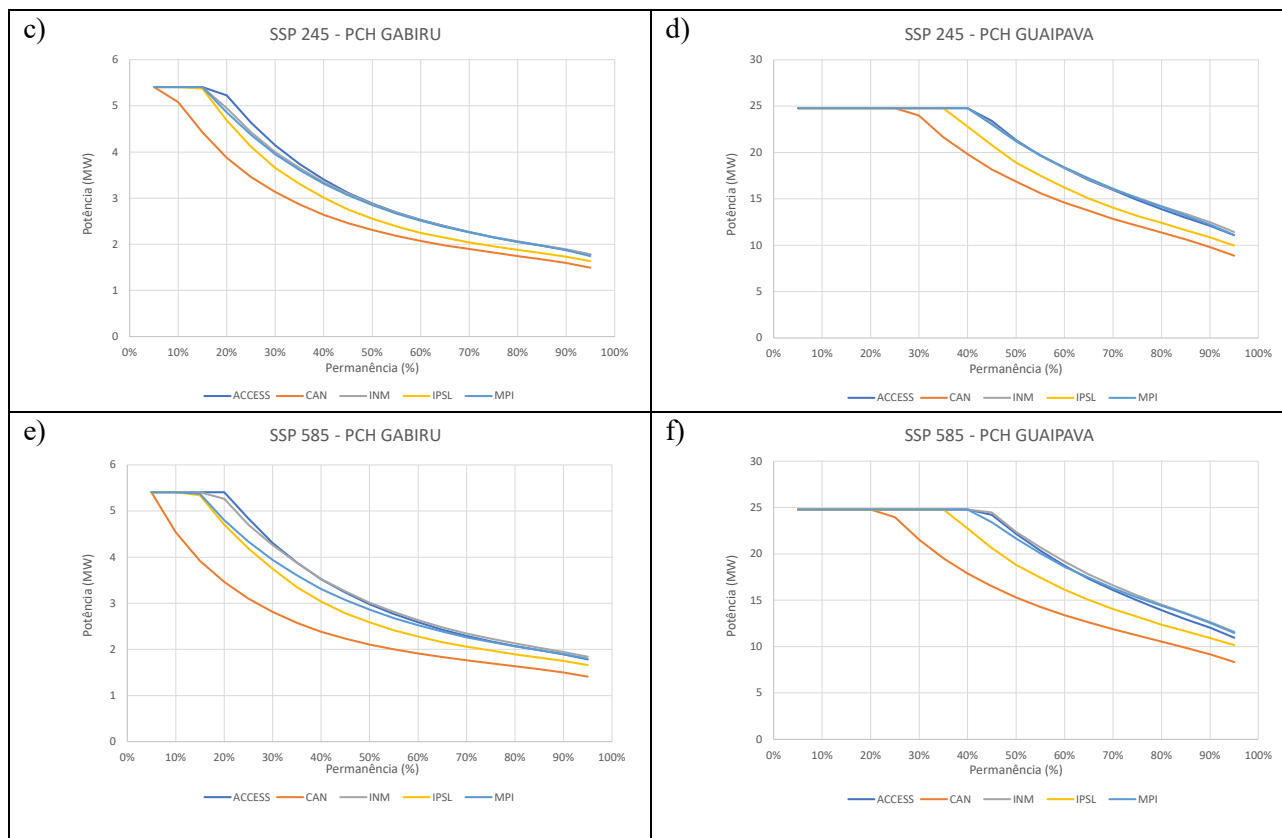


Figura 31 - Curva de permanência da potência nos aproveitamentos Gabiru e Guaipava, para o período histórico e cenários futuros nos modelos analisados

Analisando os diferentes aproveitamentos nota-se que o período de operação em máxima capacidade da PCH Guaipava é superior ao da PCH Gabiru. Além disso, para o período histórico os modelos mostram um comportamento muito similar entre si. Na PCH Gabiru nota-se uma tendência similar entre o período histórico e cenário SSP2-4.5 para o período de máxima operação. Já no cenário SSP5-8.5 há uma concordância de que o período máximo de operação seria aumentando para os modelos INM e MPI.

Para a PCH Guaipava o período de máxima operação no cenário SSP2-4.5 se mantém similar ao cenário histórico, nota-se no entanto uma ligeira diminuição desse período para o modelo IPSL. Já no cenário SSP5-8.5 não há tendência de diminuição do período de máxima operação em relação ao período histórico, no entanto, há uma projeção consistente de aumento do período máximo de operação para o modelo INM.

De forma geral observa-se que, sob cenários de mudanças climáticas, a potência gerada pelas PCHs tende a se manter estável ou exibir um aumento modesto em relação às médias históricas. Esse incremento é mais evidente no cenário SSP5-8.5, caracterizado

por emissões mais elevadas, em comparação ao cenário intermediário SSP2-4.5. Essas possíveis alterações podem ser atribuídas a modificações mais substanciais no ciclo hidrológico sob um regime de maiores emissões, o que pode acarretar um aquecimento global mais acentuado e, por consequência, em alterações nos padrões de chuva, vazão e das potências, também mais acentuado.

Essa tendência está alinhada com as previsões da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) de 2018, que antecipam um impacto pequeno ou ligeiramente positivo na geração hidrelétrica do Brasil, apesar das consideráveis variações regionais. Para a região Sudeste, essa visão sublinha a posição de transição entre o aumento de vazões previsto para o Sul (MARENGO et al., 2020) e a redução de vazões esperada para o Nordeste (LIMA et al., 2014), reforçando a previsão de um impacto moderado nas capacidades de geração hidrelétrica.

É importante considerar também que, para o intervalo temporal analisado neste estudo, que se estende até mais ou menos a metade deste século, as mudanças climáticas apresentam variações mais sutis em comparação às projeções para as décadas finais do século XXI. Esta diferença está em consonância com a progressão temporal dos efeitos climáticos, que tendem a se intensificar nas etapas posteriores, especialmente sob cenários de contínuas emissões de GEE. Assim, durante este intervalo inicial, as modificações observadas no ciclo hidrológico e os padrões de precipitação e vazão, alinham-se com uma trajetória de mudança mais branda, condizente com as projeções menos severas para este estágio inicial do século.

5. CONCLUSÕES

O impacto das mudanças climáticas na geração hidrelétrica é evidente, especialmente considerando o papel significativo da hidroeletricidade no mix energético do Brasil. Nesse contexto, é fundamental entender mais profundamente esses impactos para fundamentar a criação de estratégias adaptativas eficientes, visando assegurar a continuidade e sustentabilidade da produção de energia hidrelétrica. Neste estudo, analisamos o impacto das mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Sapucaí e, por extensão, em seu potencial de geração hidroenergética.

Os estudos de impacto da mudança climática, especialmente aqueles voltados para a geração hidrelétrica, enfrentam, além das dificuldades inerentes à sua natureza, uma cascata de incertezas. Esta cascata começa com a escolha de cenários de emissões de GEE, passa pela incerteza nas projeções climáticas geradas por diferentes modelos e alcança a aplicação destas projeções em modelos hidrológicos específicos para prever o comportamento futuro dos recursos hídricos. Cada etapa adiciona sua própria camada de incerteza, desde a grande variabilidade nas previsões climáticas até a dificuldade em capturar a complexa interação entre atmosfera, superfície terrestre e recursos hídricos. Portanto, torna-se essencial considerar os resultados destas análises como reflexos de tendências possíveis, evitando tratá-los como certezas.

Neste estudo, identificou-se que a potência gerada pelos aproveitamentos analisados tende a se manter estável ou mesmo exibir um modesto aumento em cenários de mudança climática do AR6 do IPCC, especialmente nos cenários de maiores emissões, como o SSP5-8.5. Essa tendência está de acordo com os prognósticos de mudanças climáticas para a bacia do Sapucaí; localizada na região Sudeste, uma área de transição entre as tendências de redução de vazões da região nordeste e das tendências de aumento das vazões da região sul.

Embora as tendências identificadas sejam relativamente conservadoras, elas desempenham um papel importante ao evidenciar a potencial confiabilidade desses aproveitamentos em cenários de incerteza climática. Este aspecto é particularmente

relevante para as PCH, que devido ao sua capacidade limitada de armazenamento, enfrentam uma vulnerabilidade acentuada às mudanças climáticas.

A antecipação e preparação para os efeitos das mudanças climáticas são mais eficazes do que a tentativa de mitigação desses efeitos após sua ocorrência. Dessa forma, incorporar projeções de mudanças climáticas na seleção de locais para novas usinas hidrelétricas, na atualização dos protocolos operacionais e no desenvolvimento de novos empreendimentos hidroenergéticos pode contribuir significativamente para ajustar as operações às novas realidades climáticas. Tal abordagem fortalece o direcionamento da política energética do país e fornece subsídio para enfrentar os desafios apresentados pelas mudanças climáticas ao mesmo tempo que explora suas oportunidades potenciais, assegurando a resiliência do setor hidroenergético brasileiro.

6. REFERÊNCIAS

ACCESS-NRI. (2024). Earth System Model 1.5 (ESM1.5).

ALEXANDRE, A. M. B.; FILHO, F. A. S.; CAMPOS, J. N. B. - Incorporação do Impacto da Rede de Reservatórios Superficiais Artificiais de Caráter Intranual na Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 18 n.2 –Abr/Jun 2013,67-82

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas / Ministério de Minas e Energia, CEPEL – Rio de Janeiro, 2007.

CANADIAN CENTRE FOR CLIMATE MODELLING AND ANALYSIS. The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3). Geosci. Model Dev., 12, 4823–4873, 2019.

CANESM USER GUIDE. Overview of CanESM. 2021.

CSIRO. (2024). Australian Community Climate and Earth System Simulator (ACCESS).

CENTRE DE MODÉLISATION DU CLIMAT DE L'INSTITUT PIERRE-SIMON LAPLACE (IPSL). IPSL-CM6A-LR: the latest version of the IPSL climate model.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 6, 2021

COLLISCHONN, W.; ALASSIA, D.; TUCCI, C.E.; PAZ, A.R., Coupling meteorological and hydrological models for medium-range streamflow forecasts in the

Parana Basin - Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management (Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007, Perugia, July 2007). IAHS Publ. 313, 2007.

COLLISCHONN, W. Hydrologic simulation of large basins (in Portuguese), PhD Thesis, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 200.

COLLISSCHONN, W.; SILVA, B.C.; ALLASIA, D.G.; TUCCI, C.E.M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling – Hidrological Sciences Journal 52 – 2007 DOI: 10.1623/hysj.52.5.878 pag -878- 895

COLLISCHONN, W.; GAMA, C.H.A.; SIQUEIRA, V.A; PAIVA, R.C.D.; FLEISCHMANN, A.S. 2020. Manual de Referência Teórica do MGB. HGE, IPH, UFRGS.

DUPONT, F. H., GRASSI, F., & ROMITTI, L. (2015). Renewable Energies: seeking for a sustainable energy matrix. Revista Eletrônica Em Gestão, Educação E Tecnologia Ambiental, 19, 70–81.

ELIAS, M., MOTA, G. O., FARIAS, R., MOTA, I. M., BOTELHO, M. P., ELIAS, G. T., MARANESI, D.A., SANTOS, D. F., PÁDUA, R. T., MIRANDA, D., ROCHA, R., GARCIA, G. Revisão dos Estudos de Inventário Hidrelétrico da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí – MG/SP - Minas PCH S/A e Guerra Lage Engenheiros Associados Ltda, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Mudanças Climáticas e Desdobramentos sobre os estudos de Planejamento Energético: Considerações Iniciais. – Documento de apoio ao PNE 2050 - 2018

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Matriz Energética e Elétrica, ABC da Energia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> Acesso: 12/06/2021

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2021, Ano base 2020, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2022, Ano base 2022, 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). NT EPE/DEA/SMA/018/2022. 2022

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Decenal de Expansão de Energia 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2023>.

ESPOSITO, C. P. T. Usina Hidrelétrica (UHE) Tipo Bulbo: Procedimento De Montagem Eletromecânica do Gerador. 2014

EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G. A.; SENIOR, C. A.; STEVENS, B.; STOUFFER, R. J.; AND TAYLOR, K. E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, Geosci. Model Dev., v.9, 2016.

FAN, F.M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica – Revista brasileira de recursos hídricos, volume 19 n.1 – Jan/mar 2014, 243-254

FAYAL, M. A. de A. 2008. Previsão de vazão por redes neurais artificiais e transformada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 158p.

FLEURY, L. C.; MIGUEL, J. C. H.; TADDEI, R. Mudanças climáticas, ciência e sociedade. Sociologias, Porto Alegre, ano 21, n. 51, maio-Ago 2019, p. 18-42 <http://dx.doi.org/10.1590/15174522-0215101>

FREITAS, M. A. V.; SOITO, J. L. S.. Energia e Recursos Hídricos: Vulnerabilidade, Impactos e Possibilidades de Adaptação às Mudanças Climáticas Globais. Parcerias Estratégicas (Brasília), v. 27, p. 177-216, 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, 2007.

GUTJAHR, O.; PUTRASAHAN, D.; LOHMANN, K.; JUNGCLAUS, J. H.; VON STORCH, J.-S.; BRÜGGEMANN, N.; HAAK, H.; STÖSSEL, A. Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). Geosci. Model Dev., v. 12, p. 3241–3281, 2019.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; REIS, L. B. Energia e Meio Ambiente – Tradução da 5ª edição Norte-Americana. 2017.

IGAM - PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ, Diagnóstico e Prognóstico. Belo Horizonte 2010

Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM). Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br>. Acesso 09/11/2022

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Disponível em <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/27.html>. Acesso 09/11/2022

IPCC, IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources, 2008

IPCC AR5 (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for Policymakers. In: STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P.M. (Eds). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to

the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, U.K. and New York, USA: Cambridge University Press, 2013, 27 pp.

IPCC, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report to the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2015.

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, 2022b: 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. Lösschke, 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.

IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: 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. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-33, doi:10.1017/9781009325844.001.

LIMA, José W. M.; COLLISCHONN, Walter; MARENGO, José A. Efeito das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica. Hunter Books Editora, São Paulo: AES Tietê, 2014.

LUCENA, A. F. P.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S. Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system - Global Environmental Change. Vol 20. 2009

LUCENA, A. F. P. Proposta Metodológica Para Avaliação Da Vulnerabilidade Às Mudanças Climáticas Globais No Setor Hidroelétrico. Tese De Doutorado, Rio De Janeiro 2010

MARENGO, J. A. (2008). Água e mudanças climáticas. Estudos Avançados, 22(63), 83-96.

MARENGO, J. A.; FILHO, S. R., SANTOS, D. V. Impactos, vulnerabilidade e adaptação à mudança do clima no Brasil: uma abordagem integrada Sustainability in Debate - Brasília, v. 11, n.3, p. 19-23, dez/2020.

MARENGO, J.; SOARES, W.; Impacto das mudanças climáticas no Brasil e Possíveis Futuros cenários climáticos: Síntese do terceiro relatório do IPCC 2001 Condições climáticas e recursos hídricos no Norte do Brasil. Chapter 6 in Clima e Recursos Hídricos 9. Associação Brasileira de Recursos Hídricos/FBMC-ANA. Porto Alegre, Brasil, pp 209-233.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; JUNIOR, J. C. Z.; FILHO, L. N. L. M. MODELOS HIDROLÓGICOS: CONCEITOS E APLICABILIDADES Revista de Ciências Ambientais, Canoas, v.6, n.2, p. 35 a 47, 2012 / ISSN 1981-8858

MEDEIROS, M. S.; Fleischmann, A. S.; OLIVEIRA, A.M.; CORATI, B. K.; FAN, F. M.; MARTINBIANCHO, G. K.; JARDIM, P. F.; CORREA, S. W.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W. Manual de Exemplo de aplicação do modelo MGB 2018 utilizando o IPH-Hydro Tools, 2019.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/ciencia_do_clima/painel_intergovernamental_sobre_mudanca_do_clima.html

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Plano Nacional de Adaptação. 2023. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao.html>. Acesso em: 29 abr. 2023.

MARQUES, V.S. Anuário do Instituto de Geociências, revistas.ufrj.br, 1992.

MOLION, L. C. B. Desmistificando o Aquecimento Global. *Intergeo*, v. 5, p. 13-20, 2007.

NETO, J. B. L. Planejamento da Segurança Hídrica em Cenário de Mudança Climática Considerando a Avaliação de Custos Múltiplos Mananciais. Tese de Doutorado UFC, 2020.

NERY, E. Mercados e Regulação de Energia Elétrica. Editora Interciência – Cigré Brasil, 2012.

OLIVEIRA FILHO, A. T. *et al.* Definição e delimitação de domínios e subdomínios das paisagens naturais do estado de Minas Gerais. In: SCOLFORO, J. R.;

OLIVEIRA, R. C. D., FAN, F. M., & PETRY, I. (2021). Balanço hídrico de longo termo utilizando o modelo de simulações hidrológicas MGB-IPH.

O'NEILL, B. C.; TEBALDI, C.; VAN VUUREN, D. P; EYRING, V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT, G.; KNUTTI, R.; KRIEGLER, E.; LAMARQUE, J.; LOWE, J.; MEEHL, G. A.; MOSS, R.; RIAHI, K.; SANDERSON, B. M. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci Model Dev.*, v. 9, 2016.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas Brasileiro de Energia Solar – INPE. 2º Edição, 2017

PRUDENTE, E. P. Procedimento para avaliação do aproveitamento hidroenergético máximo de uma bacia hidrográfica – Dissertação de mestrado – Itajubá MG 2017

REBOITA, M. S.; MARRAFON, V. H. A.; LLOPART, M.; DA ROCHA, R. P. CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PROJETADOS PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS Revista Brasileira de Climatologia Ano 14 – Edição Especial Dossiê Climatologia de Minas Gerais – NOV 2018 ISSN: 2237-8642 (Eletrônica) PAG 110 – 128

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. CONCEITOS BÁSICOS DE MODELAGEM HIDROLÓGICA, INPE, 2000

RENNÓ, C.D.; SOARES, J. V. Modelos hidrológicos para gestão ambiental. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf

ROCHA, V.M. Um breve comentário a respeito do IPCC AR6 – Revista Entre Lugar V. 13, n.24, 2021 - ISSN 2176-9559 REL/DOI 10.30612.

SÁ JÚNIOR, A. Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais. 2009. 101p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Lavras.

SANTOS, F. C., Ajuste do Modelo MGB-IPH à Bacia do Rio Sapucaí para Aplicação em Previsões de Vazão. UNIFEI, 2022

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; LUCENA, A. F. P.; BORBA, B. S. M.; NOGUEIRA, L. P. P.; FLEMING, F. P.; TROCCOLI, A.; HARRISON, M., BOULAHYA, M. S. Energy Sector Vulnerability to Climate Change: A Review. *Energy*, n° 38, 2012.

SILVA, Luciano José da. Avaliação do Mercado Potencial das Reduções Certificadas de Emissões para as Pequenas Centrais Hidrelétricas Outorgadas e Inventariadas no Brasil. Dissertação de Mestrado em - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

SIQUEIRA, P. C. Simulação hidrológica de cenários de uso do solo na bacia do rio Sapucaí. Dissertação de Mestrado, 2017.

SODRÉ, U. Modelos Matemáticos. Matemática - UEL - Londrina – 2007 (notas de aula).

TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. 2003. Clima e Recursos Hídricos no Brasil, Coleção ABRH, 348 p.

TUCCI, C. E. M., CLARKE, R. T., COLLISCHONN, W., DIAS, P. L. S. & SAMPAIO, G. Long term flow forecast based on climate and hydrological modeling: Uruguay River basin. *Water Resources Res.* 39(7), 1181, 2003.

TUCCI, C. E. M. MODELOS HIDROLÓGICOS, 2 edição, Porto Alegre, Editora da UFRGS, 2005.

VAN VLIET, M.T.H., L.P.H. VAN BEEK, S. EISNER, M. FLÖRKE, Y. WADA, AND M.F.P. BIERKENS, 2016: Multi-model assessment of global hydropower and cooling water discharge potential under climate change. *Glob. Environ. Change*, 40, 156-170.

VASQUEZ-ARROYO, E, GANDELMAN DA, DA SILVA F, MAGALAR L, SANTOS DV, LUCENA AFP (2020) Implications of climate change impacts for the Brazilian electricity mix / Implicações dos impactos das mudanças climáticas na matriz

elétrica brasileira, Sustainability in Debate - Brasília, v. 11, n.3, p. 5-7, dez/2020

VOLODIN, E. et al. INM INM-CM4-8 model output prepared for CMIP6. Earth System Grid Federation, 2019.

KAISER, I. M. Avaliação De Métodos De Composição De Campos De Precipitação Para Uso Em Modelos Hidrológicos Distribuídos – Tese De Doutorado, São Carlos, 2006

WARD, D. The effect of weather on grid systems and the reliability of electricity supply. Climate Change, n°121, 2013.

WASTI, A.; RAY, P.; WI, S.; FOLCH, C.; UBIERNA, M.; KARKI, P. Climate Change and the Hydropower Sector: A Global Review. Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang. 2022, 13, e757

World Wide Fund for Nature (WWF) Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/especiais/dia_do_meio_ambiente/mudancas_climaticas_adaptacao. Acesso em 20/10/2022.

XUE, P., ZHANG, C., WEN, W., PARK, E., JAKADA, H. Climate variability impacts on runoff projection under quantile mapping bias correction in the support CMIP6: An investigation in Lushi basin of China. Journal of Hydrology, 614, 2022.

ZÁKHIA, 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. Revista Brasileira de Meteorologia, v36, n 4, 2021.