

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Nathalia Drummond Marques da Silva

**AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DA VAZÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
BACIA DO RESERVATÓRIO DE NOVA PONTE, ALTO RIO ARAGUARI/MG**

Belo Horizonte

2022

Nathalia Drummond Marques da Silva

**AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DA VAZÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
BACIA DO RESERVATÓRIO DE NOVA PONTE, ALTO RIO ARAGUARI/MG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Diego Rodrigues Macedo

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Letícia Santos de Lima

Belo Horizonte

2022

S586a
2022

Silva, Nathalia Drummond Marques da.

Avaliação da resposta da vazão às mudanças climáticas na bacia do Reservatório de Nova Ponte, Alto Rio Araguari/MG [manuscrito] / Nathalia Drummond Marques da Silva. – 2022.

122 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Diego Rodrigues Macedo.

Coorientadora: Letícia Santos de Lima.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2022.

Área de concentração: Análise, Modelagem e Gestão de Sistemas Ambientais..

Bibliografia: f. 107-122.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Mudanças climáticas – Teses. 3. Energia hidrelétrica – Nova Ponte, Reservatório de (MG) – Teses. I. Macedo, Diego Rodrigues. II. Lima, Letícia Santos de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 911.2:519.6



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DA VAZÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO RESERVATÓRIO DE NOVA PONTE, ALTO RIO ARAGUARI/MG

NATHALIA DRUMMOND MARQUES DA SILVA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE, MODELAGEM E GESTÃO DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Dr. Diego Rodrigues Macedo - Orientador - UFMG
Dra. Leticia Santos de Lima - Coorientadora - UFMG
Dra. Sônia Maria Carvalho Ribeiro - UFMG
Dra. Danielle de Almeida Bressiani - Universidade Federal de Pelotas

Belo Horizonte, 01 de setembro de 2022.


Leticia Santos de Lima
06/10/2022



Documento assinado eletronicamente por **Diego Rodrigues Macedo, Chefe de departamento**, em 05/10/2022, às 16:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sonia Maria Carvalho Ribeiro, Professora do Magistério Superior**, em 06/10/2022, às 11:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Danielle de Almeida Bressiani, Usuário Externo**, em 06/10/2022, às 15:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1810636** e o código CRC **99CE3359**.

À bisa, vovó Maria, que transcendeu o mundo e agora voa bem alto!

Às minhas avós Inez e Ivone, que abriram tantos caminhos difíceis com coragem.

Ao meu grupo forte; meu radar: Ana Lúcia, Wilson, Luiz, Gabriela e Clarissa.

AGRADECIMENTOS

Quando pensei em ingressar no mestrado não imaginava que os primeiros desafios seriam relacionados à saúde mental. A partir disso, pude vivenciar a orientação indo muito além da Academia. Manter-me firme só foi possível devido à paciência e ao apoio do meu orientador, professor Diego Rodrigues Macedo e da minha coorientadora, professora Letícia Santos de Lima. A compreensão e gentileza com cada momento foram essenciais para a continuidade dessa Grande Jornada, que é o Mestrado. Agradeço pelos ensinamentos, pelas reuniões e conselhos em todos os primeiros passos que dei. Gostaria de agradecer também aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, que fizeram parte da minha formação e compartilharam tanto.

À turma de 2020/1, embora não tenhamos tido a oportunidade da convivência diária devido à pandemia (que nos pegou de surpresa), recordo-me com carinho dos momentos nos quais conseguimos nos apoiar. Obrigada a cada um pelo que partilhamos.

Agradeço à FAPEMIG e também à CEMIG/ANEEL (através do P&D-GT599 junto ao PROECOS) pelo apoio financeiro, fundamental para que eu pudesse me dedicar integralmente ao mestrado até o final. Em um momento de descaso e redução de investimentos em ciência por parte do governo federal, graças a instituições como essas a pesquisa brasileira ainda avança.

Ao Carlos Holanda, que forneceu dados de sua pesquisa, muito obrigada!

Obrigada também à professora Danielle Bressiani por todo incentivo e toda ajuda, crucial para o avanço da dissertação. Foi uma grande realização pessoal ter o seu auxílio.

Agradeço ao Luciano Sathler, integrante da Gerência de Planejamento Energético da CEMIG, pelo fornecimento de dados acerca do reservatório de Nova Ponte e pelas instruções, também fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho.

À Taiala Motta, agradeço por segurar comigo a minha barra e me trazer de novo ao centro com paciência, em cada nova semana.

Por fim, gostaria de agradecer à minha família, que foi meu suporte e meu incentivo em cada novo desafio, meu respiro em cada pausa e meu radar, guiando meus caminhos por cavernas escuras. Toda aquela escuridão ficou para trás e isso foi graças a todo esse amor, que não me deu outra saída a não ser experimentá-lo dentro de mim.

“Há que se aprender do rio o ritmo. Ao buscar o sal, seu curso não desfaz paisagem, mas se refaz em paisagem. Percorrendo o exato limite das montanhas e planícies, o rio cumpre a rota original esculpida pelo tempo, pacientemente.”

(Bartolomeu Campos Queirós. Minerações, 1991)

RESUMO

O Reservatório da Usina Hidrelétrica de Nova Ponte é o primeiro de um sistema de reservatórios em cascata para fins hidrelétricos no Rio Araguari, situado no Triângulo Mineiro, Minas Gerais, Brasil. Ele tem a função de regulação de três reservatórios a jusante, sendo também utilizado para irrigação, piscicultura e recreação. Além do reservatório para produção de energia elétrica, a Bacia do Reservatório de Nova Ponte (BRNP) apresenta grande aptidão agrícola. Devido à sua relevância para a região, o presente trabalho buscou avaliar como cenários de mudanças climáticas poderão alterar a vazão na BRNP, em um futuro de curto (2019 a 2040) e de médio prazo (2041 a 2060). Primeiro, a simulação da vazão foi executada no modelo hidrológico SWAT e passou pelos processos de análise de sensibilidade, calibração e validação *multi-site* no software SWAT-CUP, através do algoritmo SUFI-2. Após, foram efetuadas simulações da vazão com dois cenários futuros de mudanças climáticas propostos para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), gerados a partir do modelo francês CNRM-ESM2-1 e do modelo japonês MRI-ESM2-0, ambos parte do projeto CMIP6. A avaliação dos cenários na resposta hidrológica da BRNP indicou um possível aumento na vazão afluente mensal do Reservatório de Nova Ponte, assim como uma maior variação da vazão nos meses mais úmidos do ano (de outubro a março) e provável aumento na ocorrência de vazões afluentes extremas. Embora resultados de aumento na vazão sejam inicialmente favoráveis para os setores elétrico e agrícola, podem ter implicações na BRNP caso ocorram de forma inesperada. Assim, para que instituições e população possam se preparar para ocorrências futuras, os resultados deste trabalho poderão ser úteis para o desenvolvimento de estratégias de adaptação e redução de impactos das mudanças climáticas na vazão da BRNP.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. SWAT. Produção de energia hidrelétrica. Cenários futuros.

ABSTRACT

The Nova Ponte Hydroelectric reservoir is the first cascading reservoir system for hydropower purposes on the Araguari River, located in the Triangulo Mineiro, Minas Gerais State, Brazil. It regulates three downstream reservoirs and provides irrigation, fish farming, and recreational uses. In addition to the reservoir for electricity production, the Nova Ponte Reservoir Watershed (BRNP) has excellent agricultural potential. Due to its relevance to the region, the present work aimed to assess how climate change scenarios could alter the BRNP monthly streamflow in the short (2019 to 2040) and medium-term (2041 to 2060) future. First, streamflow simulation was performed in the SWAT hydrological model, and it went through the multi-site streamflow sensitivity analysis, calibration, and validation processes in the SWAT-CUP software through the SUFI-2 algorithm. Then, streamflow simulations were performed with two future climate change scenarios proposed for the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) generated from the French model CNRM-ESM2-1 and the Japanese model MRI-ESM2-0, both part of the CMIP6 project. The scenarios evaluation in the BRNP hydrological response indicated a possible increase in the monthly affluent streamflow of the Nova Ponte Reservoir, as well as a more significant variation in the streamflow of the year's wettest months (from October to March) and a probable increase in the occurrence of extreme affluent streamflow. Although the results of increasing streamflow are initially favorable for the electricity and agricultural sectors, they may have implications for BRNP if they occur unexpectedly. Thus, for institutions and populations to prepare for future occurrences, the results of this work may be useful for developing adaptation strategies and reducing climate change impacts on the BRNP streamflow.

Keywords: Hydrological modeling. SWAT. Hydropower production. Future scenarios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da Bacia do Reservatório de Nova Ponte na Bacia do Rio Araguari, Triângulo Mineiro.	44
Figura 2 - Totais anuais de chuva (mm) na região da Bacia do Reservatório de Nova Ponte considerando os 21 anos de dados, entre 1998 e 2018.	45
Figura 3 – Totais médios mensais de chuva (mm) calculadas a partir de 21 anos de dados (1998 a 2018), para a região da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.	45
Figura 4 - Médias mensais das temperaturas máximas, mínimas e médias (°C) obtidas a partir de 21 anos de dados (1998 a 2018).	45
Figura 5 - Classificação Climática de Köppen para a Bacia do Reservatório de Nova Ponte.	46
Figura 6 - Variação altimétrica na Bacia do Reservatório de Nova Ponte.	47
Figura 7 - Classes de declividade da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.	48
Figura 8 - Tipos de solos da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.	49
Figura 9 - Inserção da bacia no bioma Cerrado e classes de uso e cobertura do solo da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.	51
Figura 10 - Fluxograma das etapas a serem executadas.	52
Figura 11 - Distribuição de estações climáticas, pluviométricas e fluviométricas na bacia. ...	55
Figura 12 – Estações pluviométricas, estações meteorológicas e pontos dos modelos climáticos escolhidos* em relação aos pontos a partir dos quais serão interpolados.	57
Figura 13 - Fluxograma dos cenários desenvolvidos nesse trabalho.	66
Figura 14 - Padrão dos dados faltantes nas séries temporais de precipitação, vazão, temperatura máxima e temperatura mínima. Em azul foram plotados os dados observados e em cinza claro os dados faltantes. O eixo das abcissas (x) refere-se aos identificadores das estações nas quais os dados foram adquiridos, já o eixo das ordenadas (y) refere-se às datas (mês/ano).	69
Figura 15 – Sub-bacias e Unidades de Resposta Hidrológica distribuídas na Bacia do Reservatório de Nova Ponte.	71
Figura 16 - Divisão da Bacia do Reservatório de Nova Ponte em regiões e sub-regiões.	72
Figura 17 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a região A da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.	73

Figura 18 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a região B da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.	74
Figura 19 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a região C da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.	74
Figura 20 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a região D da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.	75
Figura 21 - Comportamento dos dados de vazão de entrada mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a região E da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.	75
Figura 22 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a sub-região A.1 da Bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x, o período de dados é expresso em mês/ano e no eixo y, a vazão defluente em m ³ /s.	79
Figura 23 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a sub-região A.2 da Bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x, o período de dados é expresso em mês/ano e no eixo y, a vazão defluente em m ³ /s.	79
Figura 24 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a sub-região A.3 da Bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x, o período de dados é expresso em mês/ano e no eixo y, a vazão defluente em m ³ /s.	80
Figura 25 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a sub-região C.1 da Bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x, o período de dados é expresso em mês/ano e no eixo y, a vazão defluente em m ³ /s.	80
Figura 26 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal, observados e simulados, nos períodos de calibração (1998-2012) e validação (2013-2018) para a região A da bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x verifica-se o período considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m ³ /s.	84
Figura 27 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal, observados e simulados, nos períodos de calibração (1998-2012) e validação (2013-2018) para a região B da bacia do	

Reservatório de Nova Ponte. No eixo x verifica-se o período considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m ³ /s.....	85
Figura 28 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal, observados e simulados, nos períodos de calibração (1998-2012) e validação (2013-2018) para a região C da bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x verifica-se o período considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m ³ /s.....	85
Figura 29 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal, observados e simulados, nos períodos de calibração (1998-2012) e validação (2013-2018) para a região D da bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x verifica-se o período considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m ³ /s.....	86
Figura 30 - Comportamento dos dados de vazão de entrada mensal, observados e simulados, nos períodos de calibração (1998-2012) e validação (2013-2018) para a região E da bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x verifica-se o período considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões afluentes em m ³ /s.....	86
Figura 31 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal, observados e simulados, no período total considerado (1998-2018) para a sub-região A.1 da bacia do Reservatório de Nova Ponte no processo de validação cruzada. No eixo x verifica-se o período de considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m ³ /s.....	88
Figura 32 - Comportamento dos dados de vazão mensal, observados e simulados, no período total considerado (1998-2018) para a sub-região A.2 da bacia do Reservatório de Nova Ponte no processo de validação cruzada. No eixo x verifica-se o período de considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m ³ /s.....	89
Figura 33 - Comportamento dos dados de vazão mensal, observados e simulados, no período total considerado (1998-2018) para a sub-região A.3 da bacia do Reservatório de Nova Ponte no processo de validação cruzada. No eixo x verifica-se o período de considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m ³ /s.....	89
Figura 34 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal, observados e simulados, no período total considerado (1998-2018) para a sub-região C.1 da bacia do Reservatório de Nova Ponte no processo de validação cruzada. No eixo x verifica-se o período de considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m ³ /s.....	90
Figura 35 - Série temporal da vazão afluente (m ³ /s) ao Reservatório de Nova Ponte obtida junto ao SAR (ANA, 2022) no período histórico e nas janelas de previsão (p1 e p2) segundo a) modelo CNRM-ESM2-1 e cenário 1 (C1); b) modelo CNRM-ESM2-1e cenário 2 (C2) c) modelo MRI-ESM2-0 e C1; d) modelo MRI-ESM2-0 e C2.....	92

Figura 36 - Vazão histórica afluyente (m^3/s) do reservatório de Nova Ponte no cenário de referência (1-vazão histórica SAR/ANA) e vazão afluyente estimada (m^3/s) por meio do modelo CNRM-ESM2-1 no (a) cenário 1 (SSP2 4.5) e no (b) cenário 2 (SSP5 8.5) nos meses mais secos (abril a setembro) e mais úmidos (outubro a março) para os dois períodos futuros analisados (p1=2019 a 2040, p2=2041 a 2060)..... 94

Figura 37 - Vazão histórica afluyente (m^3/s) do reservatório de Nova Ponte no cenário de referência (1-vazão histórica SAR/ANA) e vazão afluyente estimada (m^3/s) por meio do modelo MRI-ESM2-0 no (a) cenário 1 (SSP2 4.5) e no (b) cenário 2 (SSP5 8.5) nos meses mais secos (abril a setembro) e mais úmidos (outubro a março) para os dois períodos futuros analisados (p1=2019 a 2040, p2=2041 a 2060)..... 96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critérios associados a cada modelo.....	30
Quadro 2 - Fontes e tipos de dados a serem utilizados.....	53
Quadro 3 - Parâmetros iniciais escolhidos para a realização da análise de sensibilidade da vazão do modelo da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.....	61
Quadro 4 - Modelos ESM selecionados, associados ao país no qual foram desenvolvidos, resolução do dado original e exemplo de trabalhos brasileiros que os utilizaram.	64
Quadro 5 - Parâmetros selecionados para calibração do modelo da Bacia do Reservatório de Nova Ponte, forma de alteração no SWAT-CUP e intervalo inicial. A descrição dos parâmetros está disponível no Quadro 5.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias de extensões de bacias e descrição.....	29
Tabela 2 - Estações fluviométricas, sub-bacias relacionadas e valores dos parâmetros Alpha_BF calculados.....	59
Tabela 3 - Parâmetros selecionados para avaliação da calibração do modelo da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.	62
Tabela 4 - Localização geográfica dos pontos referentes a cada um dos modelos.	64
Tabela 5 - Estações na base de dados do projeto, período de dados da série histórica e dados válidos entre 1998 e 2018.....	70
Tabela 6 - Estatísticas obtidas para a vazão observada (m^3/s), a vazão inicialmente simulada (m^3/s) para as regiões definidas.	77
Tabela 7 - Resultados obtidos sobre o desempenho da simulação inicial realizada no modelo SWAT da variável vazão mensal defluente nas regiões A, B, C e D da bacia, e da vazão mensal afluente na região E, de acordo com os indicadores NS, PBIAS e RSR.	78
Tabela 8 - Estatísticas obtidas para a vazão observada (m^3/s) e a vazão inicialmente simulada (m^3/s) para as sub-regiões definidas.	81
Tabela 9 - Resultados acerca do desempenho da simulação inicial realizada no modelo SWAT da variável vazão mensal defluente nas sub-regiões da Bacia do Reservatório de Nova Ponte, de acordo com os indicadores NS, PBIAS e RSR.....	82
Tabela 10 - Parâmetros selecionados para calibração e os valores resultantes para cada região após a execução desse processo.	84
Tabela 11 - Resultados obtidos sobre o desempenho dos processos de calibração e validação da vazão das regiões da bacia de acordo com os indicadores NS, PBIAS e RSR.....	87
Tabela 12 - Resultados obtidos sobre o desempenho do processo de validação cruzada da vazão defluente das sub-regiões A.1, A.2, A.3 e C.1 de acordo com os indicadores NS, PBIAS e RSR.de acordo com os indicadores NS, PBIAS e RSR.	91
Tabela 13 - Análise descritiva da vazão (m^3/s) no Reservatório de Nova Ponte segundo modelo, cenário e período avaliado.....	93
Tabela 14 - Resultado do teste de Levene para o modelo CNRM-ESM2-1 nos cenários e períodos avaliados.	95
Tabela 15 - Resultado do teste de Levene para o modelo MRI-ESM2-0 nos cenários e períodos avaliados.	97

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo geral	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	BREVE INTRODUÇÃO AOS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	20
2.2	EXEMPLOS DE MODELOS DE ACORDO COM A LITERATURA	22
2.2.1	Modelo Stanford (CRAWFORD; LINSLEY, 1966)	22
2.2.2	TOPMODEL (BEVEN et al., 1984; BEVEN; KIRKBY, 1979).....	23
2.2.3	VIC (LIANG et al., 1994).....	24
2.2.4	MIKE SHE (REFSGAARD; STORM, 1995)	25
2.2.5	SWAT (ARNOLD et al., 1998; SRINIVASAN; ARNOLD, 1994).....	26
2.2.6	HEC-HMS (FELDMAN, 2000)	27
2.2.7	MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN et al., 2007).....	28
2.3	SELEÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO PARA ESTA PESQUISA	28
2.4	DESCRIÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT	31
2.5	APLICAÇÕES DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT	35
2.6	LIMITAÇÕES DO USO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT	37
2.7	BREVE INTRODUÇÃO AOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	38
2.8	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS POLÍTICAS DE GESTÃO HÍDRICA NO BRASIL FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	41
3	MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1	ÁREA DE ESTUDO	43
3.1.1	Localização	43
3.1.2	Clima.....	44
3.1.3	Topografia.....	47
3.1.4	Solos.....	48
3.1.5	Cobertura vegetal e usos da terra na bacia.....	50
3.2	FLUXOGRAMA DAS PRINCIPAIS ETAPAS	51
3.3	MATERIAIS UTILIZADOS PARA MODELAGEM DA VAZÃO PASSADA E FUTURA	52
3.3.1	Versão do modelo e softwares	53
3.3.2	Fonte dos dados	53

3.3.2.1	Dados geográficos de entrada	53
3.3.2.2	Dados tabulares de entrada	54
3.4	MODELAGEM, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	56
3.5	APLICAÇÃO DE CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	63
3.5.1	Pré-processamento dos dados de projeções de clima	63
3.5.2	Simulação da vazão mensal ante cenários de mudanças climáticas	66
4	RESULTADOS	68
4.1	AVALIAÇÃO DOS DADOS DE CLIMA E VAZÃO	68
4.2	SUB-BACIAS E URHS DO RESERVATÓRIO DE NOVA PONTE NO SWAT ..	71
4.3	DEFINIÇÃO DE REGIÕES E SUB-REGIÕES NA BACIA	71
4.4	SIMULAÇÃO INICIAL DA VAZÃO MENSAL NO MODELO SWAT E DADOS HISTÓRICOS OBSERVADOS	73
4.4.1	Regiões A, B, C, D e E	73
4.4.2	Sub-regiões A.1, A.2, A.3, C.1	78
4.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	82
4.6	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DAS REGIÕES A, B, C, D, E.....	83
4.7	VALIDAÇÃO CRUZADA DAS SUB-REGIÕES A.1, A.2, A.3, C.1.....	88
4.8	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE VAZÃO MENSAL FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	91
4.9	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE OS MESES ATUALMENTE MAIS SECOS E MAIS ÚMIDOS PARA CADA CENÁRIO AVALIADO.....	94
4.9.1	Cenários com dados do modelo CNRM-ESM2-1	94
4.9.2	Cenários com dados do modelo MRI-ESM2-0.....	96
5	DISCUSSÃO	98
5.1	INCERTEZAS NA MODELAGEM	102
5.2	LIMITAÇÕES NA MODELAGEM DA BACIA DO RESERVATÓRIO DE NOVA PONTE.....	103
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	106

1 INTRODUÇÃO

Os impactos causados por eventos climáticos extremos cada vez mais graves e frequentes, como o desabastecimento de água e alimentos, a degradação do solo em terras agrícolas, restrição na geração de energia hidrelétrica, inundações e destruição de residências, áreas urbanas e infraestrutura, revelam a grande vulnerabilidade dos sistemas socioambientais às alterações do clima (IPCC, 2014, 2022a). Alterações climáticas são, em geral, naturais e sempre ocorreram, de tempos em tempos, na dinâmica planetária. Porém, há o fator antropogênico, que as têm acentuado gravemente (TRENBERTH, 2018). Reveses como os citados anteriormente, com perdas e danos relacionados, têm sido atribuídos às mudanças climáticas induzidas pelo ser humano e consequentes implicações nos sistemas naturais, como derretimento de geleiras e aumento do nível do mar, acidificação dos oceanos e modificações na intensidade e variabilidade espaço-temporal das estações secas e chuvosas (IPCC, 2022a).

Embora geologicamente recentes, as atividades humanas têm sido um fator dominante nas mudanças ambientais em escala global, inclusive na composição da atmosfera e superfície terrestre (BRENNER, 2019; LEWIS; MASLIN, 2015). Tamanha é a intensidade dessas mudanças que cientistas têm se referido ao presente como um novo tempo geológico. Dentro da Era Cenozoica, o efeito de ações antrópicas teria iniciado a “Época do Antropoceno” (LEWIS; MASLIN, 2015). Nesse contexto, um importante ponto de inflexão dessas influências sobre o meio ambiente foi a Revolução Industrial. Desde 1850, quando a industrialização começou a ganhar relevância mundialmente, concentrações de dois dos gases impulsionadores do efeito estufa (GEE), dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), cresceram exponencialmente na atmosfera (RUDDIMAN, 2013). Embora em condições normais o fenômeno do efeito estufa permita a vida na Terra, sua intensificação tem sido preocupante uma vez que ocasiona um incremento atípico na temperatura global (NOBRE; REID; VEIGA, 2012). Além da industrialização e da utilização de derivados do petróleo, esse aumento também pode ser atribuído a outros fatores, tais como desmatamento crescente de áreas de vegetação nativa; conversão dessas áreas em pastagens e monoculturas; além da urbanização desordenada (IPCC, 2018; PBMC, 2016).

Os efeitos das mudanças climáticas são primeiramente percebidos pela população através da água, uma vez que, com o incremento das temperaturas médias globais, modificações no ciclo hidrológico estão sendo regularmente observadas em várias partes do mundo (ANA, 2016; UNESCO; UN-WATER, 2020). Estas alterações têm ocorrido, sobretudo, nos padrões da precipitação e, por consequência, na disponibilidade e distribuição

temporal da vazão dos rios, bem como na frequência de eventos hidrológicos críticos (ANA, 2016). Quando atingem locais habitados, podem ocorrer desastres associados ao excesso de água. As inundações e os deslizamentos de terra decorrentes de fortes chuvas em Petrópolis, Rio de Janeiro, em 2022, exemplificam essa questão (LONDE et al., 2014; SILVA, 2022). Calamidades podem também estar associadas à escassez de água: estiagem, seca e dificuldades no abastecimento de água potável, tal qual a crise hídrica vivenciada em São Paulo em 2014 (LONDE et al., 2014).

As mudanças climáticas podem afetar também a qualidade das águas, a qual é determinada principalmente pelas concentrações de contaminantes e seu grau de diluição em sistemas hídricos superficiais (JALLIFFIER-VERNE et al., 2015; QIU et al., 2020). O escoamento superficial, ao ser alterado de acordo com mudanças nos padrões de precipitação, influencia no carreamento de sedimentos e nutrientes do solo para a água (SODRÉ, 2012). Eventos extremos, como o aumento na frequência de inundações, também podem levar à poluição da água através do transbordamento de sistemas de esgoto, ou pelo escoamento de águas urbanas não tratadas para corpos d'água, além da contaminação da água por agrotóxicos aplicados ao solo (QIU et al., 2020; SODRÉ, 2012). Garantir a disponibilidade de água de qualidade é uma das principais preocupações para o futuro, já que é um fator limitante para as mais diversas atividades (OLIVEIRA et al., 2017). No Brasil, além do abastecimento público, irrigação e produção de alimentos (agricultura, aquicultura e pesca), produção industrial e mineração, a água tem papel central na manutenção da matriz elétrica nacional, gerada predominantemente por usinas hidrelétricas (OLIVEIRA et al., 2017; TUNDISI, 2008).

Para auxílio à tomada de decisão e gerenciamento dos recursos hídricos, modelos hidrológicos utilizam um sistema complexo de equações (BESKOW et al., 2016). Entre os vários modelos hidrológicos existentes, muitos são auxiliados por Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Os modelos hidrológicos podem ainda ser associados a cenários gerados por modelos climáticos, produzindo cenários potenciais a respeito das implicações das alterações do clima nos recursos hídricos (FICKLIN et al., 2009). A criação desses cenários permite relacionar a informação científica com os processos de tomada de decisão, comunicando as diversas trajetórias que os processos hidrológicos podem assumir. Os cenários chamam a atenção para desenvolvimentos atuais e ajudam a definir as melhores condutas preventivas a consequências indesejáveis (PEREIRA et al., 2009).

Em escala global, aumentos projetados na temperatura atmosférica e da superfície oceânica, acarretam mudanças na evaporação e precipitação sobre oceanos e continentes e,

portanto, no ciclo global da água (IPCC, 2014, 2018). Quanto ao ciclo hidrológico em escala regional e local, o aquecimento tende a causar maiores taxas de evapotranspiração de água da superfície terrestre, de corpos d'água e da vegetação e, portanto, potencialmente uma menor infiltração e recarga de aquíferos (NOBRE, 2001). A variação da vazão é governada pela relação entre evapotranspiração e precipitação, mas dado que em uma mesma localidade a evapotranspiração apresenta menor variabilidade que a precipitação, a mudança no padrão de vazão é mais dependente da chuva do que da evapotranspiração (COLLISCHONN; TUCCI, 2014). Em vista disso, considerando todos esses aspectos, a hipótese deste trabalho é que, devido às mudanças climáticas, as alterações no ciclo hidrológico (i.e., aumento de temperatura conduzindo a aumento da evapotranspiração, além de alterações na variabilidade da precipitação) conduzirão a uma redução da vazão na área de estudos.

A Bacia do Reservatório de Nova Ponte (BRNP) é composta pelo reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Nova Ponte, localizado na cabeceira do Rio Araguari em Minas Gerais, Brasil. É o primeiro de um sistema de reservatórios em cascata para fins hidrelétricos nesse mesmo rio, regulando três outros reservatórios a jusante (LIMA, 2017; SALLA et al., 2013). O reservatório tem também outros usos, sendo utilizado para irrigação, piscicultura e recreação (CEMIG, 2011). No entorno do reservatório são observadas propriedades rurais por toda a extensão da bacia analisada, com presença de grandes áreas de cultivos agrícolas e pastagens (PEREIRA; MACEDO, 2017).

Sendo assim, ao avaliar a disponibilidade hídrica frente a cenários de mudanças climáticas na BRNP, o objeto do estudo permitirá compreender impactos prováveis tanto ao setor elétrico quanto agrícola, pois são altamente dependentes de água acessível. Quanto ao setor elétrico, o sistema nacional é interligado e permite o intercâmbio de eletricidade entre as regiões brasileiras. Considerando que a água é a principal fonte de energia no país, a modificação dos padrões esperados da vazão na BRNP pode ter consequências para além da área de estudos (ONS, 2021). Impactos, aparentemente isolados nas bacias hidrográficas brasileiras, podem gerar uma reação em cadeia na produção de eletricidade, como já vivenciado na circunstância da crise energética ocorrida no ano de 2001 no Brasil (FREITAS; SOITO, 2008).

Quanto ao setor agrícola, mudanças na vazão da bacia expõem principalmente os agricultores em situação de vulnerabilidade. No caso de redução da vazão, por exemplo, com menor quantidade de água acessível e sem condições de desenvolver práticas de irrigação buscando fontes de água mais distantes, menor é base de sustentação. A resiliência de longo prazo diminui e é provável que aumente o êxodo rural (MARENGO, 2008; UNESCO; UN-

WATER, 2020). Por outro lado, caso o aumento de eventos extremos previstos resulte em aumento da vazão, outros efeitos podem ser verificados. A ocorrência de inundações pode devastar os cultivos e a vegetação nativa, além de causar o assoreamento do reservatório, reduzindo o seu volume útil e, conseqüentemente, o abastecimento. Outros impactos possíveis dizem respeito a danos nas moradias e remoção de comunidades inteiras de seus territórios (ESPINDOLA; NODARI; SANTOS, 2019; SÁNCHEZ et al., 2018).

Ao antecipar o efeito de possíveis cenários climáticos na bacia hidrográfica é possível definir riscos futuros relacionados à disponibilidade de água no desenvolvimento de projetos (LELIS et al., 2011). Compreender tais conseqüências é o primeiro passo para que soluções mais assertivas, direcionadas à região de estudo, sejam propostas. A pesquisa poderá servir como base para a melhoria do gerenciamento, tanto hídrico quanto energético na região. Os resultados serão úteis à criação de políticas públicas locais junto à sociedade, uma vez que permitirão identificar a vulnerabilidade da população local em relação a impactos climáticos sobre os recursos hídricos, auxiliando no planejamento de estratégias adaptativas que minimizem estes prováveis impactos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar as possíveis respostas da vazão da Bacia do Reservatório de Nova Ponte, situada no Triângulo Mineiro, a cenários de mudanças climáticas em um curto e um médio prazo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Simular processos físicos que influenciam as vazões na Bacia do Reservatório de Nova Ponte através de um modelo hidrológico calibrado e validado para a bacia em estudo;
- Simular e avaliar a resposta da vazão mensal a cenários prováveis de mudanças climáticas no modelo hidrológico da Bacia do Reservatório de Nova Ponte através de dados de projeções de modelos climáticos aptos a representar as Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSPs - *Shared Socioeconomic Pathways*) 2.4.5 e 5.8.5, propostas para o Sexto Relatório de Avaliação (AR6 – *Assessment Report 6*) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022a).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A presente revisão bibliográfica está dividida em oito seções. Na seção 2.1 é realizada uma breve introdução da temática dos modelos hidrológicos. Na seção 2.2, sete modelos selecionados de acordo com a literatura são revisados. Buscou-se entender características de cada um, enquadrando-os em critérios prioritários para auxiliar a tomada de decisão. A partir disso, na seção 2.3, é feita uma síntese acerca desses critérios. Nela, os modelos foram comparados e um deles escolhido para esta pesquisa. Já com o modelo hidrológico selecionado, na seção 2.4 ele é descrito, buscando captar como os principais processos hidrológicos são representados. Na seção 2.5 são revisadas algumas de suas aplicações, todas relacionadas às áreas de estudos com reservatórios, enquanto na seção 2.6 são discutidas as limitações de uso do modelo. A seção 2.7, introduz brevemente os cenários de mudanças climáticas, com foco naqueles de interesse para esta dissertação. Ao final, na seção 2.8, são feitas reflexões acerca das políticas públicas de gestão hídrica no Brasil frente à crise climática.

2.1 BREVE INTRODUÇÃO AOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Modelos são uma estrutura simplificada para representar o funcionamento de um conjunto de processos do mundo real (HAGGETT; CHORLEY, 1967). A construção de modelos é um exercício inerente ao ser humano na percepção e organização das ideias a respeito do mundo ao redor. O processo decisório em relação a alternativas de ação e a necessidade de se planejar com antecedência para prováveis acontecimentos leva os indivíduos a sistematizar a informação a respeito do seu entorno através de modelos mentais (SEMENOVA; BEVEN, 2015). Essa representação é parcial, pois reflete a visão de mundo dos indivíduos e a fração da realidade a que se destina (CHRISTOFOLETTI, 1999). A partir dos modelos mentais, são desenvolvidos modelos que buscam representar matematicamente os processos em estudo, seja de forma estocástica ou determinística.

Modelos hidrológicos são ferramentas que utilizam equações matemáticas com o objetivo de descrever quantitativamente os processos hidrológicos em bacias hidrográficas, possibilitando a compreensão das respostas dos processos a futuros possíveis (BESKOW et al., 2016; SEMENOVA; BEVEN, 2015). Ao longo de décadas, eles têm sido utilizados para auxiliar a tomada de decisão em políticas públicas, assim como prever eventos potencialmente danosos à sociedade (BESKOW et al., 2016; MARINHO-FILHO et al., 2012).

Os modelos hidrológicos se diferenciam entre si de acordo com a forma com que os processos hidrológicos são discretizados no espaço (modelos espacialmente distribuídos,

semi-distribuídos ou concentrados), a discretização temporal dos processos, as prioridades e grau de detalhamento na representação dos processos e seus objetivos (TUCCI, 2005). Neles, a bacia hidrográfica é a unidade de análise, o sistema ambiental modelado em função de componentes como solo, vegetação, clima e relevo (CALDEIRA et al., 2018). Uma vez que a bacia é um sistema natural, do qual não se tem controle e onde integram-se diversos processos, os modelos auxiliam na compreensão do seu comportamento (TUCCI, 2005). A simulação através dos modelos pode ser realizada para representar desde a transformação de chuva em escoamento, até a evapotranspiração, o armazenamento de água e a propagação de cheias (PONTES et al., 2015). Entre as diversas aplicações dos modelos hidrológicos, ressaltam-se a previsão e estimativa de frequência de cheias, projeto de estruturas hidráulicas, bem como avaliação de impacto de mudanças climáticas e de uso da terra nos recursos hídricos (CALDEIRA et al., 2018).

Segundo Tucci (2005), os primeiros modelos hidrológicos buscavam descrever os processos de cada componente do ciclo da água separadamente. Somente a partir da década de 1950, com a nova tecnologia dos computadores, surgiram os primeiros modelos que reuniam vários processos (TUCCI, 2005). À época, o pioneiro da ciência da computação, John McCarthy, comentou que os métodos de análise poderiam ser totalmente diferentes frente ao novo ambiente computacional, e que inovações metodológicas eram necessárias para tirar proveito da velocidade já alcançada naquele momento, quatro a cinco ordens de magnitude mais rápidas do que as calculadoras de mesa (CRAWFORD; BURGESS, 2004). A revolução digital desencadeou grandes melhorias nas simulações numéricas e estatísticas, com consequentes avanços em modelos aplicados às bacias hidrográficas. O desenvolvimento do inovador modelo Stanford no início dos anos 1960 impulsionou tentativas de modelar virtualmente todo o ciclo hidrológico (SINGH; FREVERT, 2010). Dessa forma, concomitante ao desenvolvimento dos computadores, ocorreu a evolução dos modelos hidrológicos (TUCCI, 2005).

Também a partir da difusão do uso de computadores e integração dos modelos hidrológicos aos SIG, a abordagem espacial distribuída começou a ser aplicada na modelagem hidrológica, gerando diversos modelos com diferentes objetivos e grandezas de aplicação (MARINHO-FILHO et al., 2012). Essa abordagem incorpora no modelo a variação espacial das características da bacia, assim como a distribuição da precipitação, permitindo analisar padrões espaço-temporais das variáveis (FELIX; PAZ, 2016). A modelagem distribuída requer uma extensa base de dados como entrada em uma determinada extensão temporal e

espacial, a qual pode não estar disponível e exercer influência no desempenho da simulação realizada (BESKOW et al., 2016).

Antes de serem avaliados quadros futuros, é necessário atestar a eficiência dos modelos hidrológicos em representar adequadamente o regime hidrológico da bacia. Devido à grande heterogeneidade do sistema hidrológico, a obtenção de estimativas representativas requer a calibração dos modelos para cada bacia. Isso é feito através de ajustes de parâmetros que descrevem processos hídricos, baseados na comparação de simulações com dados observados em campo (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016). Publicado no início da década de 1980, o TOPMODEL foi o primeiro modelo a se integrar com SIG. Desde então, diversos outros modelos têm incorporado módulos que proporcionam a modelagem através de interfaces de programas SIG (FAN; COLLISCHONN, 2014).

2.2 EXEMPLOS DE MODELOS DE ACORDO COM A LITERATURA

Sete modelos hidrológicos foram escolhidos de acordo com a literatura para revisão. Foram incluídos os modelos Stanford, TOPMODEL, VIC, MIKE SHE, SWAT, HEC-HMS e MGB-IPH. Para a caracterização destes modelos, foram realizadas pesquisas em livros, artigos e sites oficiais.

2.2.1 Modelo Stanford

No início dos anos 1960, o desenvolvimento de um dos primeiros modelos de simulação hidrológica, o modelo Stanford (CRAWFORD; LINSLEY, 1966), veio a estabelecer conceitos hoje bem consolidados na prática da modelagem, introduzindo a noção da modelagem contínua e da distribuição espacial da infiltração (DONIGIAN JR; IMHOFF, 2010; TUCCI, 2005). A estrutura do modelo era inovadora à medida que integrava processos hidrológicos considerando as bases físicas já documentadas (i.e. fluxo de base, infiltração, umidade do solo, evaporação), operada em um curto intervalo de tempo (CRAWFORD; BURGESS, 2004). Stanford é um modelo hidrológico conceitual e elaborado para aplicação em grandes bacias hidrográficas (BORAH; BERA, 2003; DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015; DONIGIAN JR; IMHOFF, 2010; FRANCHINI et al., 1996).

Desde o início da criação do modelo, em 1962, refinamentos foram feitos a fim de reduzir o número de parâmetros a serem calibrados, e usar mais processos físicos do que empíricos (DONIGIAN JR; IMHOFF, 2010). Nesse sentido, as ideias de parâmetros, como valores fixos associados às características da bacia hidrográfica, e de calibração dos valores de parâmetros selecionados, foram incorporadas ao modelo, utilizando conceitos já existentes

advindos tanto de modelos hidráulicos quanto de analógicos de água subterrânea. A calibração e a utilização de conceitos físicos nos processos foram inicialmente refutados no meio científico. Apesar disso, são amplamente experimentados atualmente na modelagem hidrológica (CRAWFORD; BURGESS, 2004).

No início da década de 1970, os desenvolvedores refinaram o modelo Stanford para criar o HSP (*Hydrocomp Simulation Program*). Este foi transformado mais tarde no HSPF (*Hydrological Simulation Program FORTRAN*) com o apoio da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA - *U.S. Environmental Protection Agency*), passando por uma série de aprimoramentos de código e algoritmo, desde o primeiro lançamento público em 1980 (DONIGIAN JR; IMHOFF, 2010). Atualmente, o modelo HSPF integra o sistema de análise ambiental BASINS (*Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources*) da USEPA e é disponibilizado gratuitamente através da interface WinHSPF (USEPA, 2020a, 2020b). Porém, a última atualização, a versão 11 do HSPF para uso público, foi em março de 1997 (USEPA, 2018).

2.2.2 TOPMODEL

O TOPMODEL (*Topography-based hydrological model*) (BEVEN et al., 1984; BEVEN; KIRKBY, 1979) é um modelo de chuva-vazão conceitual e considerado semi-distribuído, uma vez que apenas o parâmetro relacionado à topografia é distribuído ao longo da bacia (DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015; FRANCHINI et al., 1996; SILVA; KOBIYAMA, 2007). É um dos modelos padrão para análise hidrológica em muitos países europeus (SINGH; FREVERT, 2010). Tem suas origens na constatação acerca da natureza dinâmica das áreas de contribuição de escoamento, e foi um dos primeiros modelos a fazer uso explícito de dados topográficos na formulação (BEVEN et al., 2020). Embora a primeira publicação deste modelo tenha sido em 1979, somente recebeu seu acrônimo TOPMODEL em 1984 (SILVA; KOBIYAMA, 2007).

O objetivo inicial foi refletir, em pequenas bacias hidrográficas, como a geração de escoamento era moldada pela topografia (BEVEN et al., 2020; BEVEN; KIRKBY, 1979; UHLENBROOK; ROSER; TILCH, 2004). Isso foi feito a partir do uso do índice topográfico, introduzido pela primeira vez por Michael Kirkby e Darrell Weyman em 1974, para simulações simplificadas dos processos hidrológicos. Esse índice obtém a simplificação ao presumir que todos os pontos com o mesmo valor respondem de maneira hidrológicamente semelhante, não sendo necessário calcular os processos para todos os pontos da bacia (BEVEN, 1997). Até os anos 80, quando o poder computacional era mais limitado, essa

sintetização foi bastante pertinente. Porém, vale ressaltar que a demasiada simplificação da dinâmica da bacia pode acarretar erros, sendo necessário critério na sua utilização (BEVEN, 1997; BEVEN et al., 2020).

Por outro lado, além de reduzir a complexidade da modelagem, a vantagem de utilizar a distribuição de um índice topográfico está em sua capacidade de reproduzir a resposta hidrológica com um número menor de parâmetros do que modelos conceituais mais tradicionais (TODINI, 1996). Como o padrão do índice topográfico é conhecido, uma característica marcante do modelo é que os resultados podem ser mapeados de volta no espaço e verificados quanto ao realismo (BEVEN et al., 2020). A visualização rápida das previsões espaciais é importante, uma vez que deficiências óbvias podem se tornar aparentes (BEVEN, 1997).

O modelo apresenta implementação gratuita no SIG GRASS e no pacote estatístico R, ambas baseadas na estrutura original (BUYTAERT, 2018; CHO, 2001). Porém, uma vez que seu código é disponibilizado, existem diversos artigos com propostas de modificações na formulação (SILVA; KOBAYAMA, 2007).

2.2.3 VIC

O modelo VIC (*Variable Infiltration Capacity*) (LIANG et al., 1994) é um modelo hidrológico semi-distribuído de base física, criado para representar grandes bacias, até mesmo aquelas de tamanhos continentais, sendo utilizado para simulações globais (ALVARENGA et al., 2020; BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009; HAMMAN et al., 2018; LIANG et al., 1994). Foi desenvolvido originalmente para incorporação em Modelos de Circulação Atmosférica Global (*general circulation models*- GCMs) a partir de uma generalização do modelo de capacidade de infiltração variável descrito por Eric Wood e colaboradores em 1992 (LIANG et al., 1994). É capaz de representar tanto o balanço hídrico quanto o balanço energético. Os cálculos dos processos hidrológicos são realizados nas células da grade (matrizes raster) para diferentes tipos de vegetação e solo descoberto (CHEN et al., 2018).

A principal característica do modelo VIC é a curva de infiltração variável, que determina a taxa máxima de infiltração e escoamento de água em células com cobertura vegetal, conforme a umidade do solo. O módulo de propagação de fluxo calcula o tempo para que todo o escoamento superficial saia de cada célula após a precipitação e alcance a rede de drenagem (ALVARENGA et al., 2020).

O modelo VIC apresenta quatro alternativas de implementação que possibilitam o uso de diferentes linguagens de programação, desde código binário, FORTRAN e Python, porém

não foi observada interface com SIG (UW, 2016). VIC é gratuito com código aberto sob Licença pública geral (GPL) versão 2 (FSF, 1991). Existe um grupo de discussão disponível para usuários e os códigos são hospedados na plataforma GitHub para incentivar a participação da comunidade de usuários (HAMMAN et al., 2018; UW, 2021).

A última atualização robusta no código-fonte, com reorganização e reparo de erros, foi lançada em 2017 como VIC 5 (HAMMAN et al., 2018). No entanto, com base na versão anterior (VIC 4.2) foi desenvolvido em 2019 o VIC-Res para o sistema operacional Linux. Esta última versão foi elaborada para permitir a representação da dinâmica de armazenamento de reservatórios, bem como as regras de operação no modelo (DANG; CHOWDHURY; GALELLI, 2020).

2.2.4 MIKE SHE

O modelo MIKE SHE (REFSGAARD; STORM, 1995) é um sistema distribuído e de base física, que modela os processos hidrológicos e permite analisar a qualidade da água (DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015; SANDU; VIRSTA, 2015). Foi desenvolvido pelo Instituto Hidráulico Dinamarquês (DHI - *Danish Hydraulic Institute*) (REFSGAARD; STORM, 1995), com base no modelo SHE (*Système Hydrologique Européen*) (MA et al., 2016).

O modelo MIKE SHE foi projetado para aplicação em pequenas bacias (REFSGAARD; STORM; CLAUSEN, 2010). Apresenta uma estrutura em três dimensões (3D) para modelagem dos principais processos hidrológicos, baseada nas leis de conservação de massa, energia e momento. Isso permite que as características do sistema se aproximem mais da realidade, em comparação com outros sem esse tipo de estrutura. Uma vez que todo o sistema pode ser dividido em grades em 3D, a heterogeneidade das direções horizontal e vertical pode ser melhor representada (MA et al., 2016).

Em comparação com outros códigos existentes, ressalta-se a capacidade do modelo de lidar com grandes conjuntos de dados; integração com relação aos processos de fluxo de águas superficiais e subterrâneas e possibilidade de descrever completamente os principais processos hidrológicos dinâmicos de uma bacia. Isso o torna adaptável às regiões de hidrogeologia mais complicada (MA et al., 2016; REFSGAARD; STORM; CLAUSEN, 2010). Apesar disso, tanto a construção complexa de MIKE SHE, quanto a grande quantidade de dados requerida, podem levar a dificuldades na sua execução (MA et al., 2016).

MIKE SHE é integrado com o ArcGIS e, desde a década de 2000, tem sido mantido como um produto comercial (DHI, 2021; REFSGAARD; STORM; CLAUSEN, 2010). É

atualizado constantemente e já apresenta uma versão lançada no ano de 2021 (DHI, 2021). Além disso, mantém um fórum para usuários registrados (SMF, 2017).

2.2.5 SWAT

O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) (ARNOLD et al., 1998; SRINIVASAN; ARNOLD, 1994) é um modelo semi-distribuído e destinado a operações em grandes bacias hidrográficas (ABBASPOUR et al., 2015; ARNOLD et al., 1998, 2012a). Apesar disso, também é aplicado com eficiência em pequenas bacias (BRESSIANI et al., 2015). É um modelo de base física, destinado a simulações de longo prazo, não apropriado para simular eventos isolados (ARNOLD et al., 1998; DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015; NEITSCH et al., 2011). Os principais componentes incluem clima, hidrologia, propriedades do solo, crescimento de plantas e manejo da terra. Isso permite que bacias sem monitoramento sejam modeladas, e que seja quantificado o impacto relativo dos dados de entrada (NEITSCH et al., 2011). O ciclo hidrológico é orientado pelo clima, que fornece entradas de umidade e de energia (ARNOLD et al., 2012a).

O SWAT foi desenvolvido no Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS - *Agricultural Research Service*) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA - *U.S. Department of Agriculture*) (ARNOLD et al., 2012a). Originou-se a partir do modelo SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*) mas também inclui componentes adaptados de outros modelos, como CREAMS, GLEAMS e EPIC (ARNOLD; FOHRER, 2005).

No SWAT, a simulação hidrológica é dividida em duas fases. A fase terrestre do ciclo hidrológico controla a movimentação de água e sedimentos que são conduzidos para o canal principal de cada sub-bacia. Já a fase da propagação do ciclo, controla o escoamento pela rede hidrográfica até o exutório (NEITSCH et al., 2011). Assim, uma vez determinados os direcionamentos da fase terrestre para o canal principal, estes são encaminhados através dos cursos d'água e reservatórios dentro da bacia hidrográfica (ARNOLD et al., 2012a). A modelagem de reservatórios é feita a partir de um módulo específico no qual são inseridos parâmetros relacionados à implantação e operação do reservatório (ARNOLD et al., 2012b).

O modelo SWAT tem o código disponibilizado gratuitamente e utiliza uma interface com as plataformas ArcGIS e QGIS, permitindo integração de diversas bases espaciais (SILVA; MEDEIROS, 2014; WANG et al., 2019). Desde a sua criação, SWAT já passou por muitas expansões, com atualizações recentes divulgadas no ano de 2020 (ARNOLD; FOHRER, 2005; TAMU, 2021a). Vários grupos de usuários tem sido criados para

compartilhamento de informações acerca do modelo, incluindo SWAT, ArcSWAT, SWAT-CUP (SWAT-*Calibration and Uncertainty Programs*) (ABBASPOUR, 2007), QSWAT, e grupos para América Latina em geral, África, sudeste da Ásia, Irã e Brasil (ARNOLD et al., 2012a; TAMU, 2021b).

2.2.6 HEC-HMS

O HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*) (FELDMAN, 2000), é um modelo conceitual considerado padrão para projetos de sistemas de drenagem nos Estados Unidos (EUA), quantificando como os diferentes usos do solo podem interferir na ocorrência de cheias (CHU; STEINMAN, 2009; OUÉDRAOGO; RAUDE; GATHENYA, 2018; SINGH; FREVERT, 2010). Seu desenvolvimento foi iniciado para substituir o modelo HEC-1. Em relação ao HEC-1, o modelo HEC-HMS teve uma interface gráfica do usuário (GUI) adicionada, além de técnicas e algoritmos mais modernos inseridos, para melhorar a qualidade dos resultados (USACE, 2021a).

O programa apresenta um ambiente de trabalho integrado e permite o movimento contínuo entre as diferentes partes do programa, incluindo banco de dados, utilitários para inserção de dados e ferramentas de computação (USACE, 2021a). Os dados de entrada devem ser obtidos manualmente e preparados antes da execução dos recursos geoespaciais no modelo (CASTRO; MAIDMENT, 2020). A partir de modelos digitais de elevação (MDE) é possível delinear bacias hidrográficas, sub-bacias e cursos d'água através de ferramentas SIG integradas ao software do HEC-HMS (USACE, 2021a).

HEC-HMS pode ser aplicado em bacias hidrográficas de pequeno a grande porte (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009; SCHARFFENBERG, 2016). Um projeto padrão é composto de um modelo meteorológico (que simula a precipitação na bacia) e um modelo de bacia. (que representa a bacia hidrográfica fisicamente) (CASTRO; MAIDMENT, 2020). A modelagem permite a inserção de reservatórios, porém previsões fornecidas são referentes a vazões não controladas. Para a realização de simulações considerando as regras de operação é possível utilizar o programa HEC-ResSim associado a resultados obtidos pelo HEC-HMS (CHARLEY, 2010; USACE, 2021b).

O modelo é disponibilizado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE - *United States Army Corps of Engineers*) em domínio público, porém sem o fornecimento de suporte para usuários exteriores à corporação (HALWATURA; NAJIM, 2013; USACE, 2021c, 2021a). Tendo isso em vista, em 2020, usuários criaram um grupo no site Facebook dedicado a trocas sobre o modelo (WASSER WORLD, 2020). O modelo vem

sendo constantemente aprimorado quanto a técnicas de simulação e representação de processos físicos, com uma atualização para a versão 4.8 em 2021 (USACE, 2021a).

2.2.7 MGB-IPH

O MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas) (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN et al., 2007) é um modelo hidrológico distribuído e conceitual, que pode funcionar em passo de tempo diário ou horário (COLLISCHONN et al., 2020; FLEISCHMANN et al., 2015). Inicialmente, a estrutura do MGB-IPH foi baseada nos modelos LARSIM e VIC. Foi desenvolvido com foco na simulação do processo de transformação chuva-vazão em grandes bacias, sobretudo sul-americanas, devido à grande limitação relacionada à disponibilidade de dados hidrológicos na região (COLLISCHONN et al., 2007; FAN; COLLISCHONN, 2014; OLIVEIRA et al., 2019).

O modelo MGB-IPH é disponibilizado gratuitamente pelo IPH da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, o qual mantém um fórum de discussão disponível para usuários (HGE, 2013; PONTES et al., 2017). É composto por módulos para o cálculo dos processos que podem ser divididos em três principais: um módulo de balanço de água e energia no solo; um de escoamento interno na mini bacia (pequenas sub-bacias que dividem a bacia hidrográfica) e um módulo de escoamento na rede de drenagem. O primeiro realiza os cálculos relativos aos processos hidrológicos verticais (fluxos atmosfera-solo; solo-aquífero e solo/vegetação-atmosfera). Já os módulos de escoamento interno na mini bacia e de escoamento na rede de drenagem representam ambos os processos horizontais, tanto os que ocorrem dentro de uma mini bacia, quanto ao longo dos principais rios da bacia, respectivamente (COLLISCHONN et al., 2020).

Em 2015 foi desenvolvido um método para simulação de reservatórios por Fleischmann e colaboradores. Ele permite a adição de características e simulação de vertedores e orifícios como estruturas de saída. A inserção, entretanto, precisa ser feita através de alterações no código do modelo, em linguagem FORTRAN90 (BREDA et al., 2020).

O modelo apresenta acoplamento com SIG através de um plugin, com versões mais atuais preparadas para utilização junto ao QGIS. A última atualização disponível, referente a versão 4.5, foi publicada em 2018 (MEDEIROS et al., 2019).

2.3 SELEÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO PARA ESTA PESQUISA

Para o emprego adequado dos modelos hidrológicos, a escolha deve ser criteriosa, buscando definir os elementos prioritários para o propósito do estudo. Devem ser

compreendidos aspectos como o contexto no qual são aplicados, prioridades de representação de processos, entre outros (TUCCI, 2005).

O Brasil, cuja eletricidade provém sobretudo de UHEs, apresenta bacias hidrográficas extensas com reservatórios de grande porte (EPE, 2018). Os reservatórios alteram as vazões fluviais consideravelmente, regulando o fluxo e reduzindo a oscilação natural dos níveis d'água (MAGILLIGAN; NISLOW, 2005; MEDEIROS et al., 2011). Torna-se, portanto, necessário buscar modelos que incorporem as regras de operação dos reservatórios.

A unidade hidrológica delimitada para esse estudo constitui a Bacia do Reservatório de Nova Ponte e se encaixa no padrão supracitado. Com 15.416 km² é considerada uma bacia de grande porte, de acordo com os parâmetros considerados nos trabalhos de Becker (1992), Dooge (1997), bem como de Collischonn e Tucci (2001) (Tabela 1), dos quais 435,4 km² são ocupados pelo espelho d'água do reservatório da UHE de Nova Ponte. Na seção 3, item 3.1, é possível conferir uma caracterização mais detalhada da área de estudos.

Tabela 1 - Categorias de extensões de bacias e descrição.

Extensão	Becker (1992)		Dooge (1997)		Collischonn; Tucci (2001)	
	Comprimento (km)	Área (km ²)	Extensão	Comprimento (km)	Extensão	Área (km ²)
Macro	>100 km	>10.000 km ²	Macro	Global 10.000 km Continental 1.000 km Grandes bacias 100 km	Grandes bacias	>10.000 km ²
Transição entre meso e macro	30 a 100 km	1.000 a 10.000 km ²				
Meso	3 a 30 km	10 a 1.000 km ²	Meso	Pequenas bacias 10 km Sub-bacia 1 km Módulo 0,1 km	Pequenas bacias	< 1.000 km ²
Transição entre micro e meso	0,01 a 3 km	0,0001 a 10 km ²				
Micro	< 0,01 km	< 0,0001 km ²	Micro	<1E-05 km		

Para auxiliar a seleção do modelo mais apropriado foram definidos critérios considerando o contexto da bacia a ser estudada. Os critérios definidos, organizados no Quadro 1, foram: (1) tamanhos das bacias hidrográficas para os quais o modelo é aplicável; (2) integração com SIG, (3) existência de adaptação metodológica para representação de reservatórios, (4) gratuidade do software, (5) comunidade ativa para suporte, (6) atualização regular do software e (7) disseminação no meio acadêmico. As informações inseridas nos critérios 1 a 6 foram obtidas a partir do conteúdo levantado na pesquisa bibliográfica, associadas a cada um dos modelos revisados. Para a obtenção da quantidade de referências para cada um dos modelos (critério 7) nos últimos 5 anos (de 2016 a 2020) foi realizada uma

pesquisa na plataforma *Science Direct* na qual utilizou-se o padrão "nome do modelo + model" AND "water". A cor cinza claro em alguns critérios dos modelos indica que, na pesquisa realizada, não foi possível encontrar a característica para o modelo associado.

Quadro 1 - Critérios associados a cada modelo.

Modelo	Extensão de aplicação	SIG	Adaptação para reservatório	Gratuidade	Comunidade ativa para suporte	Atualização	Referências (2016-2020)
Stanford	Grandes bacias (BORAH; BERA, 2003; DONIGIAN JR; IMHOFF, 2010).			Inativado. Sucessor HSPF gratuito (USEPA, 2020b).		1997 para uso público (HSPF) (USEPA, 2018).	21
TOP-MODEL	Pequenas bacias (BEVEN; KIRKBY, 1979; UHLENBROOK; ROSE; TILCH, 2004).	GRASS		Sim (BUYTAERT, 2018; CHO, 2001).		Baseadas no código original (BUYTAERT, 2018; CHO, 2001).	191
VIC	Grandes bacias à extensão global (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009; LIANG et al., 1994).		Sim, para Linux (DANG; CHOWDHURY; GALELLI, 2020).	Sim (FSF, 1991).	1 grupo de discussão para usuários (UW, 2021).	2017 (HAMMAN et al., 2018).	302
MIKE-SHE	Pequenas bacias (REFSGAARD; STORM; CLAUSEN, 2010).	ArcGIS.		Não (DHI, 2021).	1 fórum para usuários registrados (SMF, 2017).	2021 (DHI, 2021).	198
SWAT	Pequenas a grandes bacias (ABBASPOUR et al., 2015; BRESSIANI et al., 2015).	QGIS e ArcGIS.	Sim (ARNOLD et al., 2012b).	Sim (WANG et al., 2019).	14 grupos disponíveis (TAMU, 2021b).	2020 (TAMU, 2021a).	1.237
HEC-HMS	Pequenas a grandes bacias (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009; SCHARFFENBERG, 2016).	Ferramentas SIG inclusas.	Sim (USACE, 2021b).	Sim (USACE, 2021c).	1 grupo (WASSER WORLD, 2020).	2021 (USACE, 2021a).	66
MGB-IPH	Grandes bacias (COLLISCHONN et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2019).	QGIS.	Sim, via FORTRAN (BREDÁ et al., 2020; FLEISCHMANN et al., 2015).	Sim (PONTES et al., 2017).	1 fórum de discussão (HGE, 2013).	2018 (MEDEIROS et al., 2019).	13

O modelo Stanford não foi considerado na seleção para essa pesquisa uma vez que não é mais utilizado. Ele foi substituído pelo seu sucessor, o pacote HSPF que atualmente integra o sistema de análise ambiental BASINS (USEPA, 2020a). Assim, para emprego em grandes bacias, como no caso em estudo, indicam-se os modelos VIC, SWAT, HEC-HMS e MGB-IPH (Quadro 1). Todos esses podem ser aplicados em bacias com reservatório, porém o

primeiro foi desenvolvido para sistema operacional Linux e funciona inteiramente em linguagem de programação (DANG; CHOWDHURY; GALELLI, 2020; UW, 2016). SWAT e HEC-HMS diferem-se, uma vez que SWAT possibilita a inclusão das regras de operação do reservatório diretamente no modelo (ARNOLD et al., 2012b). Já o HEC-HMS não apresenta essa opção. Para inseri-las, é preciso associar os resultados obtidos a um outro programa (USACE, 2021b). Quanto ao MGB-IPH, a inclusão de características do reservatório é feita em código FORTRAN, o que exige familiaridade com lógica de programação. Em relação à adaptação para ambiente SIG, HEC-HMS possui ferramentas integradas no próprio software. Alguns modelos são adaptados para o software comercial ArcGIS (ESRI), como o MIKE-SHE e SWAT, enquanto outros priorizaram adaptações para o *open-source* QGIS, como o MGB-IPH, e GRASS, como o TOPMODEL. Entre eles, apenas o SWAT possui adaptação tanto para o ArcGIS quanto QGIS, enquanto o VIC não apresentou esse tipo de interface.

Entre os modelos mais difundidos destaca-se o SWAT (Quadro 1). Observa-se no Quadro 1 um diferencial relacionado à ampla comunidade ativa para suporte, com 14 grupos disponíveis (TAMU, 2021b). Isso facilita a aplicação, inclusive para usuários inexperientes. Já o MGB-IPH foi o modelo com menor número de referências na pesquisa realizada. Isso pode ter ocorrido dado que é o modelo mais recente entre os analisados, com a primeira publicação revisada por pares publicada em 2007 (COLLISCHONN et al., 2007).

MIKE-SHE é o único dos modelos avaliados que constitui um software pago (DHI, 2021). Isso dificulta a aplicação em pesquisas acadêmicas com recursos limitados, como ocorre no Brasil.

A partir da revisão bibliográfica supracitada, conclui-se que o modelo hidrológico mais apropriado para aplicação na Bacia do Reservatório de Nova Ponte é o SWAT, uma vez que é elaborado para aplicação em grandes bacias, apresenta um módulo específico para inserção das características e regras de operação de reservatórios e possui integração com SIG. Além disso, é gratuito, constantemente atualizado e apresenta diversos grupos de contribuição entre usuários do modelo.

2.4 DESCRIÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT

No modelo SWAT diversos processos hidrológicos são simulados na bacia hidrográfica. Para que isso ocorra o ciclo hidrológico é fundamentado na equação do balanço hídrico, representada pela Equação 1 (NEITSCH et al., 2011):

$$S_t = S_0 + \sum_{i=1}^t (P_i - Q_i - E_i - I_i - Q_{ret_i}) , \quad (1)$$

na qual: o cálculo de S_t resulta na quantidade de água armazenada no solo no passo de tempo, sendo t o tempo em dias e todas as variáveis medidas em milímetros de água (mm H₂O). A variável S_0 representa a umidade do solo no dia zero, ou seja, no momento inicial. P_i é a precipitação no dia i , Q_i é o escoamento superficial no dia i , E_i é a evapotranspiração no dia i , I_i equivale à quantidade de água infiltrada para porções profundas da estrutura geológica no dia i e, por fim, Q_{ret_i} , equivale ao fluxo de retorno, também no dia i (NEITSCH et al., 2011).

Os dados de precipitação na sua forma mais comum, i.e., a chuva, são inseridos no modelo junto a outras variáveis climáticas, tais como temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento (NEITSCH et al., 2011). Estas variáveis podem ser inseridas no modelo a partir de dados mensurados ou ser simuladas durante a execução do modelo. Entre elas, apenas temperatura, precipitação e radiação solar são obrigatórias. Já a umidade relativa do ar e a velocidade do vento, são requeridas apenas quando os métodos de Penman-Monteith ou Priestley-Taylor são utilizados para o cálculo da evapotranspiração potencial. Caso o método de Hargreaves (1985) seja selecionado, como no presente trabalho, estas variáveis não são necessárias, uma vez que o método exige apenas a temperatura do ar para o cálculo (ARNOLD et al., 2012b). Entre os passos executados nessa pesquisa, os dados diários de temperatura e precipitação observados foram incluídos. Quanto à radiação solar diária, esta foi simulada pelo modelo SWAT utilizando o modelo proposto por Richardson (1981) baseado em um “processo de geração fracamente estacionário” apresentado por Nicholas Matalas em 1967, além da equação da continuidade, que incorporar a influência de dias úmidos ou dias secos nos valores gerados (NEITSCH et al., 2011).

O modelo SWAT inicia a simulação pelo delineamento da bacia hidrográfica com base na topografia. Após definida, o primeiro nível de subdivisão são as sub-bacias. As sub-bacias apresentam relação espacial umas com as outras e, portanto, podem ser hidrológicamente conectadas (ARNOLD et al., 2012b). Cada sub-bacia contém no mínimo uma Unidade de Resposta Hidrológica (URH), as quais não têm qualquer interação umas com as outras. Esse é o segundo nível de discretização no modelo. Cada URH representa a área total da sub-bacia que contém uma determinada combinação de declividade, tipos, usos e manejo do solo (ARNOLD et al., 2012a). Elas simplificam a execução da modelagem pois agrupam em uma única URH áreas com características similares, que estariam espalhadas em diferentes planos de informação e diversos campos individuais na base de dados, para cada sub-bacia. Essas

unidades são utilizadas na maioria dos cálculos, como para o cálculo do escoamento superficial (ARNOLD et al., 2012b).

O escoamento superficial inicialmente manifesta-se na forma de filetes de água. Estes filetes vão contornando o micro relevo do solo, impulsionados pela gravidade, até convergirem para a rede de drenagem mais estável (TUCCI, 2020). No modelo proposto, o escoamento superficial é calculado separadamente para cada URH. As quantidades resultantes são somadas a fim de obter o escoamento total na sub-bacia. Após isso, o SWAT propaga o volume de água obtido nas sub-bacias pela rede de drenagem e, então, no ponto mais à jusante da bacia hidrográfica, o escoamento superficial total é obtido (NEITSCH et al., 2011).

Tanto o volume de escoamento superficial, quanto a infiltração, podem ser calculados a partir do método da Curva Número (CN) do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (SCS- *Soil Conservation Service*) (USDA SCS, 1972) ou pelo método de infiltração de *Green e Ampt* (GREEN; VAN GRIENSVEN, 2008). Apesar disso, a dificuldade de utilização do método de Green e Ampt, devido à utilização de dados sub-horários de precipitação, faz do método da Curva Número uma opção mais viável de acordo com os dados disponíveis (ALMEIDA, 2019). O método da Curva Número é o método padrão do SWAT. Para calcular o escoamento superficial a forma popular do método é expressa pela Equação 2 (MISHRA; SINGH, 2004):

$$Q = \frac{(P-0,2S_{max})^2}{P+0,8S} \quad , \quad (2)$$

onde: P é o total de precipitação (mm H₂O), Q é o escoamento superficial direto (mm H₂O) e S_{max} é o potencial máximo de retenção (mm H₂O).

O SWAT apresenta dois possíveis métodos para o cálculo do parâmetro de retenção (S), sendo o padrão aquele cujo S varia de acordo com a umidade do solo. No entanto, devido a superestimções do escoamento superficial em solos rasos, observadas em cálculos utilizando este método, uma alternativa admitida pelo modelo é o método de cálculo em função da evapotranspiração acumulada das plantas, o qual foi selecionado para utilização nesta dissertação. Nesse caso, para a obtenção do parâmetro de retenção diário, a Equação 3 é utilizada (NEITSCH et al., 2011).

$$S_i = S_{prev} + E_i * \exp\left(\frac{-cncoef * S_{prev}}{S_{max}}\right) - P_i + Q_i \quad (3)$$

onde S_i é o parâmetro de retenção para o dia i (mm), S_{prev} é o parâmetro de retenção para o dia anterior (mm), E_i é a evapotranspiração potencial para o dia i (mm/dia), *cncoef* é o coeficiente de ponderação usado em cálculos diários do CN de acordo com evapotranspiração das plantas, S_{max} é o valor máximo que o parâmetro de retenção pode atingir no dia i (mm),

P_i é a profundidade da chuva para o dia i (mm H₂O) e Q_i é o escoamento superficial no dia i (mm H₂O). O valor inicial do parâmetro de retenção é definido como $S = 0,9 * S_{max}$. Obtidos os valores do parâmetro de retenção diário, o parâmetro CN é calculado pela Equação 4 (NEITSCH et al., 2011)

$$CN = \left(\frac{25400}{S+254} \right) \quad (4)$$

CN é um parâmetro que varia de acordo com o tipo de solo, uso da terra, condição hidrológica do solo e condição de umidade antecedente. Para a condição de umidade II, ou condição média de umidade, ele apresenta valores tabelados que podem ser obtidos no *National Engineering Hand Book*, Seção 4 (MISHRA; SINGH, 2004). Após calculado o escoamento superficial, a quantidade de água infiltrada no solo é obtida pela diferença entre a quantidade precipitada e quantidade de água escoada pela rede de drenagem (NEITSCH et al., 2011).

O SWAT usa a equação de Manning para definir a vazão (Equação 5) e velocidade do fluxo no segmento de um rio para um dado intervalo de tempo (Equação 6) (NEITSCH et al., 2011).

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} * R_{ch}^{2/3} + decl_{ch}^{1/2}}{n} \quad (5)$$

$$v_c = \frac{R_{ch}^{2/3} * decl_{ch}^{1/2}}{n} \quad (6)$$

Nas equações 5 e 6, q_{ch} representa a vazão (taxa) de escoamento (m³/s), A_{ch} é a área da seção transversal do fluxo no canal (m²), R_{ch} simboliza o parâmetro raio hidráulico para uma dada profundidade do fluxo (m), $decl_{ch}$ é a declividade ao longo do comprimento do canal (m/m), “ n ” é o coeficiente de rugosidade de Manning e pode obtido em Chow (1959), de acordo com as características do canal, e v_c representa a velocidade do fluxo (m/s).

Sobre a propagação do fluxo através do canal principal das sub-bacias, SWAT permite a utilização de dois diferentes métodos: o método de armazenamento de taxa variável (WILLIAMS, 1969) ou o método Muskingum (MCCARTHY, 1939) (GASSMAN et al., 2007). Por padrão, SWAT utiliza o método de armazenamento variável (ARNOLD et al., 2012b). A fórmula final é expressa pela Equação 7:

$$V_{saída,2} = SC * (V_{entrada} + V_{armazenado,1}) \quad (7)$$

sendo os numerais subscritos as representações do início de um dado intervalo de tempo (1) e do final desse mesmo intervalo de tempo (2), sendo os volumes medidos em metros cúbicos de água (m³ H₂O). Considera-se na Equação 7: $V_{saída,2}$ como o volume de saída no final de um dado intervalo de tempo, SC, o coeficiente de armazenamento (calculado em função do tempo

de translação que representa a divisão do volume de água no canal pela taxa de fluxo), V_{entrada} é o volume de entrada durante o intervalo de tempo e $V_{\text{armazenado},1}$ o volume de armazenamento no início do intervalo de tempo (NEITSCH et al., 2011).

2.5 APLICAÇÕES DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT

O modelo hidrológico SWAT tem sido utilizado para as mais diversas análises sobre o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. Nesta dissertação, foram revisados trabalhos com o SWAT referentes a bacias com reservatórios de água. Neste contexto, os artigos revisados foram organizados em torno de três temas principais: (1) avaliação de produção de sedimentos nas localidades estudadas, (2) estudo do potencial do SWAT para simulação de séries históricas de vazão na bacia para suporte em estudos hidrológicos e (3) aplicação do modelo para predição da vazão em resposta a cenários futuros, como no contexto das mudanças climáticas.

Entre os artigos relacionados ao Tema 1, tem-se o estudo de Razad e colaboradores (2021) os quais estimaram a taxa anual de entrada de sedimentos no reservatório hidrelétrico Ringlet, na Malásia, de 2000 a 2030 com auxílio do SWAT. Para isso, a elaboração de cenários projetados foi feita utilizando dados de chuva, assim como um mapa de mudanças projetadas no uso do solo para o ano de 2030. Os autores concluíram que, ao comparar a taxa anual de entrada de sedimentos projetada para 2017 a 2030 com o período histórico (2000 a 2016), as simulações resultaram em um aumento de 12%. Para combater o aumento da produção de sedimentos e os efeitos do transporte de sedimentos pelos cursos d'água, os autores mencionam que um plano de controle de erosão e de vazão deve ser desenvolvido.

Já Qiu e colaboradores (2020) buscaram quantificar o impacto das mudanças climáticas futuras tanto no escoamento superficial, quanto na erosão e carga de poluentes da Bacia do Reservatório de Miyun. Isso foi feito através da associação do SWAT com cinco modelos climáticos globais e três cenários de mudanças climáticas, os Caminhos Representativos de Concentração (RCP) 2.6, 4.5 e 8.5. Para isso o período referência foi de 1980 a 2004 e o período futuro foi de 2020 a 2099. Os resultados indicaram que os cenários de mudanças climáticas (especialmente com aumento na intensidade da precipitação) aumentaram a produção de sedimentos e cargas de nutrientes no reservatório de Miyun. Além disso, observou-se que as práticas de manejo testadas foram eficazes na redução da produção de sedimentos e nutrientes, embora com diminuição da eficiência com o aumento das precipitações. Para os autores esse resultado indica que, de acordo com o futuro do clima, as práticas de manejo na Bacia do Reservatório de Miyun devem ser adaptadas.

No contexto da simulação da vazão no tempo presente (Tema 2), Dias e colaboradores (2018) utilizaram o SWAT na região da Bacia do Reservatório da UHE de Furnas, inserida na Bacia do Rio Grande em Minas Gerais, Brasil, para a modelagem da série histórica de vazão, entre 2000 e 2013. A calibração (período de 2000 a 2010) e a validação (2011 a 2013) no SWAT-CUP indicaram desempenhos satisfatórios para ambos os procedimentos. Apesar dos valores das estatísticas para a validação terem sido consideravelmente menores, uma vez que foram satisfatórios, não representam um problema. Na literatura associada ao modelo SWAT situações como essa são observadas de forma recorrente.

Por outro lado, Oliveira e colaboradores (2017) aplicaram o SWAT associado a cenários futuros de mudanças climáticas (Tema 3). Isso foi feito em uma região da Bacia do Rio Grande em Minas Gerais, representada por um sistema com 3 reservatórios em cascata (Camargos, Itutinga e Funil). Com o objetivo de avaliar projeções hidrológicas e impactos das mudanças do clima na produção de energia, dois cenários futuros de mudanças climáticas, os RCP 4.5 e 8.5, foram utilizados entre os anos de 2007 e 2099. Dois modelos climáticos (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) geraram respostas de prováveis reduções na vazão mensal naturalizada para todos os períodos. Exceto para o reservatório do Funil de 2040 a 2099, utilizando saídas do Eta-MIROC5. Os autores concluíram a partir dos resultados que, caso essas tendências se mantenham, os efeitos para a atual produção de energia hidrelétrica podem ser críticos, com repercussões para além da área de estudos.

Dessa forma, como no exemplo de Oliveira e colaboradores (2017), muitos trabalhos sobre o comportamento hidrológico de bacias com reservatórios têm o objetivo de discutir sobre a disponibilidade hídrica para suporte ao fornecimento energético. Muhammad e colaboradores com intenção de investigar possíveis desafios para gestão do reservatório de Shellmouth, no Canadá, assim como analisar o impacto das alterações do clima na vazão de entrada do reservatório, utilizaram uma versão modificada do modelo SWAT. Isso foi feito a fim de simular adequadamente a dinâmica das áreas de contribuição variável na região de estudos, que apresentam grande complexidade hidrológica devido aos chamados “pântanos de pradarias” (*pothole wetlands*). O SWAT foi eficiente em simular a área de estudos pós calibração. Os cenários referentes aos RCPs 4.5 e 8.5 foram avaliados entre 2011 e 2070 e a vazão afluente obtida foi dividida por estações do ano para que fosse possível identificar mudanças no padrão sazonal. Os resultados obtidos indicaram possibilidade de aumento futuro da vazão nos meses de verão e inverno, assim como prováveis reduções nos picos de vazão de entrada do reservatório em meses de primavera.

No geral, os trabalhos de predição fazem as análises considerando longos períodos de tempo. Qin e colaboradores (2020) utilizaram o modelo SWAT para simular a vazão afluente mensal do reservatório das Três Gargantas, localizado na China, entre 2000 e 2099. A aplicação dos cenários futuros foi feita utilizando dados de saída de cinco modelos climáticos globais, cada um considerando os RCPs 2.6, 4.5 e 8.5. Os autores obtiveram como resultado um provável aumento na precipitação sobre o reservatório, associado a um aumento na vazão de entrada. Esse aumento da média anual da vazão afluente, assim como o aumento da geração de energia, pode ocorrer principalmente na primavera e no outono, entre 2046 e 2065 e entre 2080 e 2099. Outro resultado importante foi a obtenção de uma tendência de aumento na ocorrência de processos hidrológicos extremos, o que indicou a necessidade de medidas adaptativas para o futuro.

Entre os estudos relacionados nessa seção, foram observadas aplicações no Brasil, incluindo alguns nas bacias do estado de Minas Gerais (DIAS et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2017) e em outros países, como Malásia (RAZAD et al., 2021), Canadá (MUHAMMAD et al., 2020) e China (QIN et al., 2020). Em contrapartida, Beharry e colaboradores (2021) realizaram uma pesquisa na bacia hidrográfica Upper Navet em Trinidad, no Caribe. O objetivo do estudo foi estabelecer um modelo hidrológico para estimação do volume de água do reservatório de Navet. Entretanto, diversos valores estimados precisaram ser utilizados como entrada no modelo SWAT, devido a escassez de dados disponíveis. Ainda assim SWAT conseguiu simular satisfatoriamente o volume do reservatório após os processos de calibração e validação, permitindo seu uso para auxílio ao planejamento e gestão dos recursos hídricos do reservatório Navet.

2.6 LIMITAÇÕES DO USO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT

O modelo SWAT apresenta um extenso conjunto de dados padronizados que inclui as informações necessárias para a sua utilização (CASTRO, 2013). Porém, tendo sido desenvolvido nos Estados Unidos, o banco de dados originalmente incluído no modelo foi preparado para aplicações nas zonas temperadas do globo e, na maioria dos casos, não é apropriado para bacias localizadas em regiões tropicais (FERREIRA; UAGODA, 2017; MARHAENTO et al., 2017).

Nesses casos, para uma modelagem adequada, os parâmetros devem ser ajustados ao contexto em estudo. Isso é um desafio para o desenvolvimento de pesquisas com o SWAT no país, uma vez que o modelo requer uma grande quantidade de informações detalhadas para descrever a heterogeneidade das bacias hidrográficas (BRESSIANI et al., 2015). A extensão

continental do país, associada ao reduzido investimento do governo em ciência e tecnologia (1,26% do PIB em 2018, de acordo com UNESCO, 2021), dificultam o processo de geração de dados com o detalhamento apropriado por agências governamentais e universidades. Em algumas situações ocorre também a restrição de acesso a dados produzidos por grupos de pesquisa, mesmo quando desenvolvidos com algum financiamento público (SAYÃO; SALES, 2014). Destacam-se a ausência de mapas e informações pedológicas detalhadas, bem como a dificuldade na obtenção de séries de dados meteorológicos e hidrológicos completas e suficientemente longas (SILVA; CHRISTOFARO, 2017). Essas limitações de dados resultam na necessidade de recorrer a parametrizações ajustadas para o desdobramento de pesquisas que envolvam modelagem hidrológica. Alguns exemplos são o uso de funções de pedo-transferência para estimar parâmetros de solos brasileiros ou de técnicas estatísticas para preencher dados faltantes de clima e vazão (BRESSIANI et al., 2015; HÖRMANN et al., 2009).

Porém, ainda que os resultados obtidos sejam satisfatórios, a parametrização, ao envolver estimação e aproximações, nem sempre reflete a realidade física da bacia ou uma correta simulação dos processos hidrológicos (STRAUCH; VOLK, 2013). Além disso, aumenta o tempo de pré-processamento dos dados e as incertezas do modelo (ABBASPOUR et al., 2015; HÖRMANN et al., 2009).

2.7 BREVE INTRODUÇÃO AOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O aquecimento do sistema climático global já é considerado inequívoco (IPCC, 2014). Embora alguns estudos discutam a proximidade de um ponto irreversível desse processo, há pesquisas que indicam que esse limiar já foi atingido (LENTON et al., 2019; RANDERS; GOLUKE, 2020). Isso significa que, ainda que fossem reduzidas a zero as emissões de GEE, as temperaturas continuariam a aumentar por centenas de anos (RANDERS; GOLUKE, 2020).

Para aprofundar a compreensão dos mecanismos responsáveis pela variabilidade do sistema climático como um todo, modelos climáticos são utilizados, dado que a complexidade desse sistema impede o uso de experimentos reais. Esses modelos são representações numéricas do clima baseadas em teoria de fluxos e processos atmosféricos (EDWARDS, 2011; LAPRISE, 2008).

Modelos que visam o entendimento da dinâmica dos componentes físicos do sistema climático e geram projeções com base em cenários futuros de emissão de GEE, aerossóis e mudanças no uso da terra em escalas espaciais (240 a 600 km) são chamados Modelos de

Circulação Global (GCMs). (FLATO et al., 2013; PBMC, 2014; SAMPAIO; DIAS, 2014). Com a evolução da capacidade computacional, muitos modelos estão sendo estendidos a Modelos do Sistema Terrestre (ESM – *Earth System Models*), que incluem ainda a representação de ciclos biogeoquímicos (FLATO et al., 2013).

Além do consenso acerca do aumento das temperaturas médias projetado por modelos climáticos na maior parte do planeta, quando as projeções geradas pelos modelos se referem à precipitação, não há um padrão global definido e diversos resultados são possíveis (SHEPHERD, 2014). Algumas regiões podem potencialmente vivenciar déficits de chuvas, já outras poderão verificar um aumento na quantidade, frequência e intensidade das precipitações (IPCC, 2018). Assim, salienta-se que a resposta futura da vazão diante das mudanças climáticas, dependerá da interação de diversos processos físicos termodinâmicos e dinâmicos que exercem forte controle sobre o clima regional (MAROTZKE et al., 2017; SHEPHERD, 2014).

Inúmeros trabalhos têm chamado a atenção para a urgência de governos e sociedade buscarem estratégias direcionadas a minimizar as repercussões econômicas e sociais das mudanças climáticas na água (BRIGHENTI, 2019; IPCC, 2022a; KLAAS et al., 2020; TUNDISI, 2008; UNESCO; UN-WATER, 2020). Para isso, primeiro é preciso compreender quais as possíveis tendências dessas mudanças.

No sentido de melhorar a compreensão acerca de trajetórias climáticas possíveis, o Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP- *Coupled Model Intercomparison Project*), organizado no âmbito do Programa Mundial de Pesquisa Climática (WCRP- *World Climate Research Programme*) tem gerado bases a partir de um conjunto de modelos climáticos globais que auxiliam sobremaneira as avaliações nacionais e internacionais relacionadas às mudanças climáticas. A disponibilização pública das projeções de variáveis do clima, geradas a partir dos modelos envolvidos no CMIP, tornou possível para as mais diversas áreas do conhecimento a investigação de futuros prováveis diante de diferentes cenários (EYRING et al., 2016). O CMIP vem sendo utilizado nas análises do Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC- *Intergovernmental Panel on Climate Change*) e, na sua sexta fase (CMIP6), está presente no 6º Relatório de Avaliação (AR6) do Painel. O IPCC já publicou 3 das 4 partes do AR6, entre agosto de 2021 e abril de 2022 (IPCC, 2022b).

Para o entendimento acerca dos futuros possíveis com as mudanças climáticas, o CMIP utiliza cenários. Para o CMIP6, os cenários foram elaborados com base nos chamados Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP- *Shared Socioeconomic Pathway*),

referidos como SSPx-y. Na sigla, SSPx representa as tendências socioeconômicas futuras, descritas pelo Caminho Socioeconômico Compartilhado x. Já o y se refere ao nível de forçante radiativa média global (ou ao nível da mudança no fluxo de energia no topo da atmosfera para uma dada mudança na temperatura anual da superfície global) esperado para 2100 no SSPx (IPCC, 2022a). Para a aplicação dos cenários também é recorrente adotar um conjunto de anos de referência, nos quais o período entre 2021 e 2040 se refere ao curto prazo, o período entre 2041 e 2060 cobre o médio prazo e 2081 a 2100 se refere ao longo prazo (IPCC, 2022a). Neste trabalho foram definidos para análise os cenários SSP2 4.5 e SSP5 8.5, ambos nos períodos de curto e médio prazo.

Os SSPs descrevem alternativas do desenvolvimento da sociedade futura. No SSP2 as sociedades tendem a manter seus padrões históricos, sem desvios substanciais. Assim, o SSP2 4.5 é a combinação de um caminho socioeconômico no qual a sociedade mantém as mesmas atitudes e prioridades, com um nível de forçante radiativa intermediário, alcançando 4,5 watts por metro quadrado (W/m^2) em 2100. Já o SSP 5 prevê tendências positivas para o desenvolvimento humano, com investimentos em saúde e educação e com crescimento econômico. Tudo isso, no entanto, em uma economia baseada em combustíveis fósseis. Para o cenário SSP5 8.5, esse caminho alternativo é associado a altas taxas de emissões, alcançando uma forçante radiativa de 8,5 W/m^2 em 2100 (O'NEILL et al., 2016).

Para estudos de impactos, normalmente são requeridas informações mais detalhadas acerca do clima da área de estudo. O refinamento de escala das projeções climáticas produzidas a partir de GCMs é denominado *downscaling* e pode ser dinâmico ou estatístico (PBMC, 2014). No *downscaling* dinâmico, a simulação do clima regional é feita a partir de um Modelo de Circulação Regional (MCR) conduzido por um GCM (OLIVEIRA, 2022). Já no *downscaling* estatístico, parte-se do pressuposto de que a relação entre os preditores e variável-resposta é estacionária (PBMC, 2014). A partir disso são estabelecidas relações matemáticas entre as variáveis climáticas de grande escala e a variável climática local. Isso pode ser feito através da comparação de projeções de clima advindas de GCM com dados históricos (HAIDER et al., 2020; ZORITA; VON STORCH, 1999).

Intrínseco ao *downscaling* estatístico tem-se o *downscaling* espacial que pode ser realizado por meio de interpolação de dados climáticos, através de modelos estatístico-espaciais. Nesse caso, informações locais de clima são obtidas considerando grades de pontos de alta resolução espacial, geradas a partir de saídas dos modelos globais (os quais apresentam baixa resolução espacial) (HAIDER et al., 2020; OLIVEIRA, 2022).

2.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS POLÍTICAS DE GESTÃO HÍDRICA NO BRASIL FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Há mais de 40 anos, cientistas vêm se reunindo com governos e organizações, em diversas partes do mundo, para trazer questões relacionadas à crise climática e ambiental ao cerne dos debates internacionais, uma vez que exigem ações globais. No âmbito dessas reuniões, tratados foram sendo firmados entre os países. Nesse sentido, destaca-se a adoção do Protocolo de Quioto, em 1997 no Japão e do Acordo de Paris em 2015, na França. No entanto, apesar das negociações já estarem há décadas em pauta, poucos progressos foram feitos (RIPPLE et al., 2021).

Ainda no ano de 2015, as Nações Unidas (UN – *United Nations*) criaram um plano de ação a ser implementado pelos países e partes interessadas no sentido de orientar o desenvolvimento sustentável nas dimensões ambiental, social e econômica. A fim de estimular a ação, 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) foram estabelecidos, em 169 metas globais, direcionados por valores compartilhados globalmente (ROMA, 2019; UN, 2015). Pela conexão com os assuntos explorados na presente pesquisa, ressaltam-se os ODS 6, acerca da disponibilidade e manejo sustentável de água para todos, ODS 7, associado à energia limpa e ODS 13, sobre mitigação das mudanças climáticas. Porém, ressalta-se também que os 17 ODS definidos não se dissociam de fato, à medida que o fortalecimento de um reflete nos demais (UN, 2015).

No Brasil, a governança para implementação dos ODS foi instituída por meio do Decreto nº 8.892 de 2016 (BRASIL, 2016), que criou a Comissão Nacional para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ROMA, 2019). Porém, na contramão dos esforços globais, já no primeiro ano do atual governo brasileiro, esse decreto foi revogado a partir do Decreto nº 10.179 de 2019 (BRASIL, 2019). No país, pouco se tem feito para cumprimento dos acordos internacionais firmados acerca do clima e meio ambiente. Isso demonstra um retrocesso e dá indicações de que a legislação brasileira atual não será suficiente para auxiliar na mitigação das crises instauradas. Além da omissão quanto a pauta ambiental, a omissão de dados por parte do governo federal confirma a grande importância dos dados gerados pelos centros de pesquisa e organizações da sociedade civil para o monitoramento e o aperfeiçoamento de políticas públicas (GT AGENDA 2030, 2022; SCANTIMBURGO, 2022).

Quanto à gestão dos recursos hídricos no Brasil, esta é orientada sobretudo pela Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela chamada Lei das Águas, nº

9433 de 1997 (BRASIL, 1997). Entre seus fundamentos, institui-se a água como um bem de domínio público que deve ser gerido de maneira descentralizada, tendo como unidade de implementação a bacia hidrográfica. De acordo com essa Lei, além do Poder Público, os usuários e as comunidades devem ser integrados na gestão das bacias, sempre visando o interesse comum e preservando o múltiplo uso desse recurso (BRASIL, 1997).

Os Comitês de Bacias Hidrográficas (CBH) são a base da gestão participativa das águas, com atuação em bacias hidrográficas ou sub-bacia hidrográfica de um tributário do curso de água principal da bacia. Nos Comitês são debatidas questões relacionadas à gestão dos recursos hídricos na área de atuação, estabelecidos mecanismos de cobrança pelo uso da água e arbitrados conflitos. Para promover a atuação conjunta, representantes da União, do Estado, Municípios, usuários de água e sociedade civil integram os CBH (BRASIL, 1997). Em Minas Gerais, existem 36 CBH. O CBH do Rio Araguari, criado pelo Decreto nº 39.912 de 1998 (MINAS GERAIS, 1998), atua sobre a Bacia do Reservatório de Nova Ponte.

Embora seja observada na legislação uma maior abertura à participação social nos Comitês, críticas são feitas à forma com que foi consumada essa participação. De acordo com Fonseca; Bursztyn; Moura (2012) o uso de linguagem técnica, estabelece uma relação de dominação de alguns grupos sociais sobre outros. Isso ocorre uma vez que dificulta a atuação daqueles menos instruídos, normalmente representantes da população local, na discussão e tomada de decisão. Nesse sentido, ações de capacitação que preparem a sociedade civil para participação de modo mais igualitário, com foco em instrução e compreensão das linguagens técnicas, fortalecem o processo decisório dos Comitês e podem aumentar a efetividade das políticas públicas a serem adotadas (FONSECA; BURSZTYN; MOURA, 2012).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

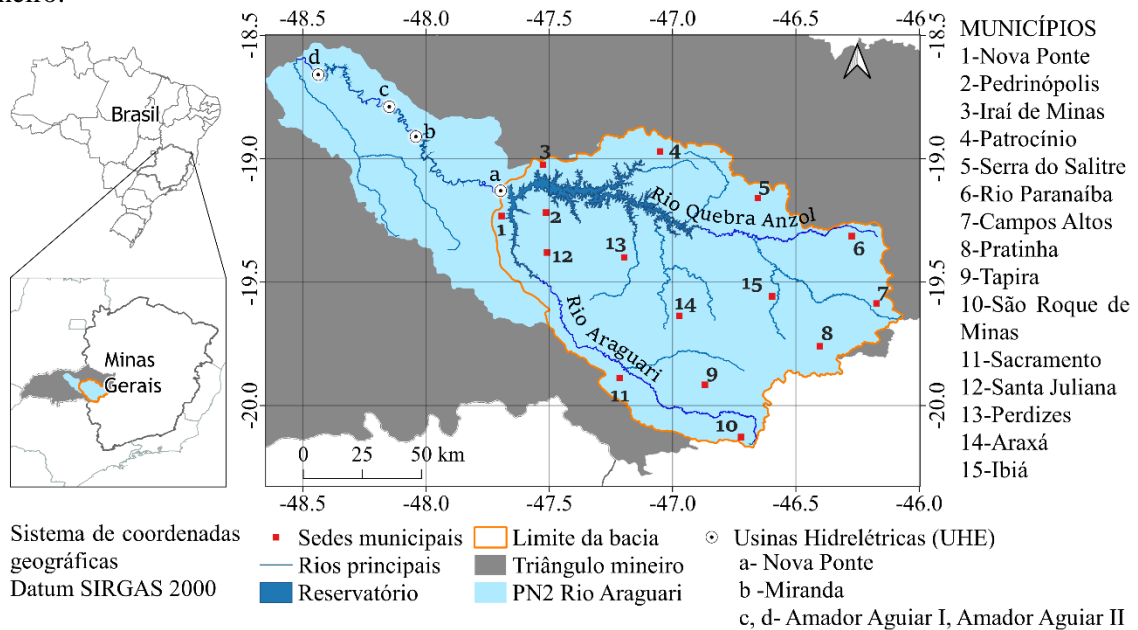
3.1.1 Localização

A área em estudo constitui a Bacia do Reservatório de Nova Ponte, inserida na Unidade Estratégica de Gestão (UEG) do Rio Paranaíba (Bacia do Rio Araguari - PN2), à montante da barragem do reservatório de acumulação da UHE de Nova Ponte. Possui uma extensão de 15.416 km² e está localizada no alto curso do Rio Araguari, na mesorregião do Triângulo Mineiro, Minas Gerais. Abrange parte de 15 municípios: Araxá, Campos Altos, Ibiá, Iraí de Minas, Nova Ponte, Patrocínio, Pedrinópolis, Perdizes, Pratinha, Rio Paranaíba, Sacramento, Santa Juliana, São Roque de Minas, Serra do Salitre e Tapira (Figura 1).

A Bacia do Reservatório de Nova Ponte é drenada por trechos dos rios Araguari e Quebra-Anzol (CALLISTO et al., 2014) (Figura 1). Seu exutório localiza-se nas coordenadas geográficas 19° 7' 44,62" Sul e 47° 41' 34,95" Oeste, no município de Nova Ponte.

O reservatório da UHE de Nova Ponte, no nível de água máximo normal de operação (815 metros) apresenta uma área inundada de 443 km² (CEMIG, 2011). Gerenciado pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), foi formado em 1993 no rio Araguari e implantado em 1994 para fins hidrelétricos (VONO, 2002). Apresenta um volume útil de 10.380 hm³ de água, que pode gerar até 510 MW de energia elétrica pela usina. A barragem foi construída com 1.600 metros de comprimento e altura máxima de 142 metros. A crista da barragem, com uma largura de 12 metros, é utilizada para tráfego público (CEMIG, 2011).

Figura 1 - Localização da Bacia do Reservatório de Nova Ponte na Bacia do Rio Araguari, Triângulo Mineiro.

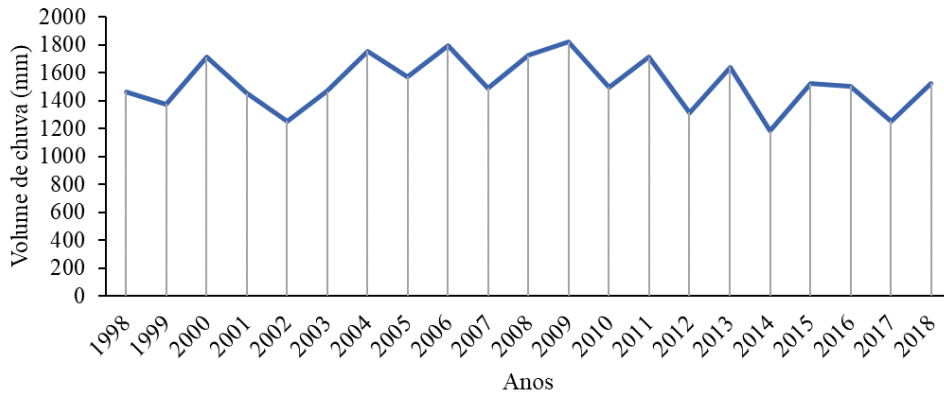


Fonte: limites estaduais; mesorregião, sedes: IBGE (2019a); reservatório: ANA (2018); drenagem: IGAM (2018); PN2: SISEMA (2019).

3.1.2 Clima

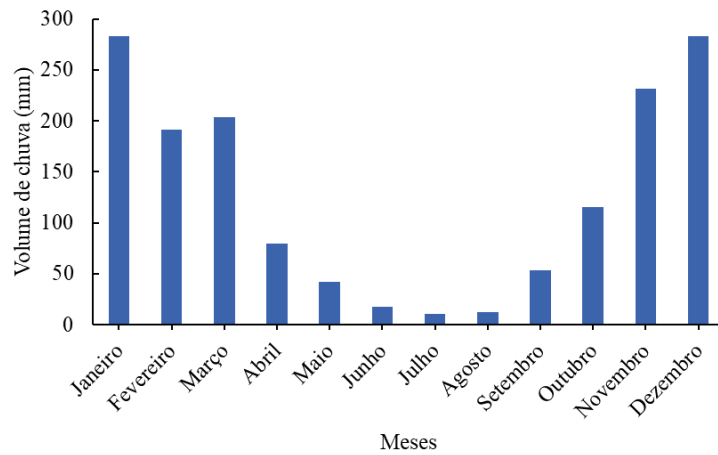
A avaliação das temperaturas e precipitações médias mensais para o período entre 1998 e 2018, definido para a simulação hidrológica nesse estudo, indicou a ocorrência de meses chuvosos com temperaturas médias mais elevadas de outubro a março e, entre abril e setembro, meses secos com menores temperaturas médias (Figuras 3 e 4). A precipitação total anual média obtida foi de 1.526,1 mm de chuva. Observou-se que o ano de 2009 foi o ano que registrou o maior total anual, de 1.818,8 mm. Já 2014 teve o menor total anual entre os 21 anos considerados, igual a 1.183,3 mm de chuva (Figura 2). Dezembro foi o mês mais chuvoso, com um volume total médio de 283 mm. Julho foi o mês mais seco, com um total médio de 10,6 mm de chuva dentro dos 21 anos analisados (Figura 3). Este foi também o mês que apresentou a temperatura média mais baixa, igual a 19,5°C. Em contrapartida, fevereiro, com temperatura média de 24,8°C foi a média mais alta entre os meses. A temperatura média mensal foi igual a 22,8°C. As máximas temperaturas giraram em torno de 29,1°C, e as mínimas, em torno de 16,4°C, o que representa uma amplitude térmica média de 12,7 °C para o período analisado (Figura 4).

Figura 2 - Totais anuais de chuva (mm) na região da Bacia do Reservatório de Nova Ponte considerando os 21 anos de dados, entre 1998 e 2018.



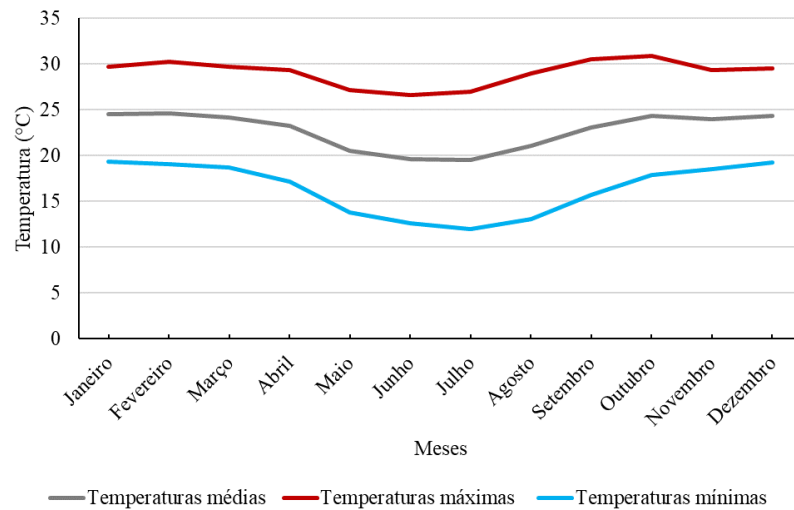
Fonte: ANA (2020).

Figura 3 – Totais médios mensais de chuva (mm) calculadas a partir de 21 anos de dados (1998 a 2018), para a região da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.



Fonte: ANA (2020).

Figura 4 - Médias mensais das temperaturas máximas, mínimas e médias (°C) obtidas a partir de 21 anos de dados (1998 a 2018).

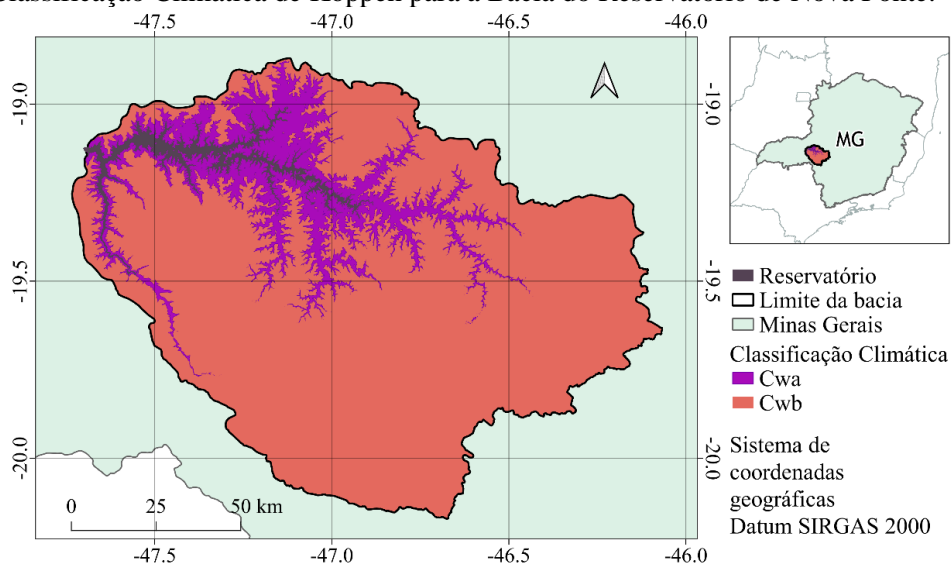


Fonte: INMET (2020).

Em uma classificação mais geral acerca do clima da Bacia do Reservatório de Nova Ponte, ele pode ser caracterizado como Cwa e Cwb de acordo com o mapeamento da classificação climática de Köppen para o Brasil, produzido com 100 metros de resolução espacial (ALVARES et al., 2013) (Figura 5). O sistema de Köppen simboliza os tipos de clima por dois ou três caracteres, onde o primeiro, em letra maiúscula, indica a zona climática e é definido pela temperatura e precipitação, o segundo considera a distribuição das chuvas e o terceiro é a variação sazonal da temperatura (ALVARES et al., 2013).

A área de estudos encontra-se inteiramente inserida na zona climática ‘C’ correspondente a climas mesotérmicos ou temperados (ROHLI; VEGA, 2018). Quanto às classes Cwa e Cwb, o segundo caractere, correlato em ambos os tipos climáticos (w), indica inverno seco para toda a região, com precipitação média inferior a 60 mm em pelo menos um mês no inverno (SÁ JÚNIOR, 2009). Nas classes observadas, diferencia-se apenas o terceiro caractere, associado à variação na temperatura. A variedade climática representada pela letra ‘a’ denota verões quentes, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C. Já a letra ‘b’ indica verão moderadamente quente, com temperatura média do mês mais quente inferior a 22 °C e, durante pelo menos quatro meses do ano, superior a 10 °C (ALVARES et al., 2013; SÁ JÚNIOR, 2009). A diferença observada no clima, no qual foram discernidas temperaturas mais altas no entorno do reservatório, pode estar relacionada às menores altitudes localizadas nessa região (Figura 5).

Figura 5 - Classificação Climática de Köppen para a Bacia do Reservatório de Nova Ponte.

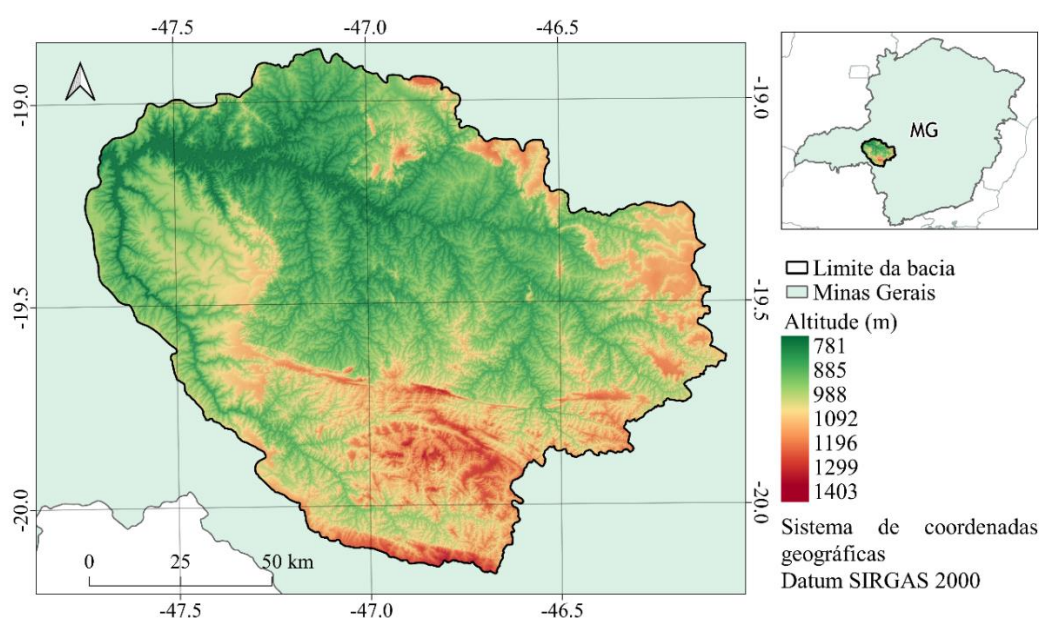


Fonte: reservatório: ANA (2018); clima: Alvares et al. (2013); limites estaduais: IBGE (2019a).

3.1.3 Topografia

Na bacia do reservatório de Nova Ponte observa-se uma amplitude altimétrica de 622 metros, com altitudes que vão de 781 a 1.403 metros (Figura 6). Para uma melhor visualização, as altitudes foram divididas em 6 classes com intervalos iguais. Com base nisso, a menor classe de altitudes, entre 781 e 885 metros, é observada na área do entorno do reservatório e equivale a 12,2% do total. Na segunda classe altimétrica considerada, entre 885 e 989 metros, concentra-se a maior parte da bacia delimitada (35,9%), sobretudo nas regiões central e norte da bacia. Já as maiores altitudes, superiores a 1.300 metros, equivalem a menos de 1% da área de estudos e localizam-se principalmente na porção sul.

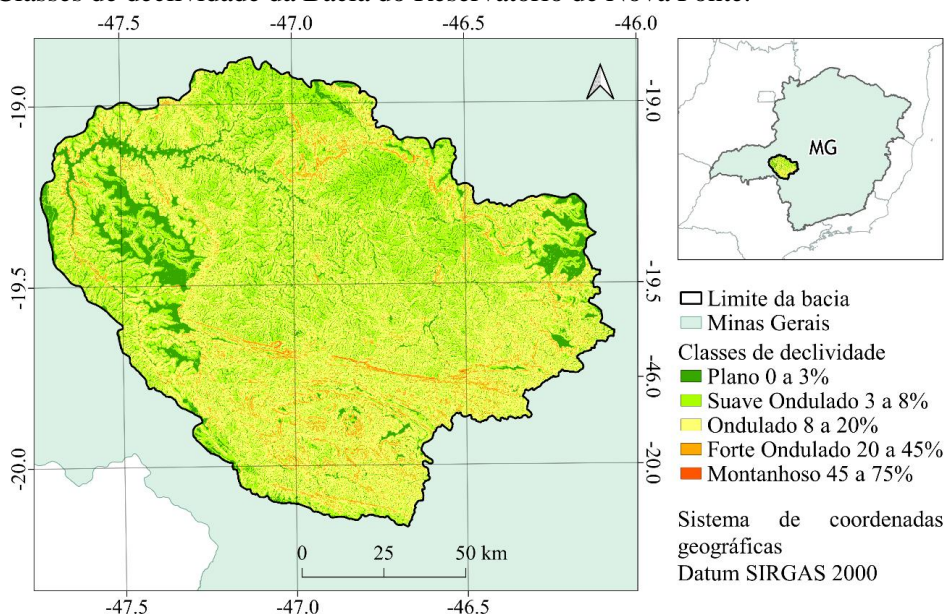
Figura 6 - Variação altimétrica na Bacia do Reservatório de Nova Ponte.



Fonte: Modelo Digital de Elevação: NASA JPL (2020); limites estaduais: IBGE (2019a).

A Bacia do Reservatório de Nova Ponte apresenta um terreno predominantemente ondulado (47,3%), com declividade entre 8 e 20%, de acordo com a classificação proposta pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2010) (Figura 7). Por sua vez, a classe de relevo suavemente ondulado, isto é, entre 3 e 8% de declividade, corresponde a 35,3% do total.

Figura 7 - Classes de declividade da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.

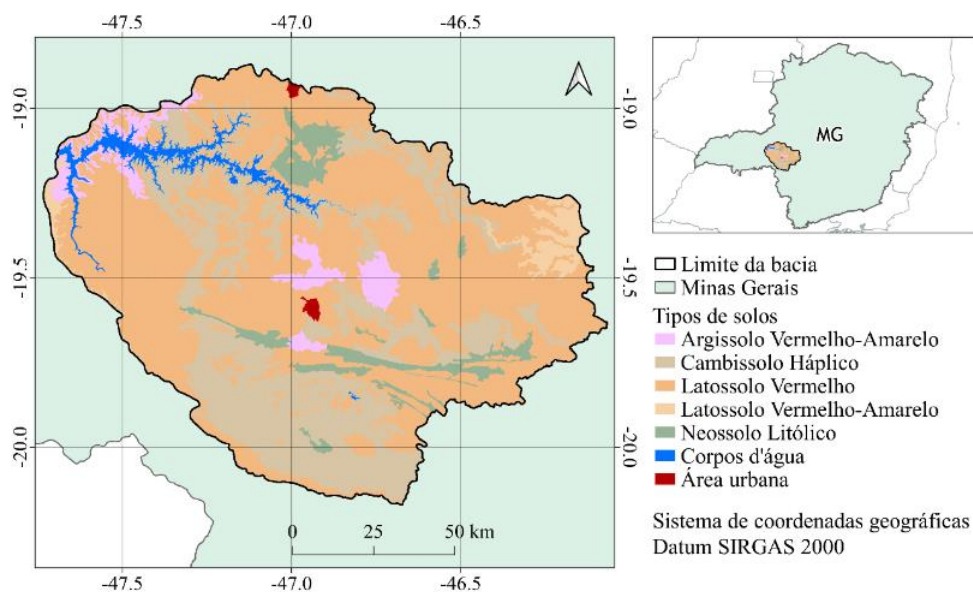


Fonte: limites estaduais: IBGE (2019a); declividade: CPRM (2010).

3.1.4 Solos

Na Bacia do Reservatório de Nova Ponte, entre os tipos de solos verificados, há predominância das classes Latossolo Vermelho, ocupando 57,74% de todo o território e Cambissolo Háplico, com 27,37% de ocorrência. Também são observadas manchas de Neossolos Litólicos (4,96%), Argissolos Vermelho-Amarelos (4,42%) e Latossolos Vermelho-Amarelos (2,62%). A classificação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018) utilizada, com escala de 1:250.000, inclui também outras classes que não são caracterizadas como solos, aqui representadas pelos corpos d'água e áreas urbanas. Estes, somados, correspondem a 2,89% do total (Figura 8).

Figura 8 - Tipos de solos da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.



Fonte: limites estaduais: IBGE (2019a); solos: IBGE (2018).

A principal classe identificada, os Latossolos, são solos profundos com estruturas bem-desenvolvidas, pouca variação textural entre os horizontes e boa drenagem. Embora sejam geralmente pouco férteis devido à perda de minerais por lixiviação, são propícios para o uso em práticas agrícolas intensas quando associados a relevos aplainados. Isso porque, devido às suas características morfológicas, esse tipo de solo apresenta alta estabilidade (IBGE, 2019b). Na área da bacia, são observados Latossolos Vermelhos e Latossolos Vermelho-Amarelos.

A segunda classe dominante, os Cambissolos, têm ocorrência principalmente em regiões serranas e apresentam características variáveis. Isso ocorre porque, nesses solos, não há atuação de processos pedogenéticos expressivos a ponto de imprimir uma característica marcante a eles. Estes solos estão relacionados ao baixo grau de intemperismo e diferenciam-se dos Neossolos por apresentarem um horizonte B com espessura maior que 10 centímetros (cm) (IBGE, 2019b). Na bacia estudada, são classificados como Cambissolos Hápticos.

Assim como os Cambissolos, os Neossolos são solos que apresentam desenvolvimento pedogenético pouco avançado e, portanto, também apresentam características variáveis. São identificados pela ausência de horizonte B ou com espessura inferior a 10 cm. Os Neossolos Litólicos, presentes na área objetivada, apresentam como característica a ocorrência associada a condições de relevo forte ondulado a montanhoso (IBGE, 2019b).

Por fim, os Argissolos são solos que apresentam como principal característica o aumento de argila do horizonte superficial A para o subsuperficial B do tipo textural.

Argissolos Vermelho-Amarelos são formados em condições de boa drenagem, o que favorece um intemperismo mais intenso, sendo estes profundos e bem-desenvolvidos (IBGE, 2019b).

3.1.5 Cobertura vegetal e usos da terra na bacia

A área de estudos está situada no domínio do bioma Cerrado (Figura 9). De acordo com Ribeiro e Walter (2008), a vegetação desse bioma apresenta fisionomias que englobam formações florestais, savânicas e campestres.

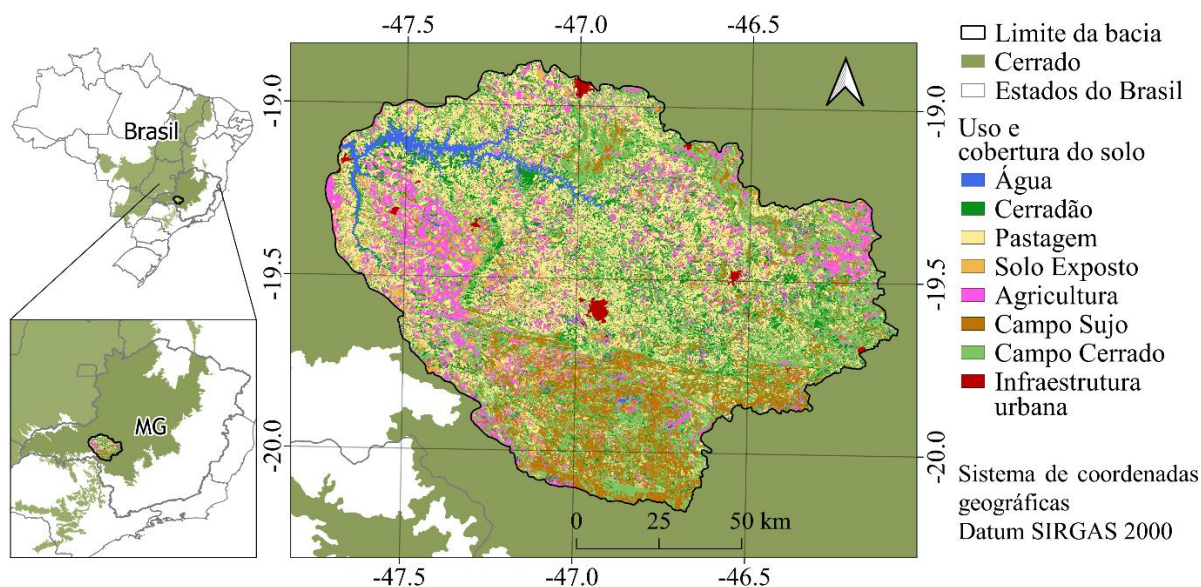
As formações florestais são identificadas pela predominância de espécies arbóreas. Incluem, no Cerrado, as matas de galeria e ciliares, associadas a cursos d'água, assim como as matas secas e os cerradões, os quais não estão diretamente relacionados com a presença dos corpos hídricos (RIBEIRO; WALTER, 2008). Formações savânicas, são caracterizadas pela presença de árvores e arbustos espalhados sobre gramíneas e incluem, principalmente, fitofisionomias associadas ao Cerrado sentido restrito. Este caracteriza-se pela presença de árvores baixas, com folhas coriáceas, troncos retorcidos e casca espessa. Entre as fitofisionomias relacionadas, figuram o cerrado rupestre, associado a afloramentos rochosos e campo cerrado, que apresenta indivíduos de espécie arbórea, embora em baixa densidade. Já as formações campestres predominam as espécies herbáceas e algumas arbustivas. As fitofisionomias encontradas incluem os campos limpos (predominância de estrato herbáceo) e campos sujos (contém arbustos espalhados por todo estrato herbáceo) (RIBEIRO; WALTER, 2008).

A área do Cerrado na qual inclui-se a bacia estudada abarca características marcantes da mesorregião do Triângulo Mineiro. Apresenta grande aptidão agrícola uma vez que o tipo de solo, clima e relevo favorecem o cultivo de espécies com valor econômico (SANTOS, 2019). Mudanças paisagísticas recorrentes e profundas no Triângulo, sobretudo a partir da década de 1970 com a efetivação de programas governamentais para a ocupação do Cerrado, acarretaram a perda de grandes áreas ocupadas por vegetação típica do bioma nessa região (ARACRI; AMARAL; LOURENÇO, 2011; PEDROSA; SOUZA, 2014).

Na Bacia do Reservatório de Nova Ponte observa-se, a partir da Figura 9, uma paisagem com matriz composta por um mosaico de campo sujo (32,24%) e pastagem (32,81%). Tanto o campo cerrado quanto o campo sujo são as classes de maior ascendência na região sul da Bacia do Reservatório de Nova Ponte. Isso pode estar associado à área de influência do Parque Nacional da Serra da Canastra, localizado no município de São Roque de Minas. Quanto a classe agricultura, esta representa 11,73% do total. Sua presença é marcante na região oeste da bacia, onde se encontram os municípios de Santa Juliana, Perdizes e

Pedrinópolis, assim como na região leste, nos municípios de Rio Paranaíba e Serra do Salitre. As demais classes são pouco expressivas, não chegando a representar 6% do total (Figura 9).

Figura 9 - Inserção da bacia no bioma Cerrado e classes de uso e cobertura do solo da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.



Fonte: limites estaduais: IBGE (2019a); bioma: IBGE; MMA (2019); uso e cobertura do solo: Holanda (2021).

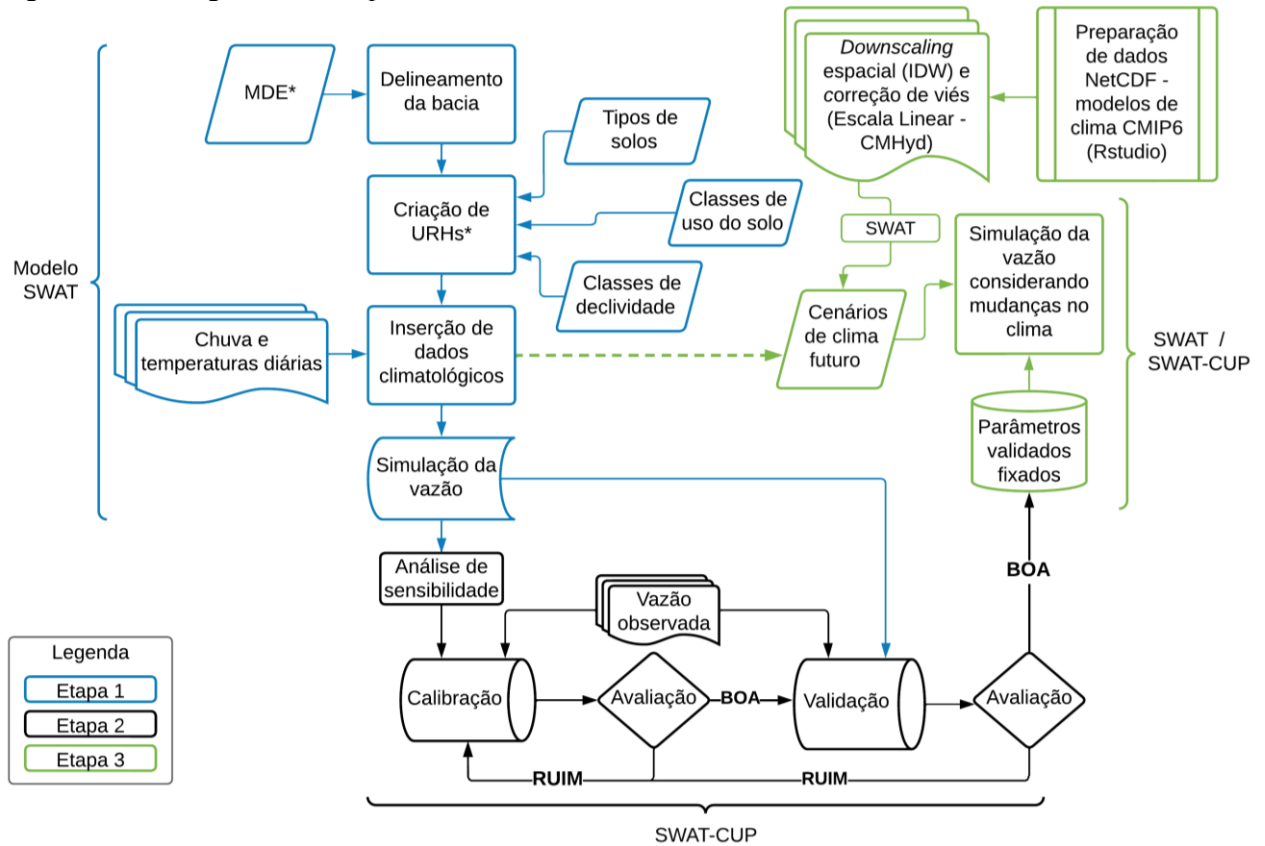
3.2 FLUXOGRAMA DAS PRINCIPAIS ETAPAS

Para a realização da pesquisa, diversas etapas foram executadas até a simulação hidrológica com cenários de mudanças climáticas. A primeira delas foi a simulação da vazão no modelo SWAT através de três passos principais: o delineamento da bacia estudada, criação das Unidades de Resposta Hidrológica e a inserção das séries históricas de clima.

A segunda etapa foi realizada no software SWAT-CUP (ABBASPOUR, 2007) e compreende a calibração e validação do modelo. Obtidos bons resultados nessa etapa, os valores dos parâmetros que geraram melhores resultados foram fixados no projeto do SWAT-CUP. A partir disso, a etapa 3 passa pelo SWAT e pelo SWAT-CUP. Primeiro, os dados das projeções de precipitação e temperatura de modelos de clima, participantes da Fase 6 do CMIP obtidos em formato *Network Common Data Form* (NetCDF), foram pré-processados no software Rstudio. Os dados foram transformados em planilhas (Excel) para facilitar o manuseio das informações. Foram realizados ainda os processos de redução da escala espacial (*downscaling* espacial) e correção de viés dos dados de projeções climáticas globais, de forma a adequá-los à região estudada. Os arquivos de dados climáticos resultantes passaram pelo modelo SWAT para que, a partir disso, fossem transformados para o padrão dos dados climáticos que são gerados pelo modelo a cada execução (pcp1.pcp; tmp1.tmp). Os arquivos

no novo formato foram inseridos diretamente no diretório principal do SWAT no SWAT-CUP e, já com os parâmetros ajustados fixados, foram configuradas as datas futuras e as simulações da vazão realizadas. A Figura 10 ilustra de forma resumida os principais passos.

Figura 10 - Fluxograma das etapas a serem executadas.



*MDE= Modelo Digital de Elevação; URH = Unidade de Resposta Hidrológica.

Fonte: autoria própria.

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS PARA MODELAGEM DE VAZÃO PASSADA E FUTURA

O modelo hidrológico SWAT utiliza como entradas dados tabulares, compostos por variáveis climáticas e parâmetros dos solos e vegetação, além de dados espaciais, constituídos pelo MDE, mapa de tipos de solos, uso e cobertura, bem como manejo do solo na região. Para a representação dos cenários futuros de mudanças climáticas, os mesmos tipos de dados foram utilizados nesse modelo. A modificação realizada foi relacionada à temperatura e à precipitação, ambos provenientes de modelagem climática, de acordo com cenários de aumento de emissões de GEE.

3.3.1 Versão do modelo e softwares

O modelo hidrológico SWAT foi executado através da interface QSWAT3 no software livre de SIG QGIS 3.10 LTR (*Long Term Release*). O software QGIS foi também utilizado para o necessário processamento inicial dos dados geográficos. Para a calibração e a validação do modelo, foi utilizado o programa SWAT-CUP 2019 versão 5.2.1.1. Já para a correção de viés das projeções climáticas utilizou-se o software *Climate Model data for Hydrologic modeling* (CMHyd) (RATHJENS et al., 2016). Além disso, a análise de dados tabulares foi realizada tanto no Excel quanto no software de programação R, versão 4.0.4, este último com auxílio do RStudio versão 1.4.1100 (R CORE TEAM, 2021).

3.3.2 Fonte dos dados

As bases utilizadas nesta pesquisa estão resumidas no Quadro 2, associadas aos tipos de dados, uma breve descrição e à fonte da qual foram obtidas. Todas as informações utilizadas foram disponibilizadas gratuitamente nas fontes.

Quadro 2 - Fontes e tipos de dados a serem utilizados.

Dados	Tipos de dados	Descrição	Fonte
Topografia	Geoespaciais	Modelo Digital de Elevação (resolução espacial: 30 metros).	NASA JPL (2020)
Uso do solo	Geoespaciais	Mapa no formato raster, elaborado a partir de imagens Sentinel 2 (resolução espacial: 10 m).	HOLANDA (2021)
Temperatura	Tabulares	Séries históricas diárias (1995 a 2018).	INMET (2020)
Precipitação	Tabulares	Séries históricas diárias (1995 a 2018).	ANA (2020)
Vazão	Tabulares	Séries históricas mensais (1998 a 2018).	ANA (2020, 2022); CEMIG, (2020)
Cenários de clima futuro	Tabulares	Projeções diárias de temperatura e chuva (2019 a 2060).	CMIP6 (2020)
Solos	Geoespaciais	Mapa no formato raster (escala de 1:250.000).	IBGE (2018)
Solos	Tabulares	Características das camadas dos solos.	EMBRAPA (2021)

3.3.2.1 Dados geográficos de entrada

O MDE foi composto pelo produto NASADEM, com 30 metros de resolução espacial, criado por um reprocessamento de dados de radar originais da SRTM e preenchimento de vazios, principalmente por informações de elevação do ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal and Reflection Radiometer*) GDEM (*Global Digital Elevation Model*) (CRIPPEN et

al., 2016). Para a composição do MDE as imagens foram obtidas na plataforma *Earth Data* da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) (NASA JPL, 2020).

Os solos da área de estudo foram caracterizados a partir do mapa de tipos de solos desenvolvido pelo IBGE (2018) (Figura 8) em escala 1:250.000. Os usos do solo e coberturas foram caracterizados através do mapa de uso e cobertura do solo elaborado por Holanda (2021), através da classificação de imagens do satélite *Sentinel 2* com 10 metros de resolução espacial (Figura 9).

Todos os dados geográficos utilizados foram recortados para a área de estudo, projetados em um sistema de coordenadas planas, utilizando o SIRGAS 2000 como sistema geodésico de referência e o sistema UTM (Universal Transversa de Mercator) como projeção. O fuso correspondente na região equivale ao 23 Sul (EPSG: 31983).

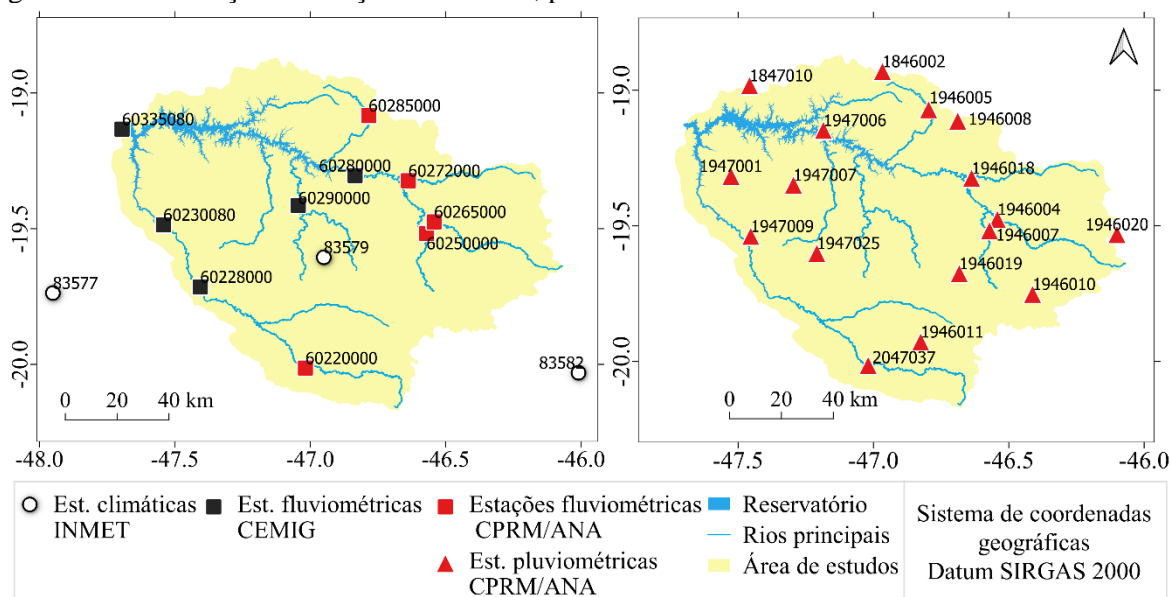
3.3.2.2 Dados tabulares de entrada

As informações utilizadas nesse trabalho sobre quantidade de chuva e temperatura histórica diárias e os parâmetros dos solos foram inseridos no modelo hidrológico SWAT em formato textual e arranjados em tabelas. Nesse mesmo formato foram utilizadas as informações sobre vazão mensal (SWAT-CUP), assim como as projeções diárias de precipitação e temperatura a serem utilizadas nos softwares CMHyd e SWAT-CUP.

3.3.2.2.1. Séries históricas de clima e de vazão

Na presente pesquisa, para representação do clima da região, foram utilizados os dados observados das variáveis temperatura e precipitação diária. Isso foi feito para que a representação do clima histórico na simulação inicial fosse compatível com as projeções climáticas a serem empregadas. A temperatura foi obtida junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020), coletada a partir das estações meteorológicas: 83579, no município de Araxá; 83577, no município de Uberaba e 83582, no município de Bambuí. Os dados de precipitação foram obtidos através de estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA, 2020) em parceria com a CPRM. A radiação solar diária foi simulada pelo modelo SWAT e os registros de vazão mensal, utilizados na etapa de calibração do modelo após a simulação, também foram cedidos pela ANA (2020, 2022) e pela CEMIG (2020) (Figura 11).

Figura 11 - Distribuição de estações climáticas, pluviométricas e fluviométricas na bacia.



Fonte: Estações e reservatório: ANA (2018), Drenagem: IGAM (2018).

Para definição do período de dados a ser utilizado, tanto na simulação inicial, quanto na calibração e validação do modelo, o procedimento envolveu a análise de dados faltantes. Para isso, as informações foram organizadas no Excel e analisadas no R através dos pacotes *Amelia* (HONAKER; KING; BLACKWELL, 2011) e *summarytools* (COMTOIS, 2021). Através disso, foi possível visualizar os períodos com ausência de registros pelos “mapas de dados faltantes” (*missingness maps*) e, dessa forma, definiu-se o período a ser considerado entre 1998 e 2018. Porém, uma vez que, para obter um melhor desempenho na modelagem, é necessário que o modelo seja aquecido antes que os dados comecem a ser gerados, mais 3 anos de dados foram adicionados especificamente para o período de aquecimento do modelo (*warm up*): de janeiro de 1995 a dezembro de 1997. Esse período é importante para que o modelo seja executado algumas vezes antes que os dados de saída sejam gerados. Isso é feito na tentativa de minimizar as incertezas das estimativas feitas pelo usuário das variáveis do estado inicial (ZHANG; SRINIVASAN; HAO, 2007). Espera-se, portanto, que após esse período os dados de entrada sejam capazes de produzir estimativas mais estáveis para os parâmetros de interesse (NORATO; DUARTE, 2011). Ao final, no modelo SWAT, foi inserida uma base de dados de 24 anos, sendo de janeiro de 1995 a dezembro de 2018.

Após essa análise, o preenchimento de lacunas restantes nas séries de temperatura e precipitação (Figura 14) foi feito internamente no modelo SWAT por meio de um gerador climático (*Weather Generator*). Quando não são obtidas bases completas, ele permite a utilização de estatísticas mensais criadas por meio das séries temporais disponíveis (ARNOLD et al., 2012b; BRESSIANI, 2016).

3.3.2.2.2. Solos

O modelo SWAT requer a inserção de 17 parâmetros dos solos encontrados na área de estudos: o número de camadas do solo, grupo hidrológico, máxima profundidade da raiz no perfil do solo, profundidade das camadas, densidade aparente, capacidade de água disponível nas camadas do solo, condutividade hidráulica saturada, porcentagem de carbono orgânico, de areia, de silte, de argila e de fragmentos de rocha, albedo, fator erodibilidade do solo, fração de porosidade, volume de fissura no perfil do solo e textura. Destes, apenas os três últimos são opcionais.

Devido à escassez de informações detalhadas de solos no contexto brasileiro (MELLO et al., 2020) e, à grande quantidade de parâmetros requerida, foi necessária a estimativa. Para calcular parâmetros indisponíveis, informações de profundidade do solo, textura e matéria orgânica, disponibilizadas em perfis de solos da EMBRAPA (2021), foram utilizadas. Com base nesses dados e por meio de uma planilha macro do Excel elaborada por Narasimhan e Dhanesh (2012) foram adotados grupos hidrológicos de acordo com a classificação dos solos brasileiros de Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005), bem como funções de pedo-transferência desenvolvidas por Saxton e Rawls (2006), utilizadas em diversos trabalhos no Brasil (ANDRADE et al., 2017; JOVINO et al., 2022; LOUZADA; RIBEIRO, 2019; SANTOS; OLIVEIRA; LOLLO, 2020; SILVA et al., 2018a; TRENTIN; ROBAINA; LAURENT, 2021).

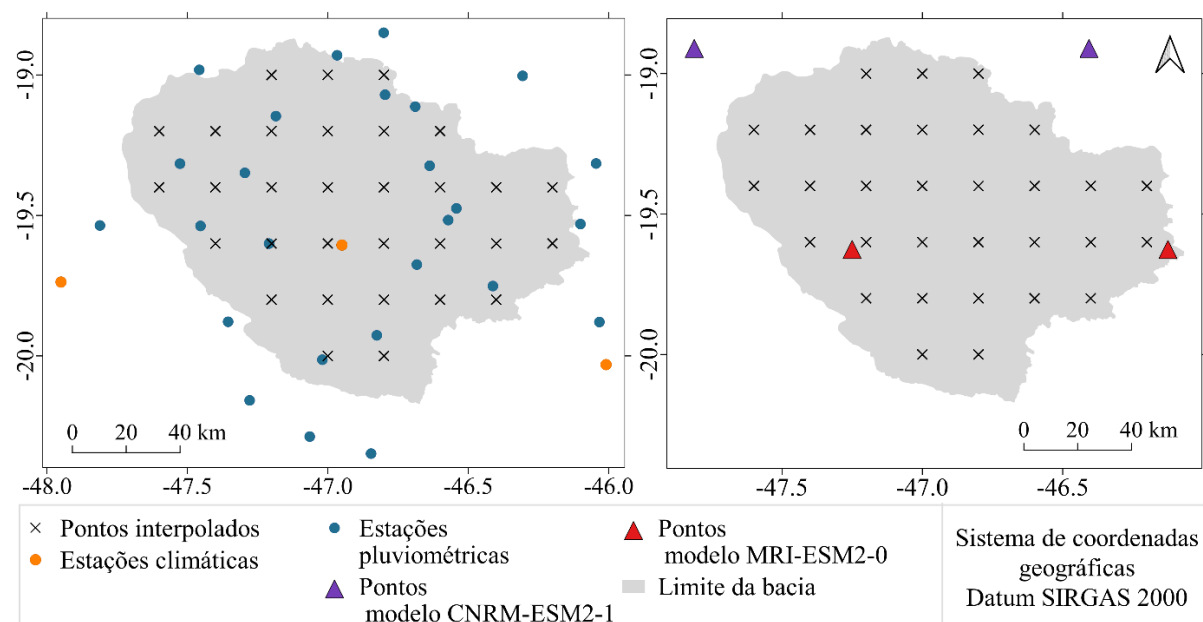
3.4 MODELAGEM, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

O primeiro passo no modelo hidrológico SWAT foi a delimitação da bacia hidrográfica, discretizada em sub-bacias com base no MDE (NASA JPL, 2020). Nessa etapa o reservatório também foi inserido. Depois, as sub-bacias delimitadas foram subdivididas em URHs. Para a definição das URHs foi definido um limite mínimo para os usos, tipos de solos e declividade de 4% em relação à sub-bacia.

A simulação no modelo foi configurada a partir da série de cerca de 23 anos de dados climáticos diários de precipitação e temperatura (ANA, 2020; INMET, 2020), entre 1995 e 2018. Nesse estudo, ambas as variáveis climáticas foram utilizadas, tanto na modelagem hidrológica da bacia, quanto nos cenários avaliados representando as mudanças climáticas. Porém, uma vez que não foi possível observar um padrão espacial entre os dados climáticos observados utilizados (ou seja, entre as precipitações, provenientes da ANA, e as temperaturas do INMET), bem como entre as projeções de clima (uma vez que foram utilizadas projeções de dois modelos climáticos diferentes, apresentados na seção 3.5), definiu-se pela

normalização da rede de pontos das duas variáveis. Para isso, foi estabelecida uma resolução espacial de 20 km, a ser utilizada na modelagem hidrológica e nos cenários propostos. A grade foi estruturada de forma a ocupar toda a área da Bacia do Reservatório de Nova Ponte e resultou em 31 pontos ao longo da área de estudos (Figura 12). Na sequência, foram obtidas as coordenadas geográficas de cada ponto e, então, uma interpolação espacial pelo método IDW (*Inverse Distance Weighting* - Ponderação do Inverso da Distância) dos dados observados de chuva e temperatura foi realizada. Este método foi também aplicado aos dados de projeções climáticas para compatibilizar as bases de clima utilizadas em todas as etapas.

Figura 12 – Estações pluviométricas, estações meteorológicas e pontos dos modelos climáticos escolhidos* em relação aos pontos a partir dos quais serão interpolados.



*Obs.: a seleção dos modelos climáticos utilizados foi feita no item 3.5.1.

Fonte: estações pluviométricas e meteorológicas: ANA (2018), pontos dos modelos climatológicos: CMIP6 (2020).

Para realizar a interpolação dos dados de chuva foram utilizadas as 17 estações pluviométricas dentro da bacia, além de outras 6 no entorno. Já para a temperatura, a interpolação foi realizada a partir de material obtido por 3 estações meteorológicas. A realização do método foi possível a partir de códigos em Python disponibilizados gratuitamente por Rotava e Bressiani (2020) na plataforma *Google Collaboratory*.

O código utilizado foi pensado para o processamento de dados diários de chuva inseridos já no formato do SWAT. Nesse formato, o arquivo a ser inserido deve conter uma informação de chuva para cada linha, que representa um dia na base de dados. Porém, visto que o arquivo referente às temperaturas (mínimas e máximas diárias) requer duas informações em cada linha, a utilização do código disponibilizado para a interpolação, também das

temperaturas, foi possível através de adaptação do arquivo inserido. Foi necessário separar os dados relativos às temperaturas mínimas e máximas em dois arquivos diferentes para que fossem lidos adequadamente. Após separados e processados, os 31 pontos de dados diários de temperatura mínima e os 31 pontos de temperatura máxima foram novamente reunidos em um mesmo arquivo no formato texto para uso no modelo SWAT. Para isso utilizou-se os pacotes *readr* (WICKHAM; HESTER; BRYAN, 2022), *tidyr* (WICKHAM, 2020) e *dplyr* (WICKHAM et al., 2020) no R.

Para o cálculo da vazão, foi utilizado o método padrão do SWAT, o modelo SCS da Curva Número (USDA SCS, 1972) de transformação chuva-vazão, considerando os dados pedológicos e dados de uso e ocupação do solo associados à precipitação diária (AKPOTI; ANTWI; KABO-BAH, 2016; SOARES et al., 2014). Já para o cálculo da evapotranspiração potencial foi utilizado o método de Hargreaves uma vez que exige apenas informações de temperatura do ar para a obtenção da evapotranspiração. Essa característica foi essencial para esse estudo, já que os dados utilizados para representação do clima foram relativos à temperatura e à precipitação.

Também foram utilizados os chamados “*soft data*” de forma a melhorar as informações possíveis e dar suporte ao modelo da Bacia do Reservatório de Nova Ponte. De acordo com Bressiani (2016), diferente dos dados concretos que são dados medidos em campo, *soft data* são informações aproximadas, como médias ou valores estimados, que podem ser obtidas a partir da literatura científica e de relatórios sobre a região estudada ou similar. Definiu-se pela utilização do programa *Baseflow Filter* (ARNOLD et al., 1995; ARNOLD; ALLEN, 1999) para obtenção do parâmetro Alpha_BF (constante de recessão do fluxo de base) em detrimento do valor padrão (0,048). Esse programa utiliza dados diários de vazão das estações fluviométricas provenientes de sistemas naturais para separar o fluxo de base.

Entre as saídas do *Baseflow Filter*, um valor de Alpha_BF foi gerado para cada estação fluviométrica inserida, exceto para aquelas cujas vazões não são provenientes de sistemas naturais. Esse foi o caso das estações 60230080 e 60335080. A primeira é relativa ao barramento de uma Pequena Central Hidrelétrica e a segunda ao reservatório da UHE de Nova Ponte. Os valores de Alpha_BF obtidos foram associados às sub-bacias cujos cursos d’água drenam para cada estação. Para as sub-bacias que não geraram valores de Alpha_BF (associadas às estações 60230080 e 60335080), utilizou-se o valor médio dos Alpha_BF gerados (Tabela 2).

Tabela 2 - Estações fluviométricas, sub-bacias relacionadas e valores dos parâmetros Alpha_BF calculados.

Estações	60220000	60228000	60250000	60265000	60272000	60280000	60285000	60290000
Sub-bacias	53	12	16	21	23	14	19	28
	54	50	17	24	26	15		34
	55	51	18	25	46	20		35
	56	52	29	30	47	39		36
	57	60	32	33	49	45		40
	58	61	67	41		65		68
	59	62	71	42		66		
						69		
Alpha_BF	0,0297	0,0291	0,0214	0,0252	0,043	0,0308	0,0384	0,0253

*Obs.: Para as demais sub-bacias, utilizou-se a média dos valores de Alpha_BF (0.0303).

Alimentado o modelo, a simulação da vazão foi configurada para um passo de tempo mensal entre 1995 e 2018. Os três anos iniciais, de janeiro de 1995 a dezembro de 1997 foram definidos como o período de aquecimento do modelo. Os dados simulados foram gerados entre janeiro de 1998 e dezembro de 2018.

Após realizada a simulação da vazão mensal com o modelo hidrológico SWAT, a análise de sensibilidade, a calibração e a validação *multi-site*, assim como a validação cruzada foram realizadas seguindo o procedimento descrito em Bressiani (2016). Para isso, os dados observados obtidos através dos bancos de dados do HidroWEB (ANA, 2020), do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) (ANA, 2022) e da CEMIG (2020), bem como os parâmetros aplicados pelo SWAT na simulação, foram transferidos para o software SWAT-CUP. Os procedimentos foram executados por meio do algoritmo SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting*, versão 2) (ABBASPOUR; JOHNSON; VAN GENUCHTEN, 2004). O método de calibração e validação *multi-site* foi escolhido devido à presença de 9 estações fluviométricas com dados, localizadas no ponto de saída de sub-bacias da área de estudos. Para facilitar o processo, definiu-se pela seleção de apenas algumas estações para a calibração *multi-site*. Foram escolhidas preferencialmente estações cuja área drenada à montante não fosse hidrológicamente conectada a outras áreas de contribuição, como indicado por Migliaccio e Chaubey (2007). Cinco grandes regiões foram selecionadas para esse procedimento: as regiões A, B, C, D, à montante do reservatório e a região do reservatório E. Embora tenha-se procurado definir regiões mutuamente independentes, as regiões definidas como C e D são conectadas e não se encaixaram nessa especificação. A decisão de definir duas regiões nesse espaço ocorreu devido à ampla lacuna observada nos dados de vazão da região D. Por esse motivo, optou-se por calibrá-las separadamente, de montante para jusante. As demais estações não utilizadas na calibração *multi-site* foram definidas para a realização da validação cruzada com o período total dos dados. Para esse procedimento foram

estabelecidas para A as sub-regiões A1, A2 e A3 e, para C, a sub-região C1. A validação cruzada é utilizada para atestar a aplicabilidade dos processos de calibração e validação realizados nas regiões circundantes. Ela indica se os valores obtidos para os parâmetros podem ser também utilizados, de forma efetiva, em séries de dados diferentes e regiões diferentes, mas com características físicas semelhantes.

Depois de definidos os métodos a serem executados, a série de dados utilizada foi decomposta segundo o método *Split-Sample Test* (KLEMES, 1986) que consiste na divisão da série histórica entre os procedimentos de calibração e validação. Eles serão aplicados para as 5 regiões maiores definidas. A divisão foi determinada da seguinte forma: 70% dos dados iniciais destinados à calibração (1995-2012) e os 30% finais à validação (2013-2018). A separação de dados para cada processo garante que cada um deles seja executado com um conjunto diferente de dados, diminuindo assim a possibilidade de viés na modelagem.

Um dos fatores importantes para que um modelo hidrológico produza previsões satisfatórias é a adequada análise de sensibilidade (MOREIRA; SCHWAMBACK; RIGO, 2018). Esse procedimento permite identificar os parâmetros que realmente influenciam (parâmetros sensíveis) ou não (parâmetros não sensíveis) nas simulações e ajuda a reduzir o número de parâmetros na calibração (ABBASPOUR; VAGHEFI; SRINIVASAN, 2017; GREEN; VAN GRIENSVEN, 2008). O SWAT-CUP conta com dois métodos de análise de sensibilidade possíveis de serem executados. O método *One-at-a-time* e o método Global. No primeiro apenas um parâmetro muda por vez, enquanto os demais permanecem inalterados. Já no método de análise de sensibilidade global todos os parâmetros mudam ao mesmo tempo e são executadas muitas simulações para que o efeito de cada um deles possa ser visto na simulação objetivada (ABBASPOUR; VAGHEFI; SRINIVASAN, 2017). Nesse trabalho aplicou-se a análise global uma vez que, de acordo com Abbaspour e colaboradores (2017), produz resultados mais confiáveis. Dado que o modelo hidrológico SWAT tem disponíveis diversos parâmetros, primeiro foram selecionados aqueles a serem aplicados na análise de sensibilidade a partir de 3 artigos e 1 tese, inseridos no contexto brasileiro, cuja variável calibrada também foi a vazão (BRESSIANI, 2016; NUNES; MINOTI; KOIDE, 2020; SILVA et al., 2018b; SIQUEIRA et al., 2021) (Quadro 3). Inicialmente foram selecionados parâmetros que haviam sido aplicados em dois ou mais desses trabalhos. 18 parâmetros foram selecionados e a análise de sensibilidade foi executada com 300 simulações. Foram escolhidos 9 parâmetros com base no p-valor (quanto mais próximo de zero, maior a sensibilidade) e no teste-t (os parâmetros mais sensíveis são aqueles com maior valor absoluto de t).

Quadro 3 - Parâmetros iniciais escolhidos para a realização da análise de sensibilidade da vazão do modelo da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.

Parâmetros iniciais para análise de sensibilidade	Descrição	Trabalhos consultados que utilizaram o parâmetro
SURLAG	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial em relação ao início da precipitação (h)	Nunes et al. (2020), Bressiani (2016), Silva et al. (2018b), Siqueira et al. (2021)
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base	Nunes et al. (2020), Bressiani (2016), Silva et al. (2018b), Siqueira et al. (2021)
GW_DELAY	Intervalo de tempo para a água fluir através da camada não saturada do solo até o aquífero (dias).	Nunes et al. (2020), Bressiani (2016), Silva et al. (2018b), Siqueira et al. (2021)
GW_REVAP	Coefficiente que controla o fluxo de água da zona saturada para a não saturada.	Nunes et al. (2020), Bressiani (2016), Silva et al. (2018b), Siqueira et al. (2021),
GWQMN	Nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno (para que o retorno da vazão ocorra) (mm)	Nunes et al. (2020), Bressiani (2016), Silva et al. (2018b), Siqueira et al. (2021)
REVAPMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer ou retorno para a zona radicular ou percolação para o aquífero profundo (mm)	Nunes et al. (2020), Bressiani (2016), Silva et al. (2018b), Siqueira et al. (2021)
RCHRG_DP	Coefficiente de percolação da água da zona não saturada para o aquífero profundo (mm)	Bressiani (2016), Silva et al. (2018b)
ESCO	Coefficiente de compensação de evaporação de água no solo	Nunes et al. (2020), Bressiani (2016), Silva et al. (2018b), Siqueira et al. (2021)
HRU_SLP	Média da declividade de cada HRU (% ou m/m)	Bressiani (2016)
OV_N	Coefficiente de rugosidade de Manning para escoamento na superfície	Bressiani (2016)
SLSUBBSN	Comprimento de rampa médio da sub-bacia (m)	Bressiani (2016), Silva et al. (2018b)
CN2	Valor inicial da Curva Número do escoamento superficial para condição de umidade do solo II (solo em situação média de umidade)	Nunes et al. (2020), Bressiani (2016), Silva et al. (2018b), Siqueira et al. (2021)
ALPHA_BNK	Constante de recessão do escoamento de base para as margens do canal (1/dia)	Nunes et al. (2020), Siqueira et al. (2021)
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal (mm/h)	Nunes et al. (2020), Silva et al. (2018b), Siqueira et al. (2021)
CH_N2	Coefficiente de rugosidade de Manning para o canal principal	Nunes et al. (2020), Bressiani (2016), Silva et al. (2018b), Siqueira et al. (2021)
SOL_AWC()	Armazenamento de água no solo (mm H ₂ O/mm solo)	Nunes et al. (2020), Bressiani (2016), Silva et al. (2018b), Siqueira et al. (2021)
SOL_BD()	Densidade aparente do solo (mg/m ³ ou g/cm ³)	Nunes et al. (2020), Siqueira et al. (2021)
SOL_K()	Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h)	Nunes et al. (2020), Bressiani (2016), Silva et al. (2018b), Siqueira et al. (2021)

Com base nos parâmetros escolhidos a calibração *multi-site* foi executada para as regiões na ordem A-B-C-D-E. Para as regiões A, B, C e D as vazões defluentes mensais foram calibradas e validadas. Já para a Região E, dados de vazão mensal afluyente passaram

por estes procedimentos. Para cada região foram efetuadas iterações, nas quais todos os parâmetros escolhidos foram modificados simultaneamente em 300 simulações. Isso foi realizado até a obtenção de estatísticas de avaliação do modelo satisfatórias. De acordo com Abbaspour (2015) normalmente até 4 iterações são suficientes para atingir uma solução aceitável em SUFI2. Ainda, segundo o autor, embora 500 simulações sejam recomendadas por iteração, em situações de elevado esforço computacional, de 200 a 300 simulações por iteração é considerado aceitável (ABBASPOUR, 2015).

A avaliação dos resultados foi feita a partir do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) (NASH; SUTCLIFFE, 1970) que indica quanto da variância dos dados observados ao longo do tempo é explicada pelo modelo (GREEN; VAN GRIENSVEN, 2008). Também foram utilizados os indicadores: Razão entre raiz do erro médio quadrático e desvio padrão dos dados observados (RSR), que padroniza o erro médio quadrático utilizando o desvio padrão das observações, incluindo assim um fator de escala e o Percentual de Tendência (PBIAS) que mede a tendência média dos dados simulados em relação aos dados observados (MORIASI et al., 2007). Valores positivos indicam tendência de subestimação e, negativos, tendência de superestimação do modelo (GOLMOHAMMADI et al., 2014). Os critérios propostos por Moriasi et al. (2007), dispostos na Tabela 3, foram utilizados.

Tabela 3 - Parâmetros selecionados para avaliação da calibração do modelo da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.

Classificação	NS	RSR	PBIAS
Não satisfatório	$NS \leq 0,5$	$RSR > 0,70$	$PBIAS > \pm 25$
Satisfatório	$0,50 < NS \leq 0,65$	$0,60 < RSR \leq 0,70$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Bom	$0,65 < NS \leq 0,75$	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Muito bom	$0,75 < NS \leq 1,00$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$PBIAS < 10$

A validação do modelo também pode ser considerada multi-locais (*multi-site*), uma vez que foi realizada para cada região definida dentro da bacia de estudos, logo após sua calibração. Na validação, o valor de cada parâmetro que resultou na melhor simulação no processo de calibração, foi aplicado à série de dados reservada à validação, em uma única simulação. A avaliação da validação seguiu os mesmos critérios definidos para a calibração.

Realizada a calibração e validação das regiões, o passo seguinte foi a validação cruzada das sub-regiões A.1, A.2 e A.3 com os valores dos parâmetros da região A e da sub-região C.1 com os valores dos parâmetros da região C. A validação cruzada foi executada em uma única simulação com o período total dos dados. Esse processo foi útil para avaliar se os

valores atingidos poderiam ser aplicados não só para uma série de dados diferente, mas também para uma região diferente, porém com condições físicas semelhantes. À medida que as regiões foram sendo calibradas e validadas, os valores dos parâmetros foram sendo fixados no projeto do SWAT-CUP para possibilitar as simulações de cenários adiante.

Em condições ideais, todo o intervalo de valores dos parâmetros que gerou bons resultados na calibração seria aplicado na validação e, posteriormente, nos cenários futuros. Essa prática é realizada para que as incertezas da modelagem sejam propagadas em todas as etapas (ABBASPOUR, 2022). No entanto, devido a limitações de tempo, não foi possível realiza-la no trabalho atual e apenas um valor para cada parâmetro foi utilizado.

3.5 APLICAÇÃO DE CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

3.5.1 Pré-processamento dos dados de projeções de clima

Para a criação dos cenários de mudanças climáticas aplicados nessa pesquisa, definiu-se pela utilização de resultados de dois modelos climáticos participantes do CMIP6 associados ao Programa Mundial de Pesquisa Climática. Estes modelos são o estado-da-arte dos modelos climáticos, dando suporte ao 6º e último Relatório de Avaliação do IPCC (EYRING et al., 2016; IPCC, 2022a).

As bases de projeções climáticas diárias utilizadas foram obtidas pelo banco de dados do programa Europeu Copernicus, que disponibiliza dados calculados por 58 modelos do CMIP6 (2021). Para a escolha dos modelos a serem empregados, primeiramente foram separados modelos que disponibilizassem dados de precipitação, temperatura máxima e mínima, tanto históricos, quanto dos experimentos SSP2 4.5 e SSP5 8.5. Embora o intuito seja a avaliação de cenários futuros, os dados históricos são também importantes pois, ao serem associados aos dados observados, permitem a identificação do viés e parametrização do algoritmo utilizado para correção na modelagem (RATHJENS et al., 2016). Esse procedimento de separação reduziu a 15 os modelos climáticos possíveis. Dos 15 modelos restantes, 2 foram selecionados para essa pesquisa por já terem sido empregados em artigos científicos recentes e desenvolvidos no território brasileiro. Foram selecionados os modelos CNRM-ESM2-1 (SÉFÉRIAN et al., 2016, 2019) e MRI-ESM2-0 0 (YUKIMOTO et al., 2019) (Quadro 4). Ambos são considerados Modelos do Sistema Terrestre (ESM). Os ESM diferenciam-se dos modelos climáticos uma vez que estes resolvem equações que descrevem unicamente os processos físicos da atmosfera, oceano e superfície terrestre. Já os ESMs incluem, além de processos físicos, a interação deles com a biosfera e com os constituintes químicos da atmosfera e do oceano (HEAVENS; WARD; MAHOWALD, 2013)

Quadro 4 - Modelos ESM selecionados, associados ao país no qual foram desenvolvidos, resolução do dado original e exemplo de trabalhos brasileiros que os utilizaram.

País	Modelo	Resolução	Trabalhos brasileiros que utilizaram os modelos
França	CNRM-ESM2-1	1.4°	Siqueira et al. (2021)
Japão	MRI-ESM2-0	1.125°	Raulino; Silveira; Lima Neto (2021), Silva et al. (2021) e Siqueira et al. (2021)

Após a obtenção dos dados referentes a cada um dos modelos, foi necessária uma etapa de pré-processamento dos dados. Devido ao formato netCDF dos arquivos disponibilizados foi necessário processá-los no RStudio para que pudessem ser visualizados e utilizados no software Excel. Foram utilizados os pacotes *ncdf4* (PIERCE, 2021), *dplyr* (WICKHAM et al., 2020), *chron* (JAMES; HORNİK, 2020) e *writexl* (OOMS, 2021). Cada um dos 2 modelos apresentou 2 pontos próximos à área de estudos (Tabela 4) a partir dos quais foram extraídas 36 tabelas ao todo. Estas foram referentes a dados diários históricos (1995 a 2015) de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima para cada ponto de cada modelo, assim como a dados diários referentes aos cenários SSP2 4.5 e SSP5 8.5 (2015 a 2060), ambos para as variáveis citadas.

Tabela 4 - Localização geográfica dos pontos referentes a cada um dos modelos.

CNRM-ESM2-1 (SÉFÉRIAN et al., 2016, 2019)			MRI-ESM2-0 (YUKIMOTO et al., 2019)		
Ponto	Longitude (x)	Latitude (y)	Ponto	Longitude (x)	Latitude (y)
1	-47.8125	-18.91036	3	-47.25	-19.62607
2	-46.40625	-18.91036	4	-46.125	-19.62607

Na medida em que os dados de temperatura dos modelos globais do CMIP6 são fornecidos em Kelvin (K) e os de chuva em Kg/m²/s foi necessário efetuar a conversão das unidades de medida para que se adequassem às utilizadas na pesquisa (graus Celsius (°C) e mm/dia, respectivamente). A conversão foi feita considerando as equações 8 e 9.

Conversão da temperatura, de K para °C:

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,15 \quad (8)$$

Conversão da precipitação, de Kg/m²/s para mm/dia:

Considerando que 1 milímetro de chuva corresponde a 1 litro de água em um espaço com área equivalente a 1 metro quadrado, ou seja:

$$1 \text{ mm} = 1 \text{ kg/m}^2 \text{ e}$$

1 dia = 86400 segundos (60 segundos x 60 minutos x 24 horas) ou

1 segundo = 1/86400 dia, temos que:

1 kg/m²/s = (1/86400) mm/dia , ou ainda:

$$mm/dia = kg/m^2/s * 86400 \quad (9)$$

Realizado um primeiro processamento, os arquivos de cada modelo foram organizados em pastas para cada cenário e variável climática. Os dois pontos de cada modelo foram interpolados em 31 pontos ao longo da área de estudos considerando a grade 20 km de resolução. O método IDW de interpolação realizado seguiu os mesmos passos executados com os dados observados no item 3.4 (Figura 12).

Nessa parte, já com todos os dados modelados interpolados em pontos coincidentes com os dados observados utilizados (ou seja, os 31 pontos de dados de cada modelo posicionados nas mesmas coordenadas geográficas que os 31 pontos de dados observados), a correção de viés foi realizada com base na ferramenta CMHyd. A correção de viés parte do pressuposto que a parametrização do algoritmo de correção feita para as condições climáticas atuais é válida também para as condições futuras e por isso o mesmo algoritmo é aplicado a esses dados (TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012). Assim, primeiro os dados históricos observados e simulados contidos no mesmo período de tempo são confrontados para a identificação de viés entre eles. A partir disso, o algoritmo de transformação utilizado é parametrizado e as simulações, tanto histórica quanto futuras, corrigidas. Para a correção do viés nos dados futuros simulados foi utilizado o método da Escala Linear. Segundo Teutschbein e Seibert (2012) esse método emprega valores mensais de correção baseados nas diferenças entre os valores observados e os simulados.

Os dados de temperatura e precipitação diários projetados, interpolados e com viés corrigido, foram divididos em dois períodos para rodar cada um dos cenários:

- 1) O período 1 (p1) para a análise de curto prazo. O p1 vai de 2019 a 2040.
- 2) O período 2 (p2) para análise de médio prazo. O p2 vai de 2041 a 2060.

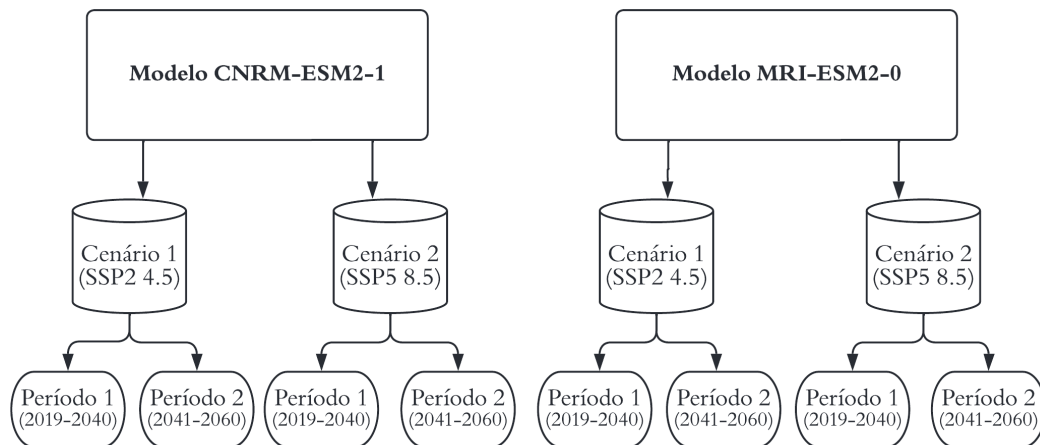
Foram definidos ainda três cenários no âmbito dessa pesquisa:

- 1) O cenário referência (CR) que consiste nos dados climáticos utilizados no período histórico considerado, de 1998 a 2018. Esse cenário foi utilizado para fins de comparação.
- 2) O cenário projetado 1 (C1), que consiste nas projeções corrigidas, elaboradas pelos modelos do sistema terrestre escolhidos, considerando o SSP 2 4.5.

- 3) O cenário projetado 2 (C2), que consiste nas projeções corrigidas, elaboradas pelos modelos do sistema terrestre escolhidos, considerando o SSP5 8.5.

Assim, para cada modelo climático utilizado (CNRM-ESM2-1 e MRI-ESM2-0), dois cenários (C1 e C2) foram definidos e examinados em dois períodos de tempo (p1 e p2). O fluxograma 2 (Figura 13) ilustra todas as situações a serem analisadas no presente trabalho.

Figura 13 - Fluxograma dos cenários desenvolvidos nesse trabalho.



Fonte: autoria própria.

3.5.2 Simulação da vazão mensal ante cenários de mudanças climáticas

Para a realização dessa etapa foram utilizados o modelo hidrológico SWAT e o software SWAT-CUP. Primeiramente, os oito arquivos resultantes dos cenários futuros de mudanças climáticas foram inseridos no SWAT, um a um. Para cada arquivo inserido, o SWAT foi executado uma vez a fim de que fossem gerados repositórios de clima no formato utilizado dentro do modelo, relativos à precipitação (pcp1.pcp) e à temperatura (tmp1.tmp). Isso foi feito dado que o SWAT-CUP, na criação de um projeto, inicialmente importa os arquivos do SWAT que resumem o modelo já configurado, para dentro do diretório principal do projeto e utiliza-os para a definição do modelo elaborado. Tendo isso em vista, os arquivos foram gerados para atualizar, para valores futuros, os arquivos pcp1.pcp e tmp1.tmp no diretório do projeto SWAT-CUP. Assim, essas informações foram utilizadas como dados de entrada no modelo ajustado para estimar as projeções de vazão de contribuição do reservatório de Nova Ponte.

Para avaliação dos resultados obtidos sobre as projeções da vazão afluente ao reservatório de Nova Ponte de acordo com cenários de alterações no clima, as projeções foram representadas por meio de gráficos de séries temporais para cada modelo e cenário simulado, incluindo em um mesmo gráfico os dados observados no cenário base (CR) e nos

períodos p1 (2019-2041) e p2 (2041-2060). Além disso, foram calculadas medidas de tendência central e dispersão da vazão estimada no reservatório considerando-se todas as combinações de modelos, cenários e períodos estudados.

Para que os dados plotados pudessem representar a sazonalidade dos prováveis impactos das mudanças climáticas, os períodos 1 e 2 foram divididos de acordo com os meses mais secos e mais úmidos observados na avaliação dos dados históricos de chuva. Os seis meses mais secos, abril a setembro, e os seis meses mais úmidos, outubro a março, foram então representados para os dois períodos por meio de um boxplot da vazão prevista em cada modelo e cenário.

Por fim, a variância da vazão média mensal no cenário base foi comparada com a estimada no p1 e no p2, por meio do Teste de Levene. A hipótese nula (H_0) do teste estabelece que as variâncias são homogêneas e por isso, quando observado um p-valor inferior ao nível de significância de 0,05, rejeita-se a hipótese de variâncias iguais. Além disso, para comparar a mediana das vazões em diferentes períodos foi utilizado o teste de Wilcoxon (H_0 : medianas das vazões são iguais). Considerou-se que os dados de vazão não seguem uma distribuição Normal e por isso, os testes utilizados foram não paramétricos. Os gráficos e testes para análise da vazão prevista foram feitos com o suporte do *software* R e dos pacotes *openair* e *ggplot2*.

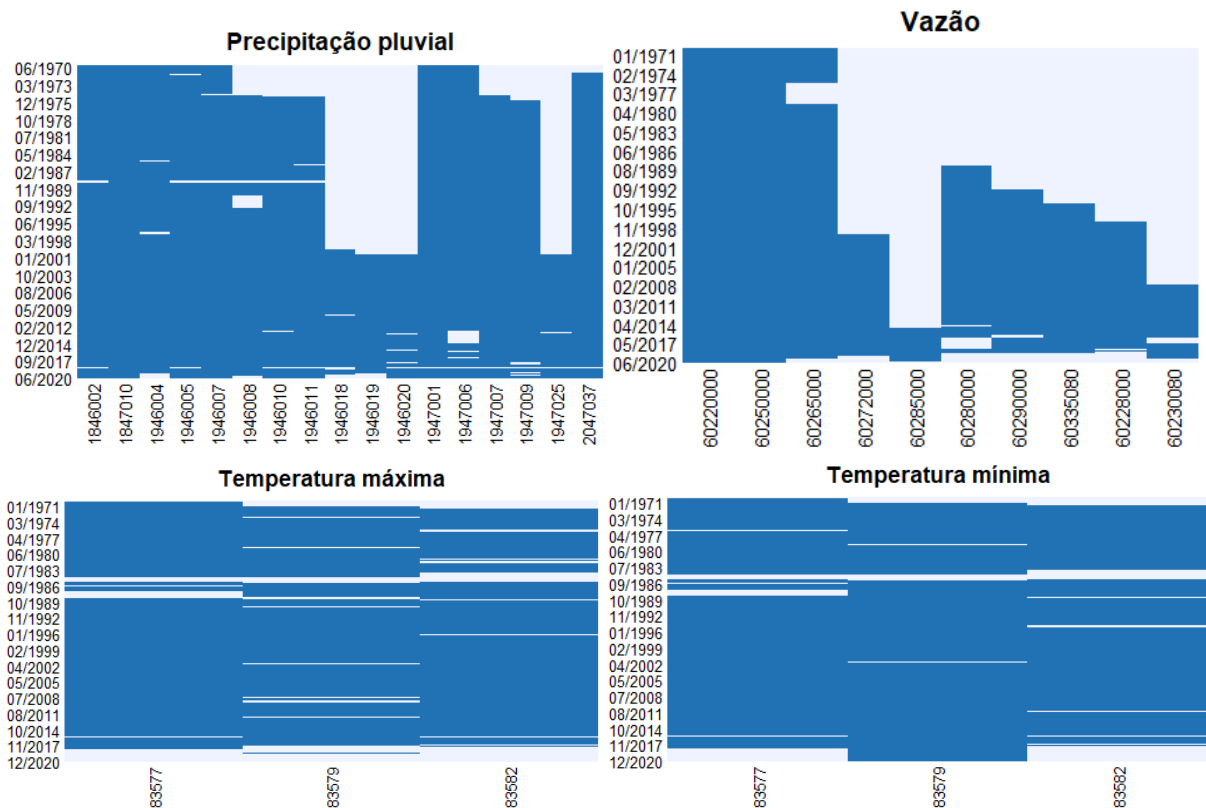
4 RESULTADOS

Nesta seção, apresentam-se os resultados divididos em três partes: resultados introdutórios, análises das etapas de modelagem e resultados finais. Na etapa introdutória, a Seção 4.1 avalia a completude dos dados históricos obtidos para o clima e vazão e a Seção 4.2 descreve as subdivisões de unidades hidrológicas identificadas na Bacia do Reservatório de Nova Ponte. As seções seguintes detalham os resultados encontrados nas etapas de modelagem, desde as simulações iniciais (Seção 4.3) e análise de sensibilidade (Seção 4.4) até a calibração e validação (Seção 4.5) e validação cruzada dos parâmetros calibrados (Seção 4.6). Por fim, as vazões previstas nos cenários climáticos estudados são descritas de modo geral na Seção 4.7 e quanto ao seu comportamento nos meses mais frios e mais quentes do ano na Seção 4.8.

4.1 AVALIAÇÃO DOS DADOS DE CLIMA E VAZÃO

Uma vez que os dados climáticos foram obtidos a partir do ano de 1970 para as 3 estações meteorológicas consideradas, o mesmo recorte foi feito na base de dados das 17 estações pluviométricas e das 10 estações fluviométricas, a fim de que os dados fossem melhor visualizados. A visualização do padrão de ausência de dados foi feita através dos mapas de dados faltantes (*missingness map*), dispostos na Figura 14.

Figura 14 - Padrão dos dados faltantes nas séries temporais de precipitação, vazão, temperatura máxima e temperatura mínima. Em azul foram plotados os dados observados e em cinza claro os dados faltantes. O eixo das abcissas (x) refere-se aos identificadores das estações nas quais os dados foram adquiridos, já o eixo das ordenadas (y) refere-se às datas (mês/ano).



Fonte: ANA (2020); CEMIG (2020); INMET (2020).

Uma vez que as informações de três estações fluviométricas (60280000, 60290000 e 60335080) e duas estações climáticas (83577 e 83582) foram adquiridas até o ano de 2018, foi considerada a utilização das séries históricas até dezembro de 2018. Isso se justifica dado que o software SWAT-CUP requer anos completos de dados (de 01 de janeiro a 31 de dezembro). O limiar definido para a finalização das séries temporais teve o intuito de reduzir a quantidade de falhas nos dados, aumentando a confiabilidade. Isso é importante principalmente para os dados de vazão utilizados na calibração do modelo.

Ainda com o intuito de utilizar dados mais representativos e, considerando que apenas um mapa de uso e cobertura do solo foi empregado na caracterização da área de estudos, considerou-se pertinente a aplicação de uma série temporal mais recente. Foram utilizados 21 anos de dados para geração de informações na simulação: de janeiro de 1998 a dezembro de 2018.

Em relação às informações que geraram os dados dessa pesquisa (de 01/01/1998 a 31/12/2018), a partir dos *missingness maps* (Figura 14), foi possível observar que a estação pluviométrica 1947006, bem como a estação fluviométrica 60280000 apresentam uma janela

considerável de dados faltantes dentro do período. Na primeira, a ausência de dados vai de 16/11/2012 a 28/10/2014 e, na segunda, de 11/08/2016 a 15/06/2018. Ambas correspondem a quase dois anos, o que equivale a cerca de 10% das informações estipuladas. As demais estações também apresentaram dados ausentes no meio e no final da série temporal (Figura 14), porém a porcentagem de dados validos foi maior ou igual a 95% (Tabela 5).

Tabela 5 - Estações na base de dados do projeto, período de dados da série histórica e dados válidos entre 1998 e 2018.

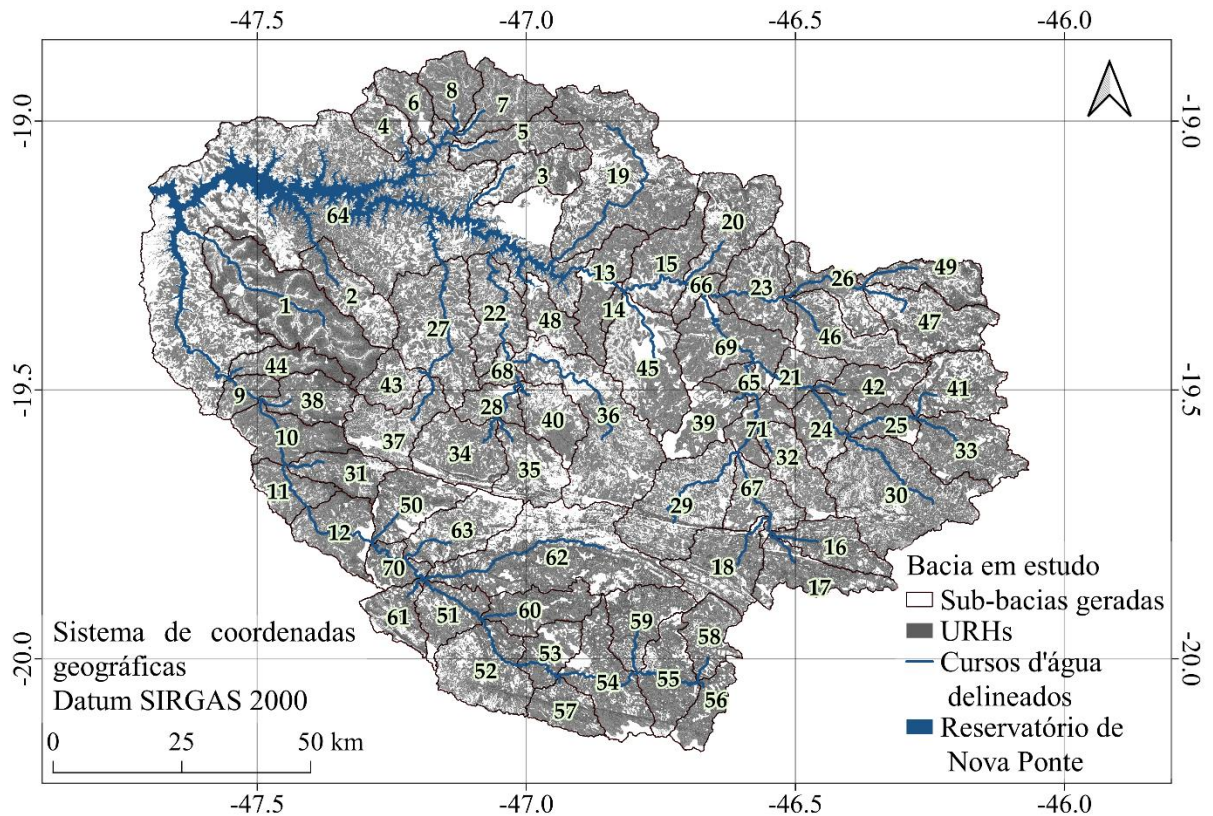
Tipo	Código	Estação	Período de dados	Dados válidos Total (percentual)
Climática	83577	Uberaba	01/01/1970 - 30/08/2018	7432 (96,9%), 7401 (96,5%)*
Climática	83579	Araxá	01/01/1970 - 01/01/2021	7648 (99,7%), 6975 (90,9%)*
Climática	83582	BambuÍ	01/01/1970 - 04/04/2018	7310 (95,3%), 7268 (94,8%)*
Pluviométrica	1846002	Charqueada do Patrocínio	01/01/1970 - 30/06/2020	7630 (99,5%)
Pluviométrica	1847010	IraÍ de Minas	01/01/1970 - 30/06/2020	7666 (99,9%)
Pluviométrica	1946004	Ibiá	01/01/1970 - 31/10/2019	7656 (99,8%)
Pluviométrica	1946005	Salitre	01/01/1970 - 30/06/2020	7639 (99,6%)
Pluviométrica	1946007	Fazenda São Mateus	01/01/1970 - 30/06/2020	7670 (100,0%)
Pluviométrica	1946008	Serra do Salitre	01/11/1974 - 31/03/2020	7663 (99,9%)
Pluviométrica	1946010	Pratinha	01/01/1975 - 30/06/2020	7634 (99,5%)
Pluviométrica	1946011	Tapira	01/01/1975 - 30/06/2020	7637 (99,6%)
Pluviométrica	1946018	Ponte do Rio São João	01/11/1999 - 31/12/2019	6898 (89,9%)
Pluviométrica	1946019	Argenita	01/08/2000 - 31/10/2019	6725 (87,7%)
Pluviométrica	1946020	São José da Bela Vista	01/08/2000 - 30/06/2020	6566 (85,6%)
Pluviométrica	1947001	Santa Juliana	01/01/1970 - 30/06/2020	7639 (99,6%)
Pluviométrica	1947006	Ponte João Cândido	01/01/1970 - 30/06/2020	6762 (88,2%)
Pluviométrica	1947007	Perdizes	01/12/1974 - 30/06/2020	7639 (99,6%)
Pluviométrica	1947009	Zelândia	01/10/1975 - 30/06/2020	7500 (97,8%)
Pluviométrica	1947025	Itaipu	01/08/2000 - 30/06/2020	6509 (84,9%)
Pluviométrica	2047037	Desemboque	01/05/1971 - 30/06/2020	7608 (99,2%)
Fluviométrica	60220000	Desemboque	01/01/1970 - 30/06/2020	7670 (100,0%)
Fluviométrica	60228000	PCH Pai Joaquim Fazenda Boa Vista	01/01/1998 - 17/09/2018	7375 (96,2%)
Fluviométrica	60230080	PCH Pai Joaquim Barramento	11/01/2008 - 31/12/2019	3724 (48,6%)
Fluviométrica	60250000	Fazenda São Mateus	01/01/1970 - 30/06/2020	7670 (100,0%)
Fluviométrica	60265000	Ibiá	01/01/1970 - 31/10/2019	7649 (99,7%)
Fluviométrica	60272000	Ponte do Rio São João	01/12/1999 - 31/07/2019	6918 (90,2%)
Fluviométrica	60280000	UHE Nova Ponte BR-146	04/11/1988 - 31/12/2018	6902 (90,0%)
Fluviométrica	60285000	Estação do Salitre	01/01/2015 - 30/04/2020	1461 (19,0%)
Fluviométrica	60290000	UHE Nova Ponte Fazenda Cambaúba	20/09/1992 - 31/12/2018	7539 (98,3%)
Fluviométrica	60335080	UHE Nova Ponte Barramento	01/01/1995 - 31/12/2018	7639 (99,6%)

*Obs.: Para as estações climáticas os valores antes da vírgula se referem às informações de temperatura mínima e, depois, as informações de temperatura máxima.

4.2 SUB-BACIAS E URHS DO RESERVATÓRIO DE NOVA PONTE NO SWAT

A Bacia do Reservatório de Nova Ponte foi delimitada com uma área de 15.358,2 km², discretizada em 71 sub-bacias e estas em 821 URHs (Figura 15). A sub-bacia do reservatório (sub-bacia 64) foi a maior sub-bacia delimitada, com uma área discrepante das demais. Isso ocorreu, pois, todas as sub-bacias que haviam sido definidas pelo modelo ao longo da área referente ao lago, foram combinadas para a geração da sub-bacia do reservatório. Esta sub-bacia tem uma área de 2.363,8 km², o que equivale a 15,4% de toda a bacia estudada. As demais sub-bacias têm uma área média de 185,2 km², e ocupam um espaço entre de 0,1 e 4% do total. A menor sub-bacia é a 14 e tem uma área de 21,12 km². Já a maior (à exceção do reservatório) é a sub-bacia número 19, com 614,9 km² (Figura 15).

Figura 15 – Sub-bacias e Unidades de Resposta Hidrológica distribuídas na Bacia do Reservatório de Nova Ponte.



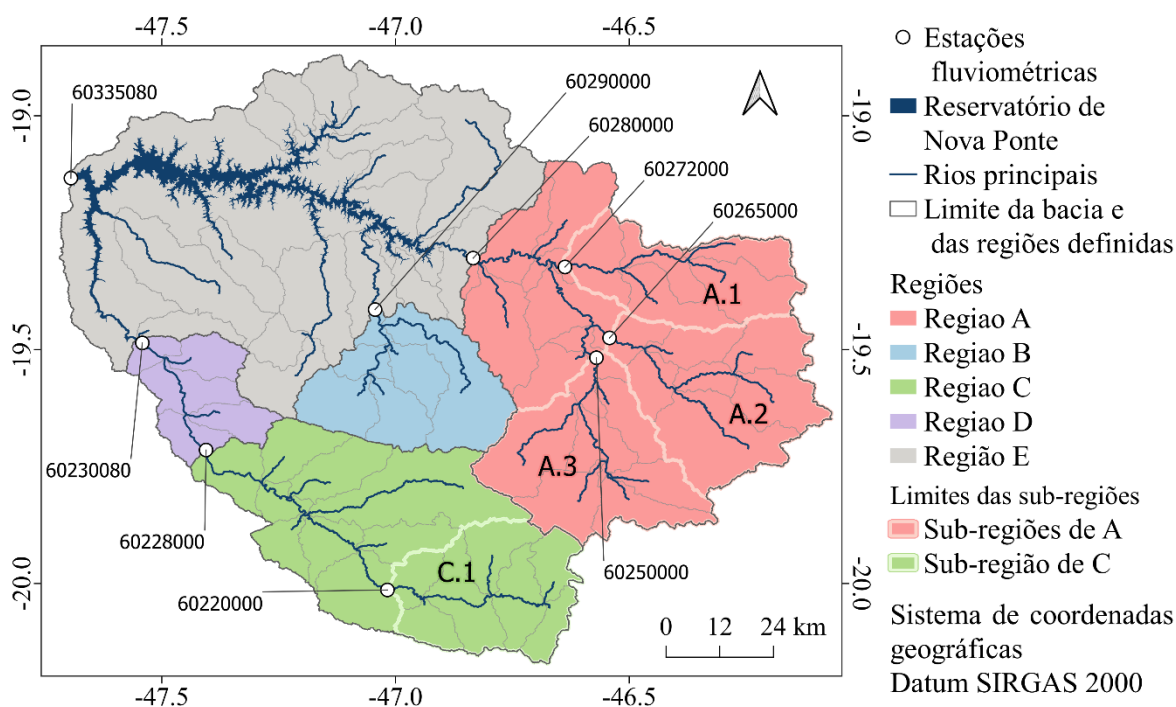
Fonte: reservatório: ANA (2018).

4.3 DEFINIÇÃO DE REGIÕES E SUB-REGIÕES NA BACIA

A calibração *multi-site* deve ser feita quando, na bacia estudada, são encontradas regiões mutuamente independentes com informações disponíveis para o procedimento (MIGLIACCIO; CHAUBEY, 2007). Para essa definição seguiu-se o método proposto por Bressiani (2016). Na bacia estudada foi possível reconhecer 3 dessas regiões. Cada uma delas,

composta por conjuntos de sub-bacias cujos cursos d'água direcionam-se para pontos distintos de contribuição ao Reservatório de Nova Ponte. À montante da estação fluviométrica 60280000, definiu-se a Região A. À montante da estação 60290000, definiu-se a Região B (Figura 16).

Figura 16 - Divisão da Bacia do Reservatório de Nova Ponte em regiões e sub-regiões.



Fonte: estações e reservatório: ANA (2018), drenagem: IGAM (2018).

A terceira grande região verificada seria composta por toda a área cujos cursos d'água escoavam para o ponto de localização da estação fluviométrica 60230080. Porém, a pequena quantidade de dados disponíveis nessa estação não foi considerada apropriada para a calibração de toda essa extensão. Por isso, a terceira região foi subdividida em duas. A Região C foi estabelecida como a área à montante da estação 60228000. Já a Região D foi estipulada logo abaixo de C e à montante da estação 60230080. Como Região E, definiu-se o grupo de sub-bacias restantes próximas ao reservatório, à jusante das Regiões A, B, C e D (Figura 16).

As demais estações fluviométricas não utilizadas na calibração *multi-site* foram utilizadas em sub-regiões para a validação cruzada. Foram estabelecidas em A as sub-regiões A.1 (à montante da estação 60272000), A.2 (à montante da estação 60265000) e A.3 (à montante da estação 60250000). Para C definiu-se a sub-região C.1 (à montante da estação 60220000) (Figura 16).

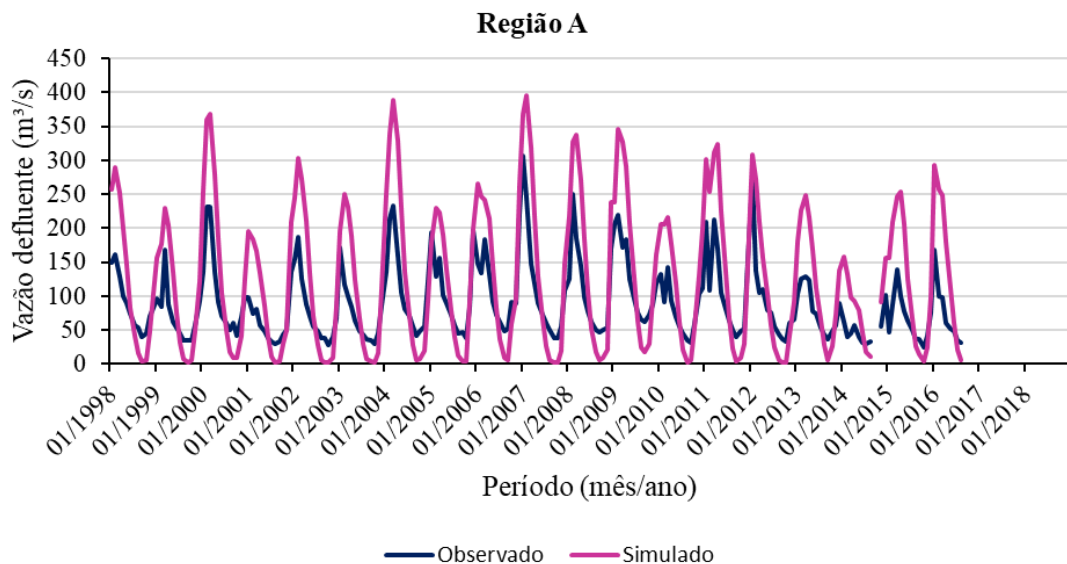
4.4 SIMULAÇÃO INICIAL DA VAZÃO MENSAL NO MODELO SWAT E DADOS HISTÓRICOS OBSERVADOS

Embora a simulação inicial da vazão tenha sido realizada para todo o período definido (de 1998 a 2018), tanto para as regiões quanto para as sub-regiões, na Tabela 6 sobre o desempenho da simulação por região, o período de dados foi dividido em (1) o período utilizado posteriormente na calibração (de 1998 a 2012) e (2) o período utilizado posteriormente na validação (de 2013 a 2018). Isso foi feito apenas para fins de comparação com os resultados dos processos no item 5.4. Na tabela 7 sobre o desempenho da simulação por sub-regiões, nenhuma divisão no período de dados foi necessária já que o processo conseguinte realizado (validação cruzada) utilizou a série completa.

4.4.1 Regiões A, B, C, D e E

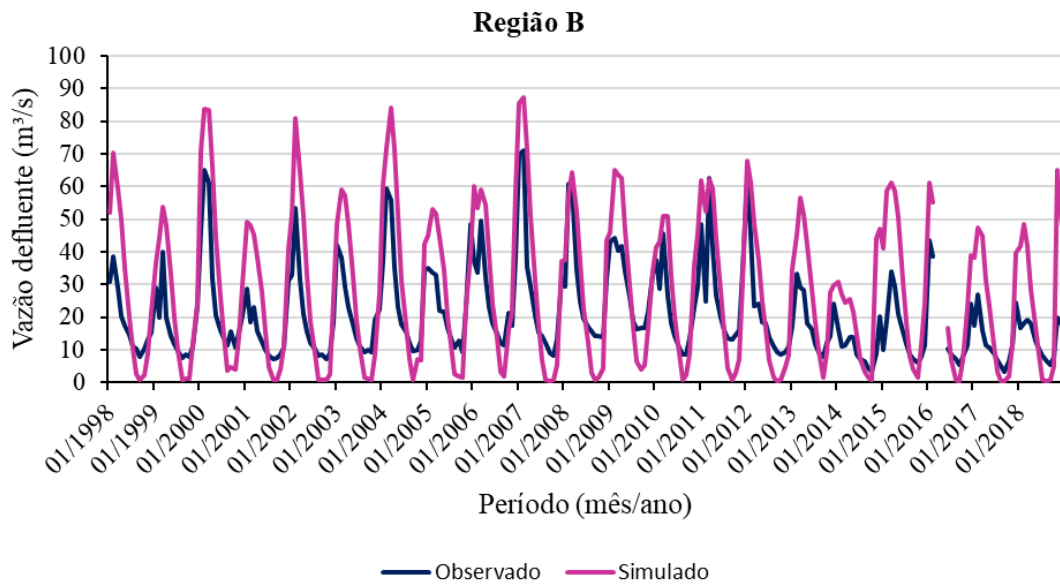
As Figuras 17 a 21 apresentam a distribuição dos dados de vazão mensal das regiões A, B, C, D e E, tanto observados, representados em azul, quanto simulados pelo SWAT, em magenta, entre janeiro de 1998 e dezembro de 2018. No eixo x, o período de dados é expresso em mês/ano e no eixo y, a vazão em m^3/s .

Figura 17 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a região A da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.



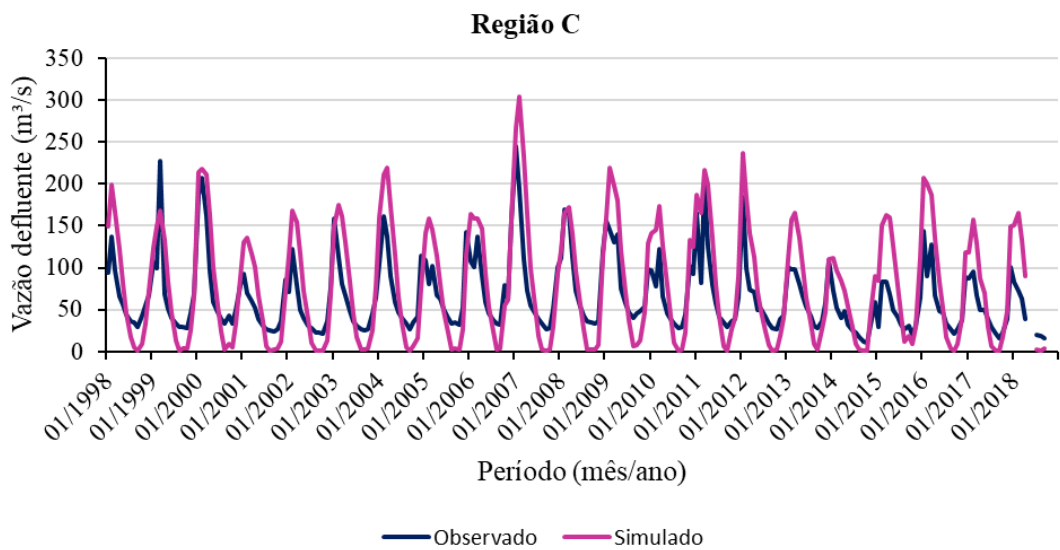
Fonte: autoria própria.

Figura 18 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a região B da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.



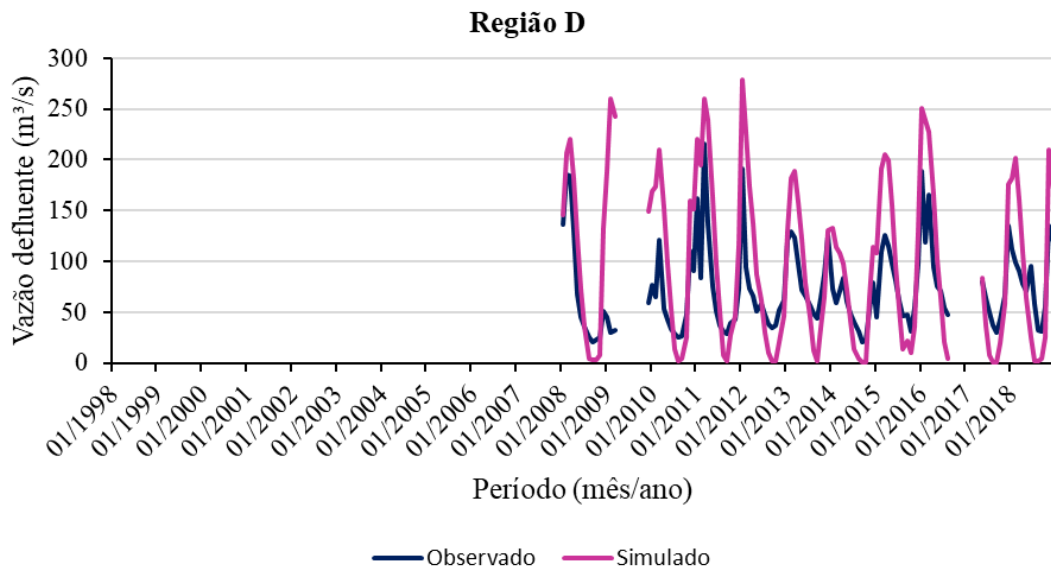
Fonte: autoria própria.

Figura 19 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a região C da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.



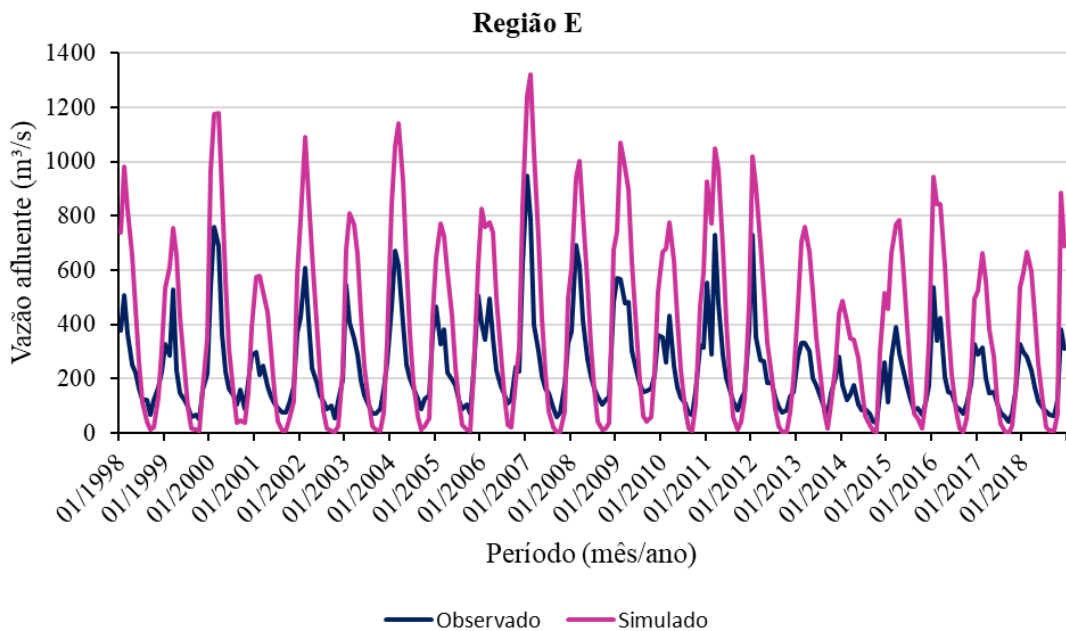
Fonte: autoria própria.

Figura 20 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a região D da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.



Fonte: autoria própria.

Figura 21 - Comportamento dos dados de vazão de entrada mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a região E da Bacia do Reservatório de Nova Ponte.



Fonte: autoria própria.

Nas Figuras 17 a 21 é possível notar que, na simulação inicial feita no modelo SWAT, houve subestimação de fluxos de base e superestimação de picos. Apesar disso observa-se uma boa representação da dinâmica geral da bacia, uma vez que as vazões máximas e mínimas foram simuladas corretamente nos meses que ocorrem, para cada uma das regiões.

De acordo com o apresentado por Abbaspour e colaboradores (2015), pode-se deduzir que a ocorrência de vazões de base muito baixas pode ter relação com uma evapotranspiração muito alta, assim como com altas taxas de infiltração. Nesse sentido, para os autores, quando são observados fluxos de base subestimados isso pode estar associado a valores muito altos para os parâmetros GWQMN, referente ao nível limite de água no aquífero livre para que a água retorne ao curso d'água e GW_REVAP, referente ao coeficiente que controla o fluxo de água da zona saturada para a não saturada. Essa subestimação dos fluxos de base também pode envolver baixos valores para REVAPMN, que refere-se à profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer retorno para a zona não saturada (quando o volume de água no aquífero raso é maior ou igual a REVAPMN), ou percolação para o aquífero profundo (quando o volume de água no aquífero raso é menor que REVAPMN) (ABBASPOUR et al., 2015; ARNOLD et al., 2012b).

Quanto à ocorrência de vazões máximas superestimadas, isso pode ser concernente a valores altos para o parâmetro da Curva Número (CN2) uma vez que esse parâmetro, quando elevado ($CN2 > 50$), indica alto escoamento superficial e baixa infiltração (VIJI; PRASANNA; ILANGO VAN, 2015; WANG et al., 2017). Além disso, Abbaspour e colaboradores (2015) apresentam uma relação inversa entre o coeficiente de compensação de evaporação da água do solo (ESCO) e a vazão, assim como entre armazenamento de água no solo (SOL_AWC) e vazão. Isso aponta que os picos exacerbados para a bacia estudada podem estar também associados a valores muito baixos para esses parâmetros (ABBASPOUR et al., 2015; FUJITA, 2018).

Em relação à região A (Figura 17), o valor médio mensal dos dados observados foi igual a 89,31 m³/s e o coeficiente de variação (CV) foi de 0,61. O valor mensal mensurado de vazão máxima foi de 306,06 m³/s e a mínima de 24,38 m³/s. Já para os dados inicialmente simulados, a média mensal foi igual a 125,69 m³/s, com CV de 0,85. A vazão máxima mensal simulada foi de 395,90 m³/s, enquanto o mínimo foi de 1,53 m³/s. Os dados mensais observados da região B apresentaram uma média de 20,83 m³/s com CV de 0,66. A máxima vazão mensal para essa região no período analisado foi de 71,16 m³/s, enquanto o valor mínimo mensal foi de 3,46 m³/s. Já os dados simulados mensais obtiveram média de 28,33 m³/s, CV de 0,82, vazão máxima equivalente a 87,11 e mínima de 0,38 m³/s. Para a região C a média mensal dos dados observados foi 65,27 m³/s e dos dados simulados 79,41 m³/s. Quanto aos CV, um valor de 0,66 foi obtido para dados mensurados e de 0,87 para os simulados. A vazão máxima mensal dos dados mensurados foi de 244,57 m³/s e mínima igual a 10,89 m³/s. Para valores simulados, a vazão máxima em um mês chegou a 304,40 m³/s e mínima de 0,53.

Para D, a média das vazões mensais observadas foi equivalente a 73,29 m³/s, CV 0,58, vazão máxima mensal de 215,36 e mínima de 21,03 m³/s. Por outro lado, a média mensal simulada para essa mesma região foi de 98,58 m³/s com CV de 0,82. As vazões máxima e mínima mensais foram, nessa ordem, de 278,5 m³/s e 0,68 m³/s.

A Região E do reservatório, foi a única a ter a vazão mensal afluyente simulada (Figura 21). Isso foi feito considerando que esta vazão é controlada pelo ciclo hidrológico natural da região, diferente da vazão defluyente, controlada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) de acordo com a demanda. Tendo isso em vista, considerou-se que essa abordagem, sobre a vazão afluyente, seria mais representativa ao avaliar efeitos do clima futuro na vazão. Assim, segundo os dados obtidos junto ao Sistema SAR, a média da vazão mensal que contribui para o reservatório é de 234,66 m³/s, com CV de 0,70. A vazão máxima afluyente observada em um mês foi de 948,93 e mínima de 35,96 m³/s. Quanto à simulação das entradas mensais de água no reservatório, obteve-se uma vazão média de 385,98 m³/s com CV de 0,87. Nesse caso, o valor máximo foi de 1322 m³/s enquanto o mínimo de 0,19 m³/s. Para uma melhor visualização e comparação das estatísticas obtidas, os valores para cada região estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Estatísticas obtidas para a vazão observada (m³/s), a vazão inicialmente simulada (m³/s) para as regiões definidas.

	REGIÃO A		REGIÃO B		REGIÃO C	
	Vazão observada	Vazão simulada	Vazão observada	Vazão simulada	Vazão observada	Vazão simulada
Média	89,31	125,69	20,83	28,33	65,27	79,41
DP	54,59	106,29	13,72	23,10	43,04	68,96
CV	0,61	0,85	0,66	0,82	0,66	0,87
Máximo	306,06	395,90	71,16	87,11	244,57	304,40
Mínimo	24,38	1,53	3,46	0,38	10,89	0,53
	REGIÃO D		REGIÃO E			
	Vazão observada	Vazão simulada	Vazão observada	Vazão simulada		
Média	73,29	98,58	234,66	385,98		
DP	42,19	80,93	164,29	334,48		
CV	0,58	0,82	0,70	0,87		
Máximo	215,36	278,50	948,93	1322,00		
Mínimo	21,03	0,68	35,96	0,19		

Obs.: DP= Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação.

Tabela 7 - Resultados obtidos sobre o desempenho da simulação inicial realizada no modelo SWAT da variável vazão mensal defluente nas regiões A, B, C e D da bacia, e da vazão mensal afluyente na região E, de acordo com os indicadores NS, PBIAS e RSR.

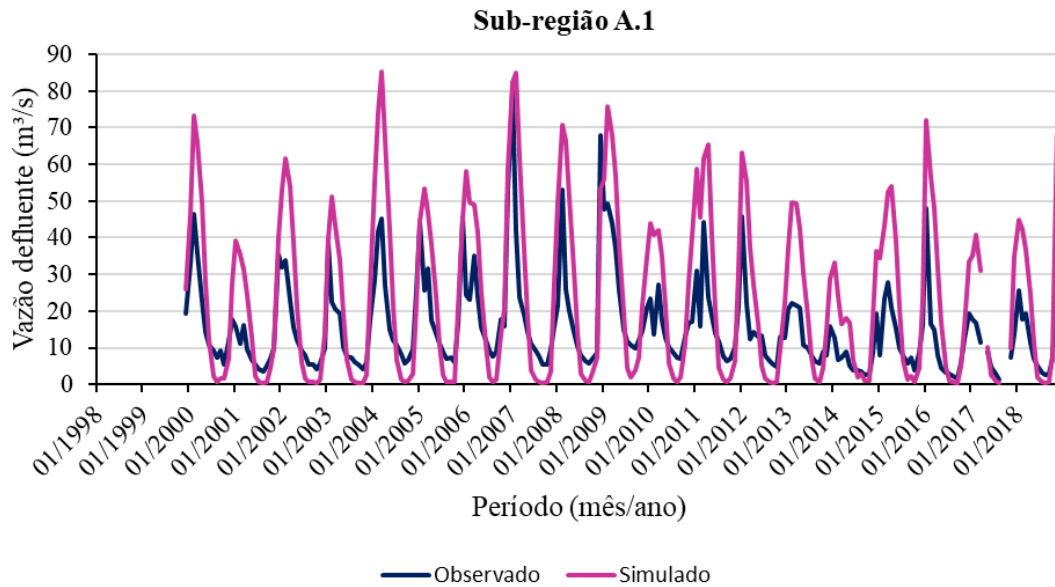
Região	Sub-bacia	Resultado	NS	PBIAS	RSR
A	14	Valor	-0,76	-40,70	1,33
		Classificação	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
B	68	Valor	-0,24	-36,00	1,12
		Classificação	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
C	12	Valor	0,13	-21,70	0,93
		Classificação	Insatisfatório	Satisfatório	Insatisfatório
D	9	Valor	-1,04	-34,50	1,43
		Classificação	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
E	64	Valor	-1,30	-64,50	1,52
		Classificação	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório

Na Tabela 7 é possível observar que, antes dos procedimentos de calibração e validação, os resultados da simulação com o modelo SWAT foram insatisfatórios em sua maioria. Apenas PBIAS obteve resultado satisfatório para a região C no período total.

4.4.2 Sub-regiões A.1, A.2, A.3, C.1

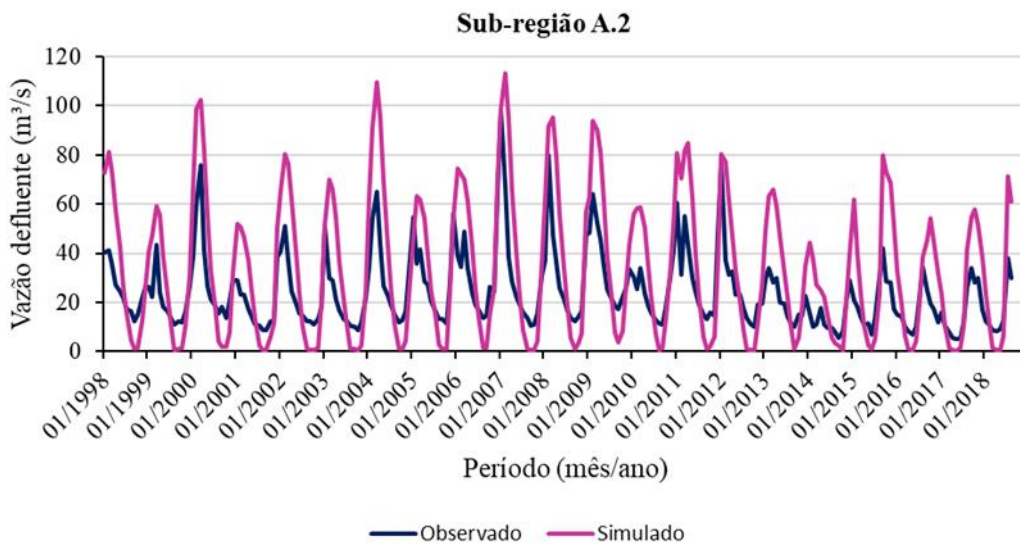
As Figuras 22 a 25, apresentam a distribuição dos dados mensais de vazão defluente observados, representados em azul, bem como dos valores mensais simulados pelo SWAT, em magenta, entre janeiro de 1998 e dezembro de 2018 para as sub-regiões A.1, A.2, A.3 e C.1.

Figura 22 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a sub-região A.1 da Bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x, o período de dados é expresso em mês/ano e no eixo y, a vazão defluente em m^3/s .



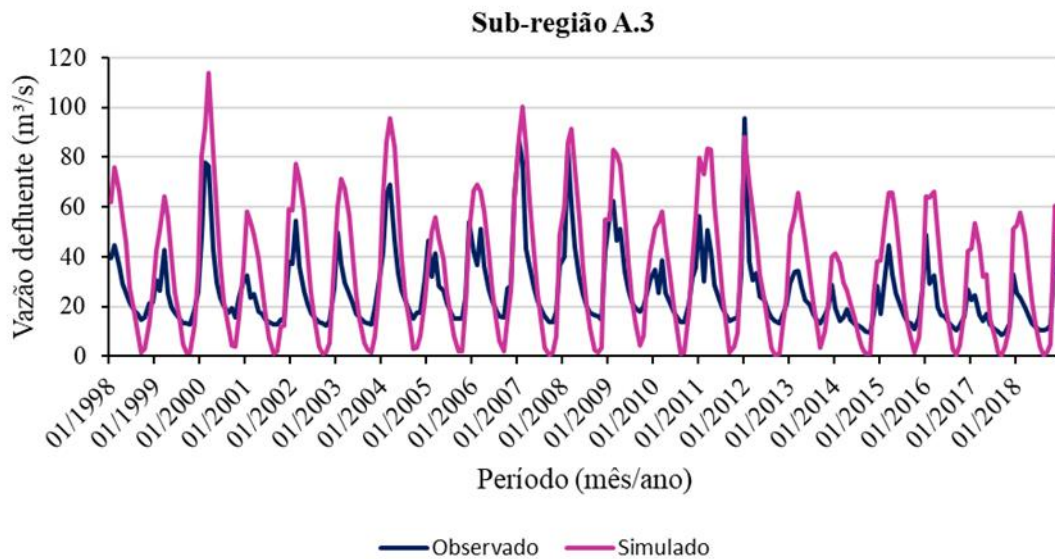
Fonte: autoria própria.

Figura 23 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a sub-região A.2 da Bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x, o período de dados é expresso em mês/ano e no eixo y, a vazão defluente em m^3/s .



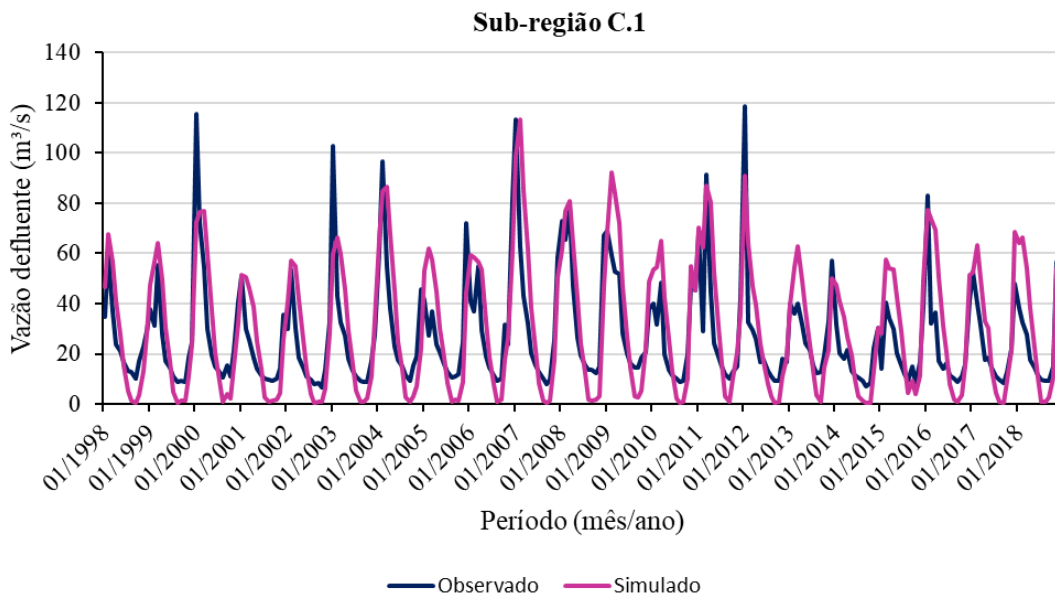
Fonte: autoria própria.

Figura 24 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a sub-região A.3 da Bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x, o período de dados é expresso em mês/ano e no eixo y, a vazão defluente em m³/s.



Fonte: autoria própria.

Figura 25 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal observados e inicialmente simulados (1998-2018) no modelo hidrológico SWAT para a sub-região C.1 da Bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x, o período de dados é expresso em mês/ano e no eixo y, a vazão defluente em m³/s.



Fonte: autoria própria.

De forma semelhante ao verificado anteriormente para as regiões A, B, C, D e E (item 4.3.1), nas Figuras 22 a 25, é possível inferir sobre uma subestimação dos fluxos de base e superestimação dos picos para as regiões A.1, A.2 e A.3. Já na região C.1, conquanto também seja observada uma subestimação do escoamento de base, há uma melhor representação nos

picos de vazão. Além disso, observa-se que para todas as sub-regiões o comportamento geral da vazão mensal ao longo do tempo foi captado pelo modelo. Na sub-região A.1, o valor médio mensal dos dados observados foi igual a 15,67 m³/s e o CV de 0,80. O valor mensal máximo de vazão mensurada foi de 80,63 m³/s e o mínimo de 1,25 m³/s. Já para os dados inicialmente simulados, a média mensal foi igual a 23,99 m³/s, com CV de 0,95. A vazão máxima mensal simulada foi de 85,19 m³/s, enquanto o mínimo foi de 0,35 m³/s. Para a sub-região A.2, os dados mensais observados apresentaram uma média de 24,1 m³/s com CV de 0,63. A máxima vazão mensal para essa sub-região no período analisado foi de 98,13 m³/s, enquanto o valor mínimo mensal foi de 5,04 m³/s. Já os dados simulados mensais obtiveram média de 33,52 m³/s, CV de 0,86, vazão máxima equivalente a 113,2 e mínima de 0,27 m³/s. Para a sub-região A.3 a média mensal dos dados observados foi igual a 25,97 m³/s, com CV de 0,58. A vazão máxima mensal dos dados mensurados foi de 95,90 m³/s e mínima igual a 8,60 m³/s. Para valores simulados, a média mensal foi de 34,11 m³/s, CV de 0,78, vazão máxima mensal de 113,8 m³/s e mínima de 0,39. Por fim, para C.1, a média das vazões mensais observadas foi equivalente a 26,96 m³/s, CV 0,77, vazão máxima mensal de 118,47 e mínima de 6,75 m³/s. Já a média mensal simulada para essa mesma região foi de 30,57 m³/s com CV de 0,86. As vazões máxima e mínima mensais foram de 113,3 m³/s e 0,32 m³/s, respectivamente. As estatísticas mencionadas foram dispostas na Tabela 8 para melhor comparação e visualização dos resultados.

Tabela 8 - Estatísticas obtidas para a vazão observada (m³/s) e a vazão inicialmente simulada (m³/s) para as sub-regiões definidas.

	Sub-região A.1		Sub-região A.2	
	Vazão observada	Vazão simulada	Vazão observada	Vazão simulada
Média	15,67	23,99	24,10	33,52
DP	12,56	22,73	15,07	28,96
CV	0,80	0,95	0,63	0,86
Máximo	80,63	85,19	98,13	113,20
Mínimo	1,25	0,35	5,04	0,27
	Sub-região A.3		Sub-região C.1	
	Vazão observada	Vazão simulada	Vazão observada	Vazão simulada
Média	25,97	34,11	26,96	30,57
DP	15,05	26,65	20,80	26,31
CV	0,58	0,78	0,77	0,86
Máximo	95,89	113,80	118,47	113,30
Mínimo	8,60	0,39	6,75	0,32

Obs.: DP= Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação

Tabela 9 - Resultados acerca do desempenho da simulação inicial realizada no modelo SWAT da variável vazão mensal defluente nas sub-regiões da Bacia do Reservatório de Nova Ponte, de acordo com os indicadores NS, PBIAS e RSR.

Sub-região	Sub-bacia	Resultado	NS	PBIAS	RSR
A.1	23	Valor	-0,64	-53,10	1,28
		Classificação	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
A.2	21	Valor	-0,82	-39,10	1,35
		Classificação	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
A.3	71	Valor	-0,38	-31,30	1,18
		Classificação	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
C.1	53	Valor	0,45	-13,40	0,74
		Classificação	Insatisfatório	Bom	Insatisfatório

O desempenho da simulação inicial foi insatisfatório segundo os indicadores NS e RSR para todas as sub-regiões. Obteve-se resultado também classificado como insatisfatório para as sub-regiões A.1, A.2 e A.3, de acordo com o PBIAS, o qual classificou como bom o desempenho para a sub-região C.1 (Tabela 9).

4.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

No presente trabalho, dois métodos foram utilizados para a alteração dos parâmetros do modelo na análise de sensibilidade e na calibração. Os parâmetros cujos valores variam no espaço, foram modificados pelo método da mudanças relativa ($r_{_}$). Nesse método os valores precedentes são multiplicados por 1 mais o valor resultante da calibração (ABBASPOUR et al., 2007). Ele foi utilizado para ajustar os parâmetros SOL_AWC e SOL_K relacionados aos solos, o parâmetro CN2, cujos valores estão relacionados à cobertura e tipos de solos, bem como o parâmetro HRU_SLP que pode ser diferente para cada sub-bacia. Para os outros parâmetros, definiu-se pelo método de substituição do valor vigente pelo valor calibrado ($v_{_}$). Os parâmetros selecionados na análise de sensibilidade, a forma como foram alterados no SWAT-CUP, assim como o intervalo inicial aplicado estão dispostos no Quadro 5.

Quadro 5 - Parâmetros selecionados para calibração do modelo da Bacia do Reservatório de Nova Ponte, forma de alteração no SWAT-CUP e intervalo inicial. A descrição dos parâmetros está disponível no Quadro 5.

Parâmetros sensíveis	Qualificadores da mudança dos parâmetros	Intervalo inicial	
		Mínimo	Máximo
SURLAG.bsn	Substituição do valor vigente (v__)	0,05	12
GW_DELAY.gw	Substituição do valor vigente (v__)	30	450
GWQMN.gw	Substituição do valor vigente (v__)	0	500
RCHRG_DP.gw	Substituição do valor vigente (v__)	0	0,2
ESCO.hru	Substituição do valor vigente (v__)	0,6	0,9
HRU_SLP.hru	Multiplicação do valor atual por 1 + valor obtido (r__)	-0,25	0,25
CN2.mgt	Multiplicação do valor atual por 1 + valor obtido (r__)	-0,4	0
SOL_AWC.sol	Multiplicação do valor atual por 1 + valor obtido (r__)	0	0,5
SOL_K.sol	Multiplicação do valor atual por 1 + valor obtido (r__)	-0,5	0,5

Fonte: autoria própria.

4.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DAS REGIÕES A, B, C, D, E.

Para cada uma das regiões definidas, uma quantidade diferente de iterações (300 simulações cada) foi executada no processo de calibração. Foram realizadas iterações até que um valor de desempenho satisfatório fosse atingido para os indicadores NS, PBIAS e RSR. Para a região A, 3 iterações foram executadas. Para a região B foram executadas 5 iterações, enquanto para as demais regiões (C, D e E) apenas 1 iteração foi necessária. Posto que até 4 iterações devem ser suficientes para que seja obtida uma boa calibração de acordo com Abbaspour (2015), embora tenham sido necessárias 5 iterações na calibração de B, um número adequado de iterações foi realizado para as demais regiões.

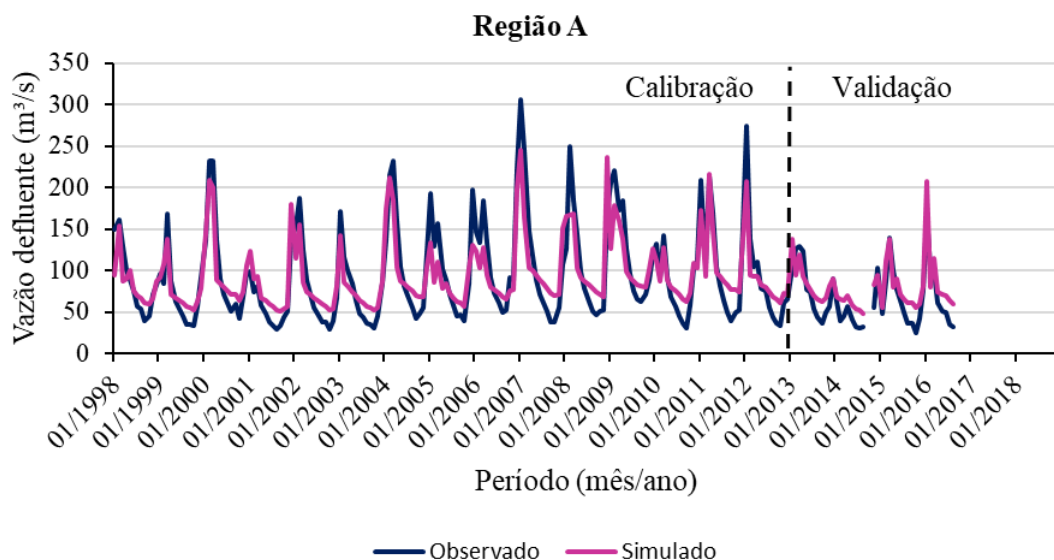
Atingidos valores satisfatórios para os parâmetros, os valores de cada um deles foi substituído pelo valor pós calibração no projeto do modelo no SWAT-CUP. A substituição dos valores dos parâmetros diretamente no SWAT-CUP é vantajosa uma vez que o processo é executado já considerando os qualificadores das mudanças dos parâmetros. Na Tabela 10 estão dispostos os valores obtidos para os parâmetros na calibração de cada uma das regiões.

Tabela 10 - Parâmetros selecionados para calibração e os valores resultantes para cada região após a execução desse processo.

Parâmetros	Valores resultantes dos parâmetros pós calibração				
	Região A	Região B	Região C	Região D	Região E
SURLAG.bsn	5,578	10,493	1,026	5,953	0,906
GW_DELAY.gw	482,297	242,200	379,300	181,186	86,700
GWQMN.gw	358,665	917,033	209,167	251,982	295,833
RCHRG_DP.gw	0,105	0,078	0,008	0,169	0,156
ESCO.hru	0,623	0,584	0,605	0,628	0,619
HRU_SLP.hru	-0,084	0,181	0,184	-0,150	0,088
CN2.mgt	-0,106	-0,154	-0,133	-0,281	-0,090
SOL_AWC().sol	0,503	0,563	0,161	0,483	0,176
SOL_K().sol	0,065	-0,446	-0,428	-0,599	0,388

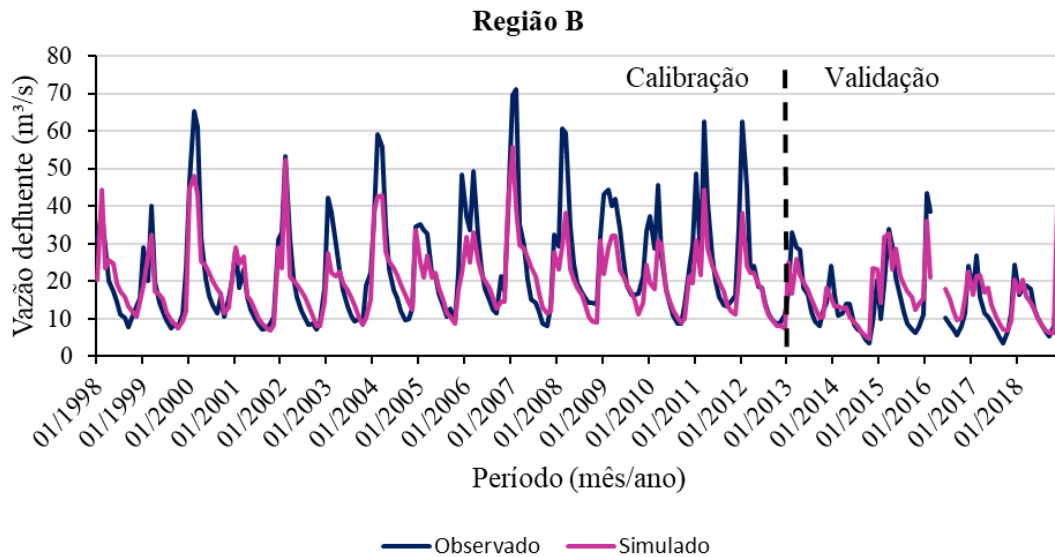
Nas Figuras 26 a 30, estão dispostos gráficos para comparação entre as vazões mensais observadas, em azul, para cada uma das regiões e as vazões mensais simuladas, em magenta, após resultados satisfatórios nos processos de calibração (1998 a 2012) e validação (2013 a 2018).

Figura 26 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal, observados e simulados, nos períodos de calibração (1998-2012) e validação (2013-2018) para a região A da bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x verifica-se o período considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m³/s.



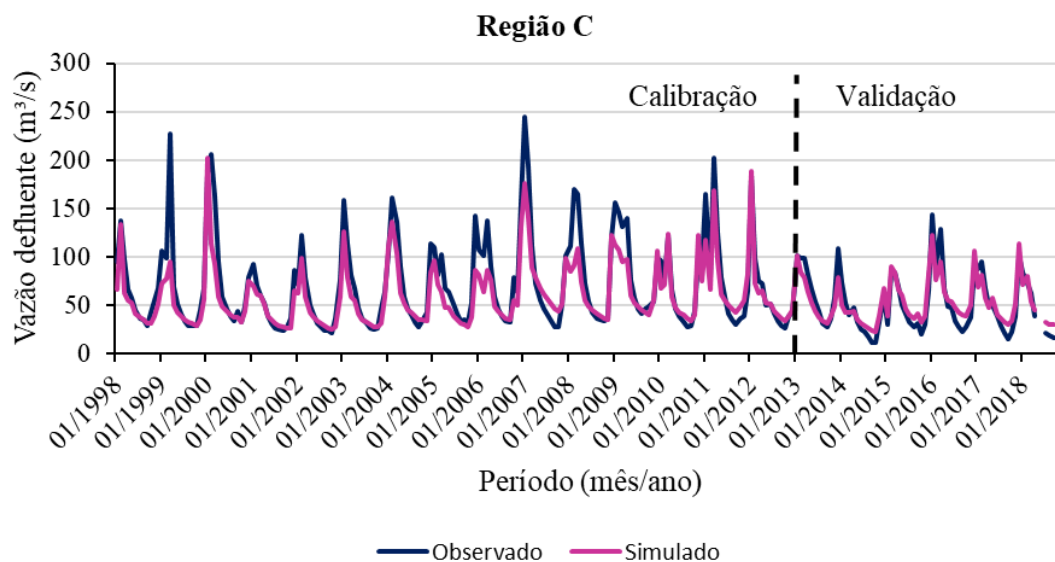
Fonte: autoria própria.

Figura 27 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal, observados e simulados, nos períodos de calibração (1998-2012) e validação (2013-2018) para a região B da bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x verifica-se o período considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m^3/s .



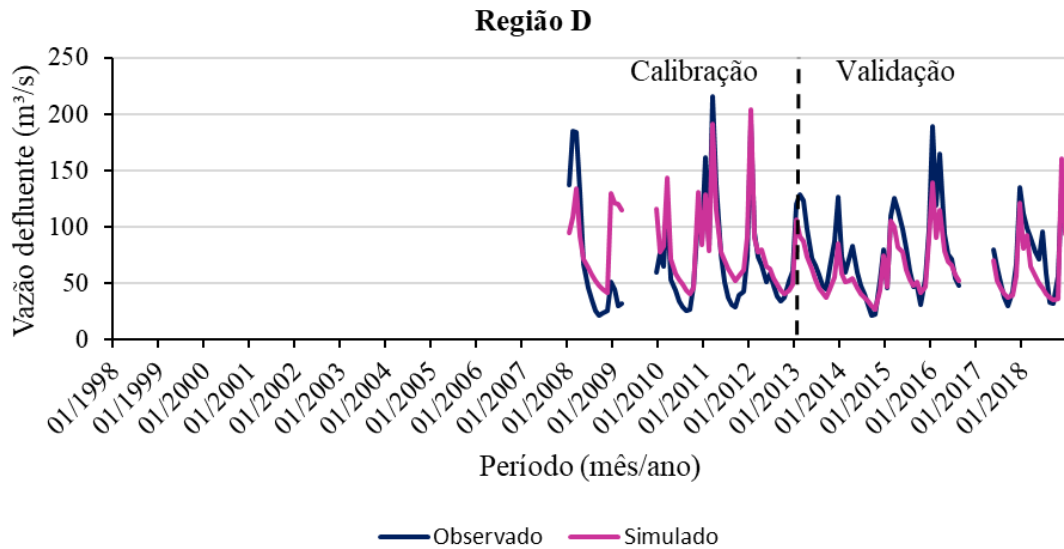
Fonte: autoria própria.

Figura 28 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal, observados e simulados, nos períodos de calibração (1998-2012) e validação (2013-2018) para a região C da bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x verifica-se o período considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m^3/s .



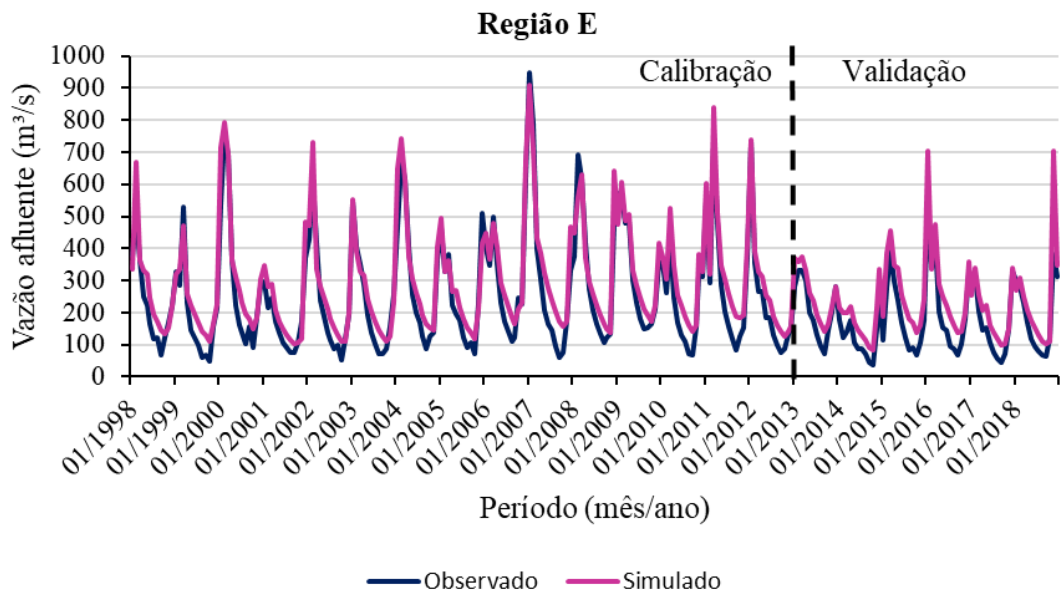
Fonte: autoria própria.

Figura 29 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal, observados e simulados, nos períodos de calibração (1998-2012) e validação (2013-2018) para a região D da bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x verifica-se o período considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m^3/s .



Fonte: autoria própria.

Figura 30 - Comportamento dos dados de vazão de entrada mensal, observados e simulados, nos períodos de calibração (1998-2012) e validação (2013-2018) para a região E da bacia do Reservatório de Nova Ponte. No eixo x verifica-se o período considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões afluentes em m^3/s .



Fonte: autoria própria.

Em todos os gráficos acerca dos resultados dos procedimentos de calibração e validação (Figuras 26 a 30) é possível observar uma grande melhoria na simulação das vazões mensais objetivadas, tanto nos picos de vazão quanto nas recessões. Observando os gráficos

da região A (Figura 26), apesar de ter apresentado melhora na representação do comportamento da vazão mensal, há uma superestimação notável nos fluxos de base. A média mensal de vazão simulada para a região A após a calibração foi de 91,62 m³/s com CV de 0,42, valores bastante aproximados dos obtidos para os dados observados (média de 89,31 m³/s e CV de 0,61). A vazão defluente calibrada da região B também se aproximou das estatísticas dos dados observados, embora observe-se na Figura 27 uma subestimação de alguns picos de vazão mensal. Com parâmetros ajustados, a média mensal de vazão defluente foi de 19,16 m³/s com CV de 0,48 (média dos dados observados foi de 20,83 m³/s e CV de 0,66). Na região C, a partir da visualização da Figura 28, observa-se também subestimação dos picos de vazão em alguns meses. A média da vazão defluente mensal calibrada foi igual a 58,22 m³/s, já o CV foi igual a 0,52. Em relação à Região D, há um grande período sem dados observados. Isso constitui uma limitação na modelagem das vazões mensais da bacia como um todo já que, embora possa ser verificada em maior escala na reprodução de vazões mensais de saída dessa região, ocorreu também nas demais em períodos menores. A média da vazão mensal defluente calibrada da região D foi igual a 71,25 m³/s e CV de 0,47. A adequada calibração das vazões de saída das regiões à montante do reservatório facilitou o processo de calibração da região E. Em uma iteração obteve-se uma representação satisfatória da dinâmica das vazões contribuintes para o reservatório, embora ainda com uma superestimação em fluxos de base mensais. Os resultados das estatísticas calculadas para essa região dão indicativos acerca da melhoria. A média da vazão afluyente mensal da região resultou em uma maior aproximação da média dos valores calibrados em relação à média dos dados mensurados (281,44 m³/s e 234,66 m³/s, respectivamente). Quanto ao CV, este foi igual a 0,57 pós calibração.

Tabela 11 - Resultados obtidos sobre o desempenho dos processos de calibração e validação da vazão das regiões da bacia de acordo com os indicadores NS, PBIAS e RSR.

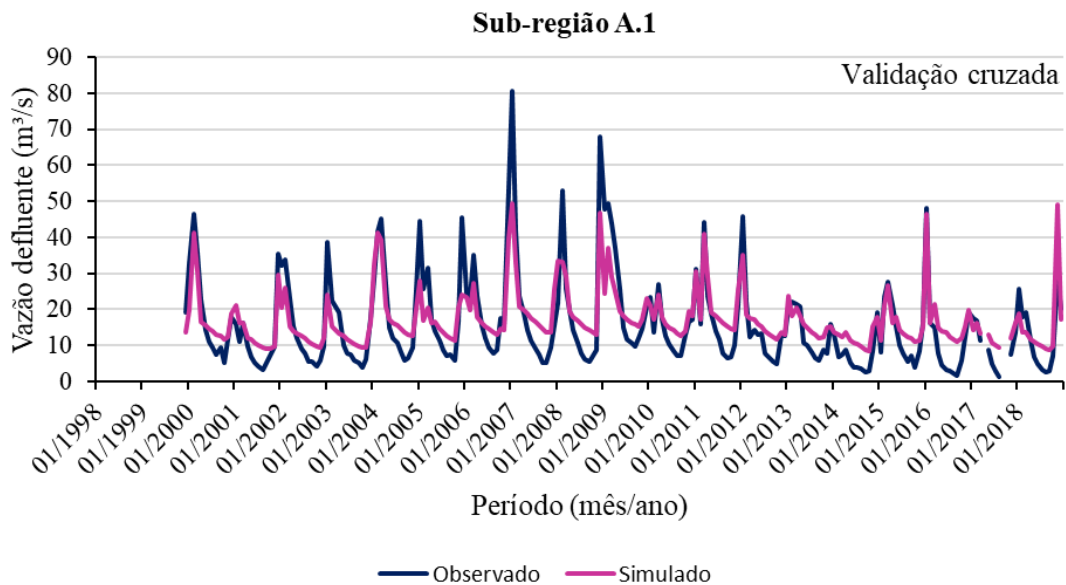
Re- gião	Resultado	Calibração			Validação		
		NS	PBIAS	RSR	NS	PBIAS	RSR
A	Valor	0,78	0,10	0,47	0,67	-14,40	0,58
	Classificação	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Bom	Bom	Bom
B	Valor	0,68	12,60	0,57	0,50	-11,80	0,71
	Classificação	Bom	Bom	Bom	Satisfatório	Bom	Insatisfatório
C	Valor	0,74	14,50	0,51	0,83	-1,80	0,41
	Classificação	Bom	Bom	Bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom
D	Valor	0,55	-16,40	0,67	0,67	17,50	0,58
	Classificação	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Bom	Satisfatório	Bom
E	Valor	0,87	-16,80	0,37	0,57	-30,50	0,66
	Classificação	Muito bom	Satisfatório	Muito bom	Satisfatório	Insatisfatório	Satisfatório

Após executadas a calibração e a validação das 5 regiões, observa-se na Tabela 11 que, com exceção de 2 resultados insatisfatórios (o indicador RSR para a região B e o PBIAS para a região E), foram obtidas boas respostas, classificadas entre satisfatórias e muito boas. Isso indica a grande melhoria obtida com a execução dos dois procedimentos.

4.7 VALIDAÇÃO CRUZADA DAS SUB-REGIÕES A.1, A.2, A.3, C.1.

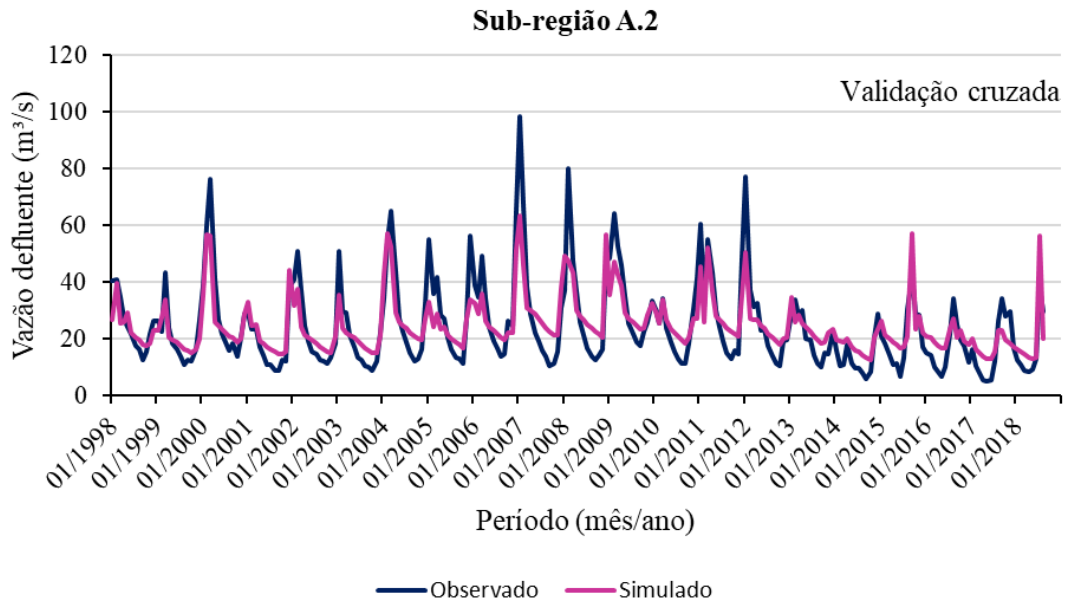
Nas Figuras 31 a 34, são apresentados os gráficos com a comparação entre as vazões mensais observadas, em azul, para cada uma das sub-regiões e as vazões mensais simuladas, em magenta, após a realização da validação cruzada com os valores de parâmetros obtidos na calibração das regiões associadas a cada sub-região.

Figura 31 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal, observados e simulados, no período total considerado (1998-2018) para a sub-região A.1 da bacia do Reservatório de Nova Ponte no processo de validação cruzada. No eixo x verifica-se o período de considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m^3/s .



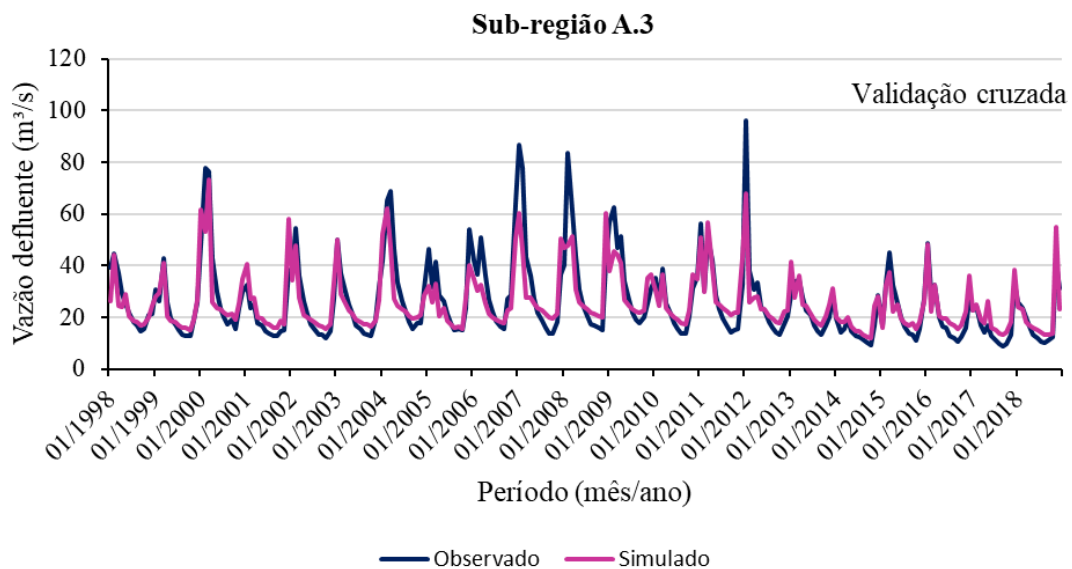
Fonte: autoria própria.

Figura 32 - Comportamento dos dados de vazão mensal, observados e simulados, no período total considerado (1998-2018) para a sub-região A.2 da bacia do Reservatório de Nova Ponte no processo de validação cruzada. No eixo x verifica-se o período de considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m^3/s .



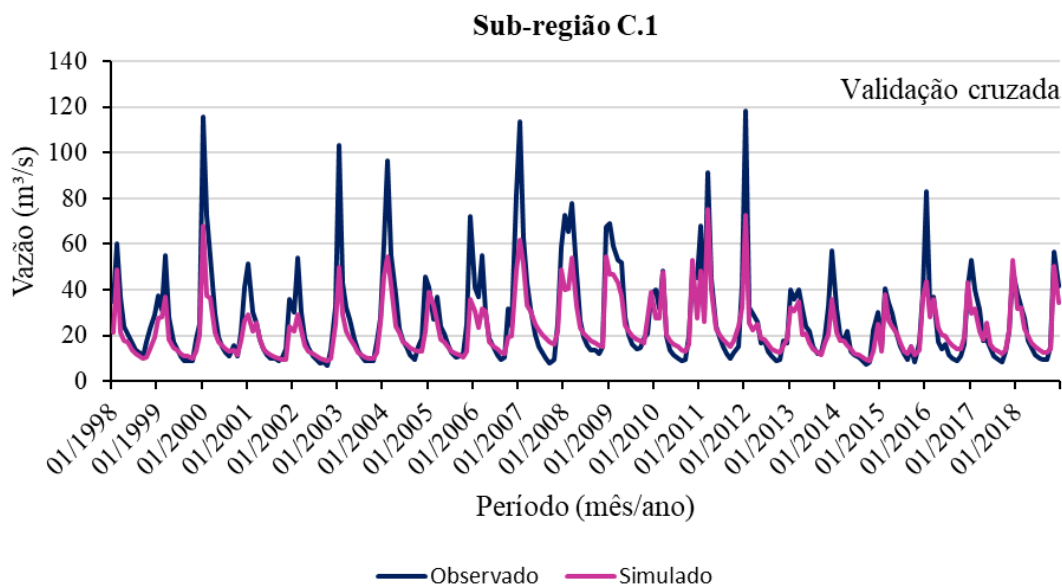
Fonte: autoria própria.

Figura 33 - Comportamento dos dados de vazão mensal, observados e simulados, no período total considerado (1998-2018) para a sub-região A.3 da bacia do Reservatório de Nova Ponte no processo de validação cruzada. No eixo x verifica-se o período de considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m^3/s .



Fonte: autoria própria.

Figura 34 - Comportamento dos dados de vazão de saída mensal, observados e simulados, no período total considerado (1998-2018) para a sub-região C.1 da bacia do Reservatório de Nova Ponte no processo de validação cruzada. No eixo x verifica-se o período de considerado dos dados, expresso em mês/ano e no eixo y, as vazões defluentes em m³/s.



Fonte: autoria própria.

A aplicação dos parâmetros obtidos na calibração da região A para as sub-regiões A.1, A.2 e A.3 refletiu em médias calculadas que se aproximaram das estatísticas obtidas para os dados observados nas mesmas sub-regiões. Já calibradas, as vazões mensais defluentes da sub-região A.1 apresentaram uma média de 17,21 m³/s e CV de 0,45, enquanto para as vazões observadas a média mensal foi de 15,67 m³/s e CV de 0,80. A partir da Figura 31 nota-se uma superestimação considerável dos fluxos de base nessa região após o procedimento realizado, também observada para a sub-região A.2 (Figura 32). Na sub-região A.2, a média mensal já ajustada foi de 24,71 m³/s e CV de 0,39. Já sobre os dados observados, a média foi de 24,1 m³/s e CV de 0,63. Para a sub-região A.3, a média da vazão mensal defluente calibrada foi de 25,7 m³/s com CV de 0,44 e para os dados mensurados, uma média de 25,97 m³/s foi obtida e CV foi igual a 0,58. Já para a região C.1 a aplicação dos parâmetros ajustados da região C, embora tenha resultado em melhoria visual dos gráficos, principalmente devido aos fluxos de base, a média mensal (22,58 m³/s) afastou-se um pouco da média observada (26,96 m³/s) em relação à simulação inicial no SWAT (30,57 m³/s). Isso pode estar relacionado às vazões de pico que foram subestimadas após a validação cruzada. O CV pós calibração foi de 0,62.

Tabela 12 - Resultados obtidos sobre o desempenho do processo de validação cruzada da vazão defluente das sub-regiões A.1, A.2, A.3 e C.1 de acordo com os indicadores NS, PBIAS e RSR. de acordo com os indicadores NS, PBIAS e RSR.

Região	Resultado	NS	PBIAS	RSR
A.1	Valor	0,70	-9,80	0,55
	Classificação	Bom	Muito bom	Bom
A.2	Valor	0,72	-2,50	0,53
	Classificação	Bom	Muito bom	Bom
A.3	Valor	0,76	1,10	0,49
	Classificação	Muito bom	Muito bom	Muito bom
C.1	Valor	0,70	16,30	0,54
	Classificação	Bom	Satisfatório	Bom

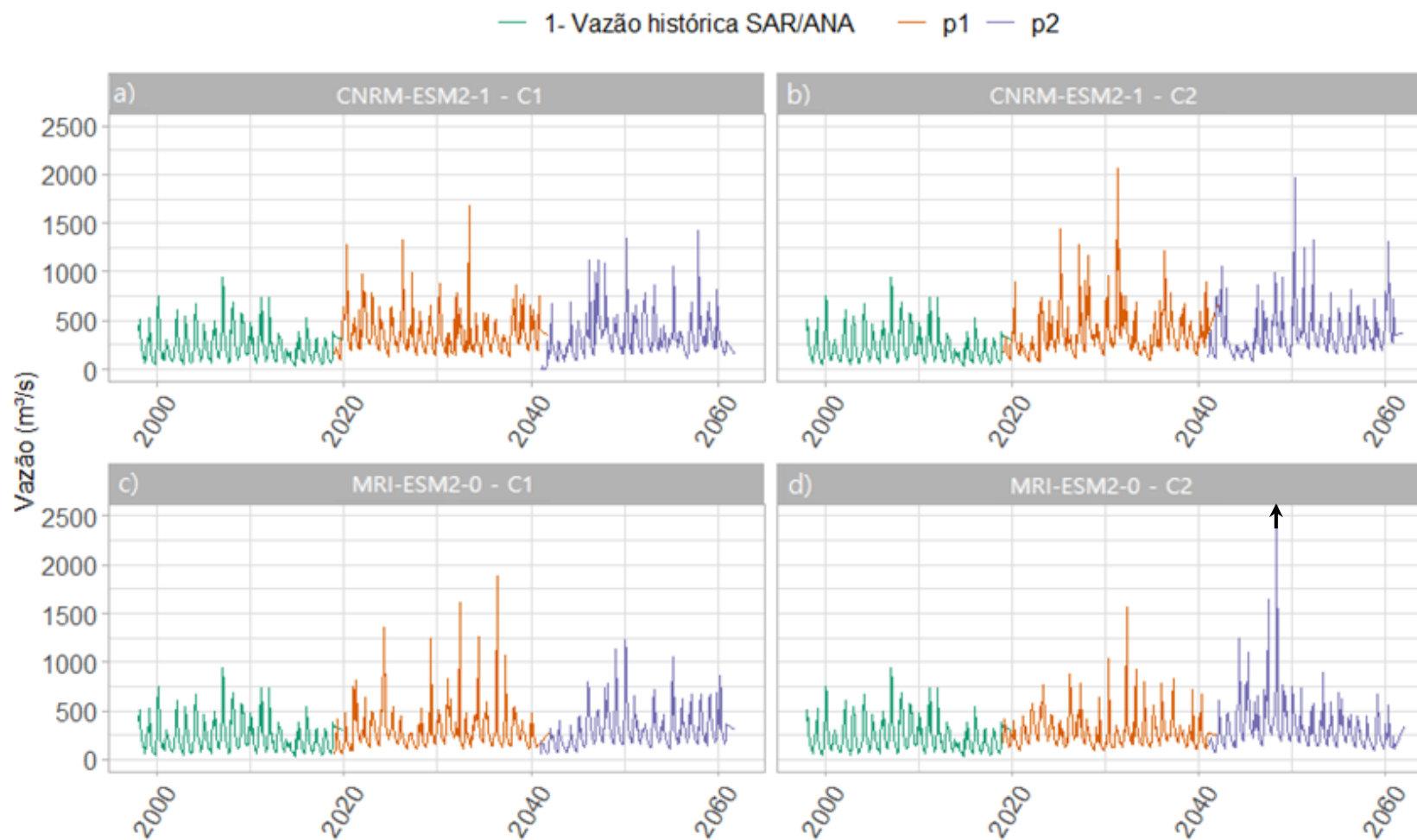
Na Tabela 12 observa-se que o desempenho do processo de validação cruzada foi, no mínimo, satisfatório em todas as sub-regiões e para todos indicadores analisados. Os melhores resultados foram obtidos para a região A.3, na qual todos os indicadores tiveram desempenho muito bom.

4.8 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE VAZÃO MENSAL FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As vazões simuladas sob cenários futuros de mudanças climáticas apresentam maior amplitude de valores, indicando um possível aumento na variabilidade da vazão devido a mudanças climática. Quando comparada a variabilidade entre cenários, observou-se maior dispersão no cenário 2 e, comparando os modelos entre si, o modelo CNRM-ESM2-1 parece gerar valores com maior variância, embora o MRI-ESM2-0 tenha registrado um ponto de máximo superior a 2.500 m³/s no C2 (Figura 35).

Além de aumento na variabilidade, observou-se maiores vazões médias e maiores medianas das vazões nos períodos p1 e p2 do que no cenário referência em todos os modelos e cenários avaliados, sendo a mediana do período p2 maior do que a de p1 em todos esses casos, exceto para o modelo CNRM-ESM2-1 no cenário 1 (Figura 35a). Comparando-se entre modelos, o CNRM tende a apresentar as vazões médias e as medianas das vazões maiores. A vazão média desse modelo foi maior do que 300 m³/s em todos os períodos e cenários simulados, sendo que a vazão histórica média registrada foi igual a 234,7 m³/s (Tabela 13).

Figura 35 - Série temporal da vazão afluyente (m^3/s) ao Reservatório de Nova Ponte obtida junto ao SAR (ANA, 2022) no período histórico e nas janelas de previsão (p1 e p2) segundo a) modelo CNRM-ESM2-1 e cenário 1 (C1); b) modelo CNRM-ESM2-1 e cenário 2 (C2) c) modelo MRI-ESM2-0 e C1; d) modelo MRI-ESM2-0 e C2.



Fonte: autoria própria.

Tabela 13 - Análise descritiva da vazão (m³/s) no Reservatório de Nova Ponte segundo modelo, cenário e período avaliado.

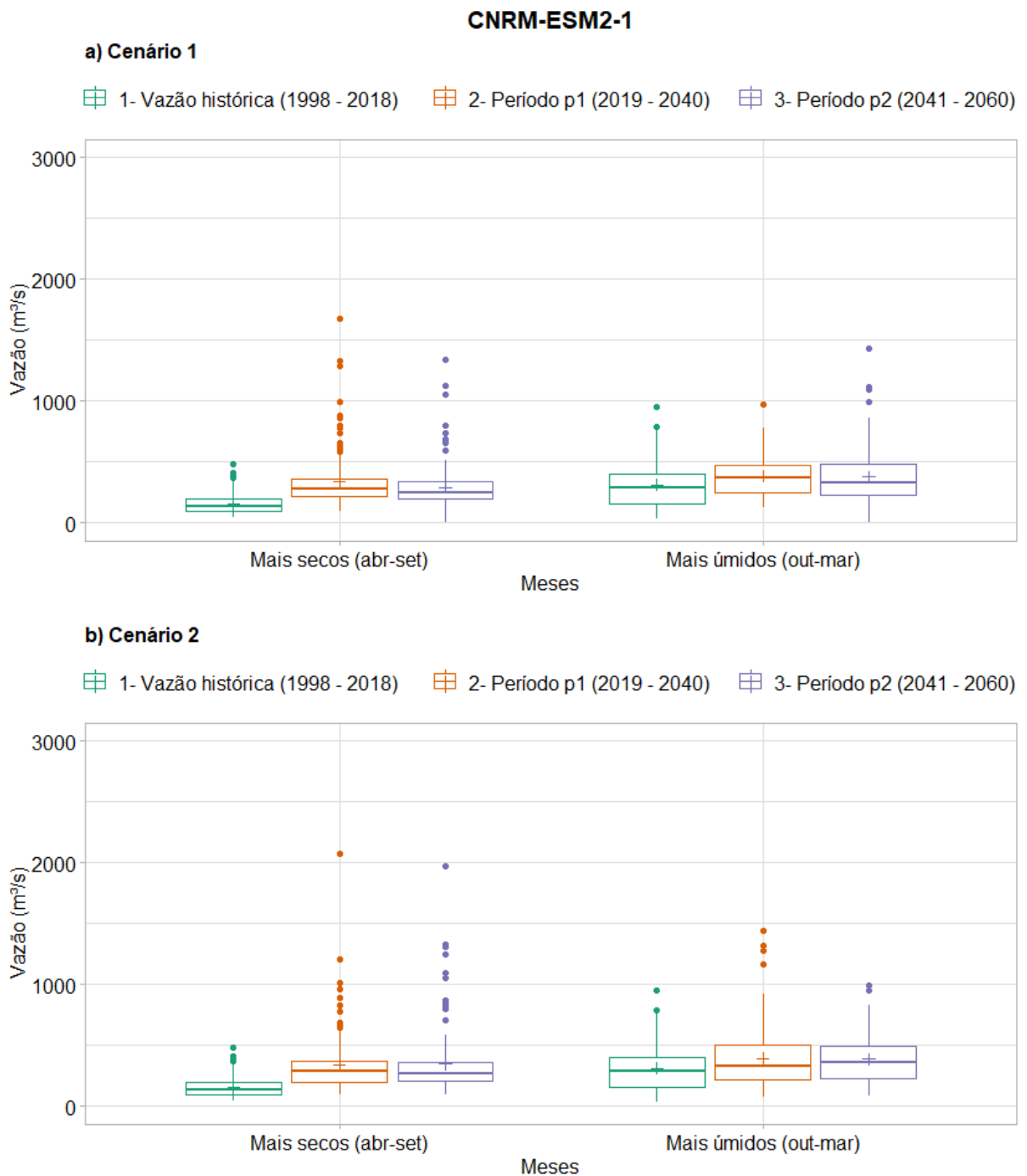
Período	Cenário	Modelo	Média	Diferença das médias (%)	Desvio padrão	Mínimo	Mediana	Diferença das medianas (%)	P- valor*	Máximo
Histórico	-	-	234,66		164,04	35,96	176,19	-	-	948,93
p1	C1	CNRM	364,75	55,44	209,57	95,11	314,30	78,39	0	1676,00
p2	C1	CNRM	333,17	41,98	220,63	1,60	277,85	57,70	0	1428,00
p1	C1	MRI	302,91	29,09	226,61	41,93	244,10	38,54	0	1891,00
p2	C1	MRI	308,76	31,58	192,70	43,89	263,70	49,67	0	1235,00
p1	C2	CNRM	366,81	56,32	249,11	77,69	302,45	71,66	0	2070,00
p2	C2	CNRM	367,96	56,81	238,67	85,29	308,85	75,29	0	1970,00
p1	C2	MRI	288,17	22,80	178,56	91,21	242,95	37,89	0	1571,00
p2	C2	MRI	329,00	40,20	259,21	75,25	264,80	50,29	0	2761,00

*Obs.: A hipótese nula do Teste de Wilcoxon considera que as medianas testadas são iguais.

4.9 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE OS MESES ATUALMENTE MAIS SECOS E MAIS ÚMIDOS PARA CADA CENÁRIO AVALIADO

4.9.1 Cenários com dados do modelo CNRM-ESM2-1

Figura 36 - Vazão histórica afluyente (m^3/s) do reservatório de Nova Ponte no cenário de referência (1- vazão histórica SAR/ANA) e vazão afluyente estimada (m^3/s) por meio do modelo CNRM-ESM2-1 no (a) cenário 1 (SSP 2 4.5) e no (b) cenário 2 (SSP5 8.5) nos meses mais secos (abril a setembro) e mais úmidos (outubro a março) para os dois períodos futuros analisados (p1=2019 a 2040, p2=2041 a 2060).



Fonte: autoria própria.

Na Figura 36 acerca dos resultados alcançados com dados do modelo CNRM-ESM2-1, os boxplots gerados indicam maior distância interquartílica dos dados de vazão nos meses mais úmidos do que nos mais secos, para todos os períodos considerados em ambos os cenários (Figura 36a e 36b). Ao comparar-se os resultados preditos para os períodos futuros (p1 e p2) com as observações do período histórico (CR), outra semelhança entre os cenários C1 e C2 observada diz respeito às vazões futuras nos meses mais secos. Nesses meses há possibilidade de ocorrência de maiores variações nas vazões afluentes ao reservatório de Nova Ponte, tanto em um curto (p1) quanto em um médio prazo (p2).

A análise do C1 (Figura 36a) indica a possibilidade de serem observadas vazões extremas maiores do que 1.500 m³/s no p1 dos meses mais secos, bem como de vazões mínimas mais baixas para todos os meses do ano no p2 que no período do CR. Já no C2 (Figura 36b) é possível inferir sobre uma provável ocorrência de vazões extremas superiores às do período histórico, tanto no p1 quanto no p2 dos meses mais secos, as quais podem superar os 2.000 m³/s em um curto prazo.

Tabela 14 - Resultado do teste de Levene para o modelo CNRM-ESM2-1 nos cenários e períodos avaliados.

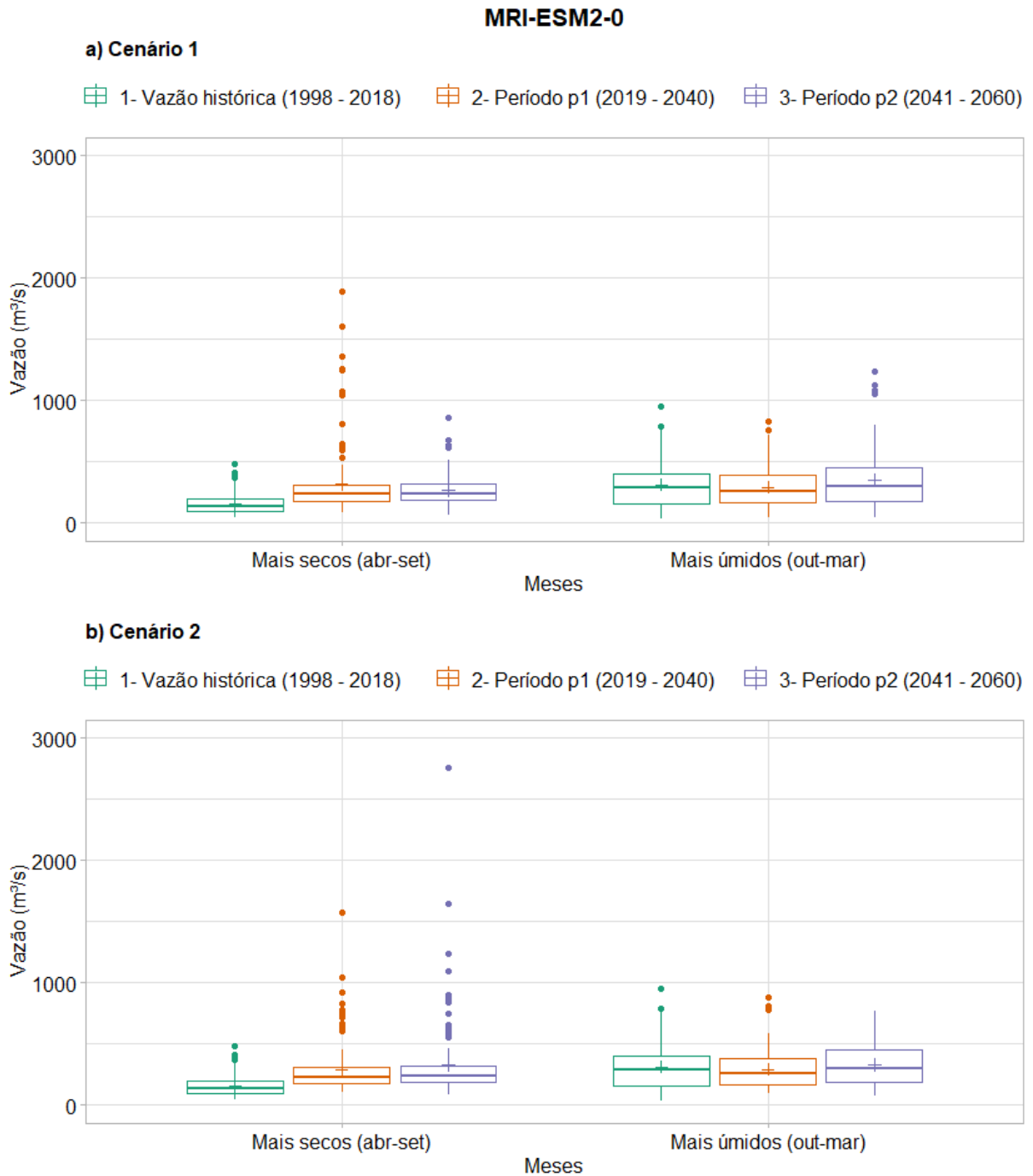
Cenário (comparado ao CR)	Meses	Estatística F	P-valor* Levene
C1p1 CNRM-ESM2-1	Mais secos (abril a setembro)	12,75	0,00
	Mais úmidos (outubro a março)	0,23	0,63
C1p2 CNRM-ESM2-1	Mais secos (abril a setembro)	12,07	0,00
	Mais úmidos (outubro a março)	1,87	0,17
C2p1 CNRM-ESM2-1	Mais secos (abril a setembro)	17,11	0,00
	Mais úmidos (outubro a março)	3,00	0,08
C2p2 CNRM-ESM2-1	Mais secos (abril a setembro)	13,18	0,00
	Mais úmidos (outubro a março)	0,28	0,60

*Obs.: Para o teste de Levene a hipótese nula é Ho: variâncias são iguais.

Na Tabela 14, percebe-se que o Teste de Levene corrobora com a análise feita dos boxplots sobre as vazões futuras preditas com base no modelo CNRM-ESM2-1. Esse teste indica que todas as vazões dos meses mais secos, quando comparadas ao cenário de referência, tiveram variâncias diferentes (p-valor < 0,05). O mesmo não foi observado para os meses mais úmidos (todos com p-valor > 0,05). Assim, a partir dos dados do modelo CNRM-ESM2-1, pode-se esperar que, em ambos os cenários considerados (C1 e C2), tanto no período de curto quanto no de médio prazo (p1 e p2), as vazões tenham maiores oscilações de valores nos meses mais secos, de abril a setembro.

4.9.2 Cenários com dados do modelo MRI-ESM2-0

Figura 37 - Vazão histórica afluente (m^3/s) do reservatório de Nova Ponte no cenário de referência (1- vazão histórica SAR/ANA) e vazão afluente estimada (m^3/s) por meio do modelo MRI-ESM2-0 no (a) cenário 1 (SSP2 4.5) e no (b) cenário 2 (SSP5 8.5) nos meses mais secos (abril a setembro) e mais úmidos (outubro a março) para os dois períodos futuros analisados (p1=2019 a 2040, p2=2041 a 2060).



Fonte: autoria própria.

A avaliação dos boxplots de vazões na Figura 37a, associada ao C1 elaborado com saídas do modelo MRI-ESM2-0, bem como na Figura 37b, com informações do C2 do mesmo modelo, aponta maior distância interquartilica nos dados dos meses mais úmidos do ano ao

compará-los aos meses mais secos, independentemente do período analisado, assim como foi observado nas simulações referentes ao modelo CNRM-ESM2-1. Por outro lado, ao comparar as simulações futuras com o CR, não são observadas mudanças representativas na variação das vazões preditas associadas aos meses mais úmidos para ambos os períodos e cenários analisados. Apenas nos meses mais secos há um provável aumento na variabilidade das vazões em p1 e p2. Destaca-se nos meses de abril a setembro (mais secos) a ocorrência provável de valores extremos de vazão para os períodos futuros. Para o C1 (Figura 37a) isso é observado sobretudo no p1 conquanto para o C2 (Figura 37b) ocorre especialmente no p2. Neste, um evento de vazão maior que 2.500 m³/s foi observado.

Tabela 15 - Resultado do teste de Levene para o modelo MRI-ESM2-0 nos cenários e períodos avaliados.

Cenário (comparado ao CR)	Meses	Estatística F	P-valor Levene
C1p1 MRI-ESM2-0	Mais secos (abril a setembro)	10,32	0,00
	Mais úmidos (outubro a março)	3,64	0,06
C1p2 MRI-ESM2-0	Mais secos (abril a setembro)	7,84	0,01
	Mais úmidos (outubro a março)	2,02	0,16
C2p1 MRI-ESM2-0	Mais secos (abril a setembro)	8,02	0,00
	Mais úmidos (outubro a março)	4,39	0,04
C2p2 MRI-ESM2-0	Mais secos (abril a setembro)	9,25	0,00
	Mais úmidos (outubro a março)	0,01	0,94

*Obs.: Para o teste de Levene a hipótese nula é H_0 : variâncias são iguais.

A Tabela 15 indica que o Teste de Levene reforça a análise dos boxplots sobre as vazões futuras preditas com base no MRI-ESM2-0. Observa-se que, de acordo esse teste, as vazões simuladas, quando comparadas ao cenário de referência (1998 a 2018), foram diferentes quanto à variância dos dados (p -valor $< 0,05$) em todas as comparações, exceto para os meses mais úmidos nos períodos 1 e 2 do cenário 1 (p -valor = 0,47 e 0,06, respectivamente), assim como para os meses mais úmidos no período 2 do cenário 2 (p -valor = 0,30 e 0,22, respectivamente). Isso indica que, de acordo com as simulações com o modelo MRI-ESM2-0, a variabilidade dos dados nos meses mais secos será maior que a variabilidade do cenário de referência em todos os cenários e períodos avaliados. Ainda de acordo com o teste de Levene, o mesmo ocorrerá com a variância dos dados de vazão projetados nos meses mais úmidos do período 1 no cenário 2.

5 DISCUSSÃO

No presente trabalho, buscou-se avaliar como cenários de mudanças climáticas poderão alterar, em um futuro de curto e de médio prazo, a vazão da Bacia do Reservatório de Nova Ponte. Para chegar nesse ponto, a simulação da vazão executada no modelo SWAT passou pelos processos de calibração e validação *multi-site* no SWAT-CUP, através da divisão da bacia estudada em cinco regiões. Com o modelo já calibrado, foram executadas simulações com dois cenários futuros de mudanças climáticas, propostos para o AR6 do IPCC (2022a). A partir disso, a avaliação de possíveis impactos dos cenários foi feita para a vazão afluente ao reservatório de Nova Ponte.

Por meio dos resultados encontrados, foi possível observar que, após os processos de calibração e validação *multi-site* do modelo hidrológico da Bacia do Reservatório de Nova Ponte, o SWAT foi capaz de representar satisfatoriamente o comportamento das vazões de saída das regiões de montante do reservatório e, então, da vazão afluente ao reservatório, que também passou por estes mesmos processos. Isso mostrou também a importância da seleção de parâmetros sensíveis para os cálculos do modelo na calibração. Para a maioria das regiões, os parâmetros selecionados permitiram a obtenção de resultados satisfatórios após a execução de 4 ou menos iterações, como indicado por Abbaspour (2007).

A avaliação dos cenários de mudanças climáticas na resposta hidrológica da Bacia do Reservatório de Nova Ponte, diferente do esperado, demonstrou que as vazões médias prováveis não irão reduzir quando comparadas ao cenário de referência, podendo inclusive aumentar. Por isso, a hipótese inicial foi rejeitada. Além disso, é possível notar diferenças na variabilidade dos dados nos cenários 1 e 2 das projeções de vazão em curto (p1) e médio prazo (p2), ao serem comparadas ao cenário histórico de referência.

Quando considerados os resultados da vazão afluente futura com dados dos dois modelos de sistema terrestre, pode-se dizer que a maior variação dos dados ocorreu principalmente nos meses mais úmidos do ano, de outubro a março. Destaca-se ainda a possibilidade de ocorrência de eventos de vazões extremas para os cenários e modelos avaliados. Quando as mudanças climáticas futuras foram baseadas no modelo francês CNRM-ESM2-1, apenas no período de curto prazo do C1, nos meses mais úmidos, não se observou diferenças na variância da vazão em relação ao cenário de referência. Quanto às predições associadas ao modelo japonês MRI-ESM2-0, ressalta-se o aumento na variabilidade da vazão estimada nos meses mais secos do ano, em relação ao cenário de referência. O resultado de vazão extrema maior que 2000 m³/s, observado no cenário 2 a médio prazo (p2) também

chamou a atenção uma vez que, de acordo com as regras de operação do ONS, essa é a vazão de saída máxima permitida no reservatório de Nova Ponte devido ao risco de inundação dos reservatórios à jusante (ONS, 2021).

Em contexto de mudanças climáticas, outros autores encontraram resultados semelhantes no país, corroborando com os resultados encontrados. Arteaga (2019) analisou o impacto de mudanças climáticas no regime de vazão da bacia do rio São Francisco, entre os anos de 2006 e 2099. Como resposta ao padrão de vento nas simulações futuras, assim como de provável aumento no transporte de umidade advindo de outras regiões, Arteaga (2019) deduziu um possível aumento da vazão. De acordo com o autor esse aumento seria provável, principalmente na região do Alto São Francisco, em Minas Gerais, durante os meses de verão. Já na região dos pampas, no Sul do Brasil, Steinmetz (2020) avaliou o impacto das mudanças climáticas sobre as condições hidrológicas de três sub-bacias da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo, no Rio Grande do Sul, a partir de 4 modelos hidrológicos globais. Os resultados apresentados projetaram aumento das vazões médias anuais, máximas e mínimas, além indicar uma maior frequência de eventos extremos. Por outro lado, Silva (2019) realizou estimativa da vazão futura para uma região no semi-árido nordestino, entre 2030 e 2060. O autor acoplou resultados de dois modelos de circulação atmosférica a um modelo de predição de uso e ocupação do solo. Embora para o modelo NoerESM1-m os indicativos sejam de prováveis reduções das vazões médias mensais, a partir do modelo IPSL-CM5A-LR foram encontrados resultados de provável aumento futuro das vazões médias mensais.

Em contrapartida, outros estudos com propostas semelhantes apontam casos em que há uma provável redução futura no escoamento superficial nas bacias estudadas, muitos deles no Brasil (ALVARENGA et al., 2016; DE JONG et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2017; SANTOS et al., 2019; SIQUEIRA et al., 2021). Siqueira e colaboradores (2021) fizeram uma análise nas Bacias do Alto São Francisco, do Rio Pará e do Rio Paraopeba (os três principais tributários da Bacia do Reservatório de Três Marias, em Minas Gerais) com cenários projetados entre 2015 e 2070. Para as três bacias foram observados indicativos de redução da vazão. Os autores ressaltam sobre a possibilidade de ocorrência de situações de escassez extrema no futuro médio e distante, principalmente no período seco de agosto a outubro. Os autores ainda discorrem sobre a possibilidade dessa redução resultar em insegurança e vulnerabilidade hídrica no futuro, o que pode afetar também a geração de energia elétrica. Sob outra perspectiva, Oliveira e colaboradores (2017), associaram dois modelos climáticos regionais a dois cenários climáticos, em um sistema com 3 reservatórios de usinas hidrelétricas em cascata em Minas. A análise realizada resultou, sobretudo, em resultados

projetivos de redução na vazão mensal naturalizada dos reservatórios, entre 2007 e 2099. Para os autores, os resultados indicam um provável obstáculo futuro para a produção de energia hidrelétrica em Minas Gerais e podem comprometer a operação do sistema elétrico de toda a região.

Os diferentes resultados obtidos em trabalhos como esse, demonstram a importância de que eles sejam realizados considerando cada bacia de interesse em particular, caso existam dados disponíveis, de forma a refletir peculiaridades de cada região. Para esse fim, o uso de modelos hidrológicos como o SWAT, que permitem incorporar a heterogeneidade espacial da área de estudos é essencial. Isso pode auxiliar na gestão mais efetiva da bacia hidrográfica, já que as características singulares de cada uma podem trazer modificações assertivas na representação do comportamento hidrológico pelo modelo.

Fontes hídricas respondem a 64,9% da oferta interna de energia no Brasil (EPE, 2020). Alterações nos recursos hídricos incitadas pelas mudanças climáticas impactam diretamente os setores hidroelétrico e agrícola, dado a grande dependência de água acessível (VAN VLIET et al., 2016). Assim, resultados de aumento nas vazões médias mensais em decorrência das mudanças climáticas na Bacia do Reservatório de Nova Ponte (e em outras bacias brasileiras) podem ser um panorama oportuno considerando a manutenção desses setores na área de estudos. Sobretudo quanto ao setor elétrico, isso dá indícios de que a bacia em estudo poderá ser importante para o cumprimento da meta brasileira 7.2 do ODS 7, sobre “manter elevada a participação de energias renováveis na matriz energética nacional” (IPEA, 2018) e, nesse caso não só até 2030, mas possivelmente até 2060.

Ao serem comparados aos resultados de redução da vazão, bastante observados na literatura para outras regiões, estes podem indicar um aumento na demanda em bacias que não experimentarem redução em um futuro provável, assim como conflitos pelo uso da água. É possível que essas bacias hidrográficas com respostas mais favoráveis para os setores mencionados sejam sobrecarregadas, a fim de compensar outras com respostas desfavoráveis. Além disso, devido ao crescimento demográfico, a necessidade de energia para a população e municípios tende a crescer nos anos vindouros (MARTINS; FERREIRA, 2011). A sobrecarga de sistemas hidrológicos pode causar um aumento da produção de energia por fontes não-renováveis e acréscimos no preço do fornecimento (OLIVEIRA et al., 2017). A energia não-renovável, produzida pela queima de combustíveis fósseis, libera GEE. Isso gera um ciclo oposto aos esforços para mitigação do aquecimento global, uma vez que favorece mudanças no clima (GOLDEMBERG, 2015).

Embora resultados de maiores vazões para o futuro possam parecer somente benéficos, é importante que também sejam considerados possíveis danos associados. Como consequência do aumento das vazões, é possível que haja aumento dos processos erosivos e deposição de sedimento nos canais e reservatório. O assoreamento pode causar redução do volume útil do reservatório e gerar problemas para a geração de energia, abastecimento e irrigação (PEIXOTO, 2019). Além disso, existe o risco de danos à infraestrutura da barragem e de rompimento (ONO, 2020).

Outro ponto importante a ser considerado a curto e médio prazo está associado ao início de aumento na variabilidade das vazões médias mensais, que podem significar inundações e escassez ocorrendo em um curto intervalo de tempo. Caso ocorra sem um preparo adequado, de forma inesperada, isso pode trazer desafios para o setor hidrelétrico, bem como para os trabalhadores rurais e população no geral.

A conscientização dos tomadores de decisão e população local acerca de possíveis modificações na disponibilidade de água (não só em quantidade como em qualidade) associadas às alterações climáticas, é uma das formas de evitar imprevistos e envolver a comunidade no debate sobre estratégias de adaptação e proteção dos recursos hídricos na região. Isso corresponde à meta brasileira 6.5 (ODS 6) que objetiva “implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis de governo” (IPEA, 2018). Associa-se também à meta brasileira 13.3 (ODS 13) que trata de conscientizar e educar as pessoas sobre riscos da mudança do clima (IPEA, 2018). Para isso, a cooperação entre comunidades e universidades, por meio de cursos em linguagem acessível, pode ser benéfica. O conhecimento das partes interessadas acerca dos prováveis impactos na região, é um passo a favor do fortalecimento do sistema hidrológico e consequente redução desses impactos.

Sobre o fortalecimento do sistema, uma das atitudes possíveis a serem tomadas na Bacia do Reservatório de Nova Ponte é a recuperação das Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reservas Legais (RL), dada a função de proteção dos recursos hídricos exercida pela vegetação. Além de garantir o cumprimento do Novo Código Florestal (BRASIL, 2012) no que tange às APPs e RL, isso aumenta a resiliência do sistema, reduzindo a ocorrência de variações súbitas na vazão.

Tendo isso em vista, os resultados desse trabalho poderão dar suporte à criação de planos de adaptação às mudanças climáticas na Bacia do Reservatório de Nova Ponte e redução de impactos. Isso permitirá que a modelagem de cenários, não só da bacia em estudo, mas também de outras com características semelhantes, ultrapasse o papel acadêmico e realize a função de antecipação de situações possíveis em favor da sociedade.

5.1 INCERTEZAS NA MODELAGEM

Os modelos são uma representação simplificada da realidade, como introduzido no item 2.1 deste trabalho. Nos modelos, a realidade é construída de acordo com o nível de conhecimento, a perspectiva e o objetivo do pesquisador. Embora sejam ferramentas muito importantes para o estudo de processos selecionados da realidade, há que se considerar limitações na representação desses aspectos. Por melhor que seja o modelo, ainda assim não será possível captar todos os processos, todas as interações e variáveis do ambiente a ser modelado. Por esse motivo é dito que incertezas são inerentes à própria modelagem (ABBOT; REFSGAARD, 1996; CHRISTOFOLETTI, 1999).

As fontes de incertezas podem ser resumidas em quatro:

- 1) Erros dos dados de entrada usados na representação das condições iniciais da bacia no tempo e no espaço (i.e., precipitação, temperatura e evapotranspiração, mapas de tipos e uso dos solos) (ABBASPOUR, 2015; ABBOT; REFSGAARD, 1996). Ocorrem devido à escassez de dados disponíveis e falhas nas séries históricas de entrada ou ainda imprecisões na medição. Na maioria dos casos, os dados de entrada envolvem interpolações, estimações a partir de outras medições (MOGES et al., 2021).
- 2) Erros nos dados mensurados utilizados para comparar com os dados simulados no processo de calibração (i.e., vazão de um rio). Podem ocorrer na medição e/ou processamento dos dados (ABBOT; REFSGAARD, 1996).
- 3) Erros devido aos valores dos parâmetros utilizados (estes erros podem ser reduzidos no processo de calibração). Esse tipo de erro existe devido ao número limitado de observações (ABBOT; REFSGAARD, 1996; GUPTA; GOVINDARAJU, 2019).
- 4) Erros devido à estrutura incompleta do modelo. Eles podem ocorrer por processos não incluídos no modelo, mas presentes na bacia (i.e., erosão eólica) ou em razão de processos incluídos no modelo mas desconhecidos pelo analista e, portanto, não representados (i.e., presença de barragens). Podem também acontecer devido às simplificações conceituais, como por exemplo, observadas no próprio método da Curva Número para obtenção da vazão. É um método que apresenta limitações associadas à sua elevada simplificação, discutidas em trabalhos como de Cunha e colaboradores (2015) e Mishra e Singh (2004) (ABBASPOUR, 2015; MOGES et al., 2021).

Uma forma de considerar essas incertezas e propagá-las em modelos hidrológicos é através da calibração fundamentada no conceito da não-unicidade dos parâmetros. Na

aplicação do conceito, considera-se que nenhuma calibração pode levar a um único conjunto ótimo de parâmetros, dado que existem incertezas. Nesse caso, a solução será o intervalo contendo todos os valores de cada parâmetro que se ajustarem satisfatoriamente à variável medida, resultando em desempenho estatisticamente semelhante (ABBASPOUR; VAGHEFI; SRINIVASAN, 2017). As incertezas serão expressas pelas distribuições dos parâmetros. Assim, ao serem consideradas em análises posteriores, serão propagadas para as saídas do modelo, permitindo a quantificação das incertezas (ABBASPOUR, 2022). Esse é o cenário ideal na modelagem hidrológica, embora dependendo do tempo disponível para análises e do custo computacional, nem sempre seja viável. Nesse caso, a utilização do chamado melhor valor de ajuste para cada parâmetro é uma solução apropriada, uma vez que o valor utilizado pertence à faixa dos valores possíveis e, ainda que limitado, reduz os erros de estimação em relação às simulações iniciais.

Também nas projeções modeladas para o futuro existem muitas fontes de incerteza. No caso do impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos, incertezas nas projeções estão relacionadas ao desconhecimento acerca do desenvolvimento socioeconômico futuro (crescimento demográfico, desenvolvimento econômico local, padrões do estilo de vida e surgimento de novas tecnologias); aos cenários de emissão de GEE; ao modelo climático utilizado (ou conjunto de modelos climáticos); aos métodos utilizados para redução da escala das projeções climáticas, bem como para correção de viés em relação à área de estudos; além de incertezas sobre a demanda futura de água (KUNDZEWICZ et al., 2018).

5.2 LIMITAÇÕES NA MODELAGEM DA BACIA DO RESERVATÓRIO DE NOVA PONTE

No presente trabalho, algumas limitações foram sendo identificadas e listadas ao longo dos processamentos realizados. Uma importante limitação encontrada foi relacionada à representação da vazão defluente ao reservatório, pretendida inicialmente para as análises e projeções a serem realizadas. No entanto, a utilização dessa variável se mostrou inviável para a atual pesquisa.

Dado que o reservatório de Nova Ponte integra o Sistema Interligado Nacional (SIN), suas regras de operação são definidas pelo ONS em tempo real. Isso é feito de acordo com as demandas e eventuais ocorrências dos demais reservatórios do SIN no país. O fato dessas regras poderem mudar com frequência, torna muito complexa a reprodução no modelo da bacia estudada. Para superar esse obstáculo, a reestruturação feita na metodologia foi uma

adaptação da variável da análise. Decidiu-se pela avaliação em cima da vazão simulada afluente ao reservatório, proveniente do curso natural dos rios.

Uma limitação que restringiu a efetividade dos resultados projetados para o futuro está relacionada à utilização do mesmo mapa de uso e cobertura do solo, tanto para o cenário de referência quanto para os períodos futuros. Uma vez que mudanças da cobertura do solo não foram consideradas, mais incertezas foram adicionadas ao modelo.

Outra limitação observada e que acrescentou tempo considerável ao pré-processamento de dados para a simulação (rapidamente abordada no item 2.6), diz respeito à diversidade de parâmetros requeridos e dificuldade de utilizar o banco de dados integrado ao SWAT. Sabe-se que uma grande porção desse banco de dados, por ser referente a informações disponíveis nos EUA, não é adequada para o contexto brasileiro. Isso foi percebido principalmente no que tange aos parâmetros dos solos. Observou-se que cada país utiliza um sistema de classificação dos solos diferente, que focaliza diferentes aspectos. Isso dificulta o enquadramento dos solos brasileiros nas bases integradas ao SWAT. Foi necessário recorrer a funções de pedo-transferência para o cálculo dos parâmetros. Ressalta-se a grande utilização dessas funções em estudos no Brasil, o que já é um indício da limitação citada no país.

Além das diferenças nas metodologias de classificação dos solos, cada país apresenta diferenças quanto aos tipos de vegetação nativa. Assim, a forma encontrada para avançar na modelagem da bacia foi estabelecer, para cada fitofisionomia presente no mapa de uso e cobertura do solo inserido, um tipo de vegetação da base de dados do SWAT que apresentasse características visuais mais próximas. Outra perspectiva é referente ao módulo específico para operação e caracterização do reservatório. Alguns dos parâmetros requeridos não estavam disponíveis nem mesmo nas bases da empresa responsável pelo reservatório.

Tendo em vista todos os dados não disponíveis ou inadequados, que demandaram algum pré-processamento para o emprego na presente dissertação, salientam-se as diferentes linguagens de programação (R, Python), programas (QGIS, SWAT-CUP, Rstudio, CMHyd, planilhas macro no Excel) e plataformas (Google *Collaboratory*) utilizadas. Para cada novo mecanismo aplicado, um período de aprendizagem foi necessário. Apesar do grande aprendizado possibilitado pela experiência em novas ferramentas, isso gera dificuldades, sobretudo relacionadas a limitações de tempo.

O SWAT utiliza dezenas de parâmetros para a modelagem da vazão de uma bacia hidrográfica. Na presente pesquisa, através da literatura, optou-se pela seleção prévia de um conjunto de parâmetros a serem considerados para o processo de calibração da vazão. A partir

desses, apenas uma análise de sensibilidade, considerando toda a bacia estudada, foi realizada. Isso foi feito para reduzir tempo de processamento. Para outros trabalhos, sugere-se que outros parâmetros sejam considerados e que, para cada região selecionada para a calibração (no caso da calibração *multi-site*) uma análise de sensibilidade seja feita a fim de que melhores resultados possam ser obtidos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, através do uso do modelo hidrológico SWAT e do software SWAT-CUP foi possível simular a vazão mensal histórica da Bacia do Reservatório de Nova Ponte. A partir disso, as projeções de mudanças climáticas para curto e médio prazo, provenientes de dois modelos de sistema terrestre integrantes do CMIP6, puderam ser aplicadas.

O método de calibração e validação *multi-site* de grandes regiões da bacia, associado a uma validação cruzada de áreas menores, que não haviam sido empregadas na calibração, gerou resultados satisfatórios. A execução desse procedimento foi benéfica uma vez que permitiu a utilização de todos os dados de vazão histórica disponíveis, sem que todas as áreas precisassem ser calibradas, poupando tempo nessa etapa do trabalho.

Os resultados obtidos a partir da modelagem hidrológica com cenários de mudanças do clima refutaram a hipótese inicial da pesquisa, na qual uma redução da vazão mensal devido às mudanças climáticas era esperada. Tanto no cenário intermediário de emissões de GEEs quanto no cenário de emissões extremas, as predições indicaram aumento na vazão média afluente mensal do Reservatório de Nova Ponte, assim como uma maior variação dos dados, com possível aumento na ocorrência de vazões afluentes extremas. Foi possível ainda observar maiores variações de vazão afluente mensal nos meses mais úmidos do ano (de outubro a março) que nos meses mais secos (de abril a setembro).

Esses resultados podem auxiliar no planejamento de ações para mitigar possíveis impactos das mudanças climáticas na vazão da bacia estudada, principalmente com foco na vazão afluente ao Reservatório de Nova Ponte. Para isso, ressalta-se a importância de considerar as incertezas da modelagem. A aplicação de outros cenários de mudanças climáticas também seria oportuna, de forma a abranger um maior número de possibilidades futuras.

No geral, esta pesquisa pode servir como base para a realização de outros trabalhos na bacia estudada ou bacias com características semelhantes, com diferentes dados, modelos hidrológicos e climáticos, bem como outros cenários. Além disso, dado a grande quantidade de informações levantadas sobre a bacia, esse estudo pode auxiliar outros trabalhos não somente em modelagem, mas também na análise do sistema estudado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K. **SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual**. Dübendorf: Eawag, 2015.
- ABBASPOUR, K. C. **User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs**. Dubendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, EAWAG, 2007.
- ABBASPOUR, K. C. et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, n. 2–4, p. 413–430, fev. 2007.
- ABBASPOUR, K. C. et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733–752, maio 2015.
- ABBASPOUR, K. C. The fallacy in the use of the “best-fit” solution in hydrologic modeling. **Science of the Total Environment**, v. 802, p. 149713, 2022.
- ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, C. A.; VAN GENUCHTEN, M. T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 4, p. 1340–1352, nov. 2004.
- ABBASPOUR, K. C.; VAGHEFI, S. A.; SRINIVASAN, R. A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: A review of papers from the 2016 international SWAT conference. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 1, 2017.
- ABBOT, M.; REFSGAARD, J. C. **Distributed Hydrological Modelling**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. v. 22
- AKPOTI, K.; ANTWI, E. O.; KABO-BAH, A. Impacts of rainfall variability, land use and land cover change on stream flow of the Black Volta basin, West Africa. **Hydrology**, v. 3, p. 26, 4 jul. 2016.
- ALMEIDA, A. L. S. P. **Gestão Dos Recursos Hídricos Na Bacia Do Rio Das Velhas: Como Podem Os Modelos Hidrológicos Distribuídos Subsidiar O Planejamento?** [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- ALVARENGA, L. A. et al. Hydrological responses to climate changes in a headwater watershed. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 6, p. 647–657, dez. 2016.
- ALVARENGA, L. A. et al. Hydrological simulation with SWAT and VIC Models in the Verde River Watershed, Minas Gerais. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 15, n. 4, p. 10, 6 jul. 2020.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANA. **Mudanças climáticas e recursos hídricos: Avaliações e diretrizes para adaptação**. Brasília: ANA, GGES, 2016.
- ANA. **Massa d’água: Região hidrográfica do Paraná**. Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/2463af8a0a3e44feb1df5905cb2bfe07_0?geometry=-48.410%2C-19.445%2C-46.557%2C-18.991>. Acesso em: 19 maio. 2021.
- ANA. **Portal Hidroweb**, 2020. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 12 dez. 2020
- ANA. **Dados de operação dos reservatórios SIN**. Disponível em:

<<https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>>. Acesso em: 19 jun. 2022.

ANDRADE, C. W. L. DE et al. Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo SWAT em uma sub-bacia da Região Nordeste, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, p. 440–453, 2017.

ARACRI, L. A. DOS S.; AMARAL, G. M. DE O.; LOURENÇO, T. C. M. A Expansão do Cultivo da Soja e as Transformações do Espaço Agrário no Cerrado Mineiro. **Revista de Geografia**, v. 2, n. 1, p. 1–9, 2011.

ARNOLD, J. G. et al. Automated base flow separation and recession analysis techniques. **Ground Water**, v. 33, n. 6, p. 1010–1018, nov. 1995.

ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, fev. 1998.

ARNOLD, J. G. et al. SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012a.

ARNOLD, J. G. et al. **SWAT Input/Output File Documentation: Version 2012**. Forney: Texas Water Resources Institute, 2012b.

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 35, n. 2, p. 411–424, abr. 1999.

ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 3, p. 563–572, 28 fev. 2005.

ARTEAGA, Y. V. L. **Análise do Impacto das Mudanças Climáticas em Índices Climáticos Associados com a Variabilidade dos Regimes de Chuva e Vazão na Bacia do Rio São Francisco**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2019.

BECKER, A. Criteria for a hydrologically sound structuring of large scale land surface process models. In: O’KANE, J. P. (Ed.). **Advances in Theoretical Hydrology**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 1992. p. 97–111.

BECKERS, J.; SMERDON, B.; WILSON, M. **Review of hydrologic models for forest management and climate change applications in British Columbia and Alberta**. Kamloops: Forum for Research and Extension in Natural Resources, 2009.

BEHARRY, S. L. et al. Use of the SWAT model for estimating reservoir volume in the Upper Navet watershed in Trinidad. **Springer Nature Applied Sciences**, v. 3, n. 2, p. 1–13, 2021.

BESKOW, S. et al. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 14, p. 2567–2578, 25 out. 2016.

BEVEN, K. J. et al. Testing a physically-based flood forecasting model (Topmodel) for three U. K. catchments. **Journal of Hydrology**, v. 69, p. 119–143, 1984.

BEVEN, K. J. TOPMODEL : A critique. **Hydrological Processes**, v. 11, p. 1069–1085, 1997.

BEVEN, K. J. et al. A history of TOPMODEL. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, n. 2, p. 527–549, 2020.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d’appel variable de l’hydrologie du bassin versant. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43–69, mar. 1979.

BORAH, D. K.; BERA, M. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 6, p. 1553–1566, 2003.

BRASIL. **LEI Nº 9.433 DE 08 DE JANEIRO DE 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.** Diário Oficial [da] União, Brasília, DF, 1997.

BRASIL. **LEI Nº 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1966.** Diário Oficial [da] União, Brasília, DF, 2012.

BRASIL. **DECRETO Nº 8.892, DE 27 DE OUTUBRO DE 2016. Cria a Comissão Nacional para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** Diário Oficial [da] União, Brasília, DF, 2016.

BRASIL. **DECRETO Nº 10.179, DE 18 DE DEZEMBRO DE 2019. Declara a revogação, para os fins do disposto no art. 16 da Lei Complementar nº 95, de 26 de fevereiro de 1998, de decretos normativos.** Diário Oficial [da] União, Brasília, DF, 2019.

BREDA, J. P. F. et al. **Guia Prático de Código-Fonte: Rotinas do MGB.** [s.l.] Manual Técnico, HGE, IPH, UFRGS., 2020.

BRENNER, L. State of the planet. **International Journal of Applied Psychoanalytic Studies**, v. 16, n. 2, p. 90–99, 2019.

BRESSIANI, D. A. et al. A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1–27, 2015.

BRESSIANI, D. A. **Coping with hydrological risks through flooding risk index , complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting.** [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

BRIGHENTI, T. M. **Uso do modelo SWAT e modelos de clima na análise da disponibilidade hídrica: Um estudo com bacias de Santa Catarina.** [s.l.] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 53–64, 2016.

BUYTAERT, W. **Implementation of the Hydrological Model TOPMODEL in R**, 2018. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/topmodel/topmodel.pdf>>. Acesso em: 4 abr. 2021

CALDEIRA, T. L. et al. Modelagem Hidrológica Determinística Chuva-Vazão Em Bacias Hidrográficas: Uma Abordagem Introdutória. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 5, n. 1, p. 22, 2018.

CALLISTO, M. et al. **Série Peixe Vivo: Condições Ecológicas em Bacias Hidrográficas de Empreendimentos Hidrelétricos.** Belo Horizonte, MG: CEMIG, 2014.

CASTRO, K. B. DE. **Avaliação do modelo SWAT na simulação de vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada.** [s.l.] Instituto de Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, 2013.

CASTRO, C. V.; MAIDMENT, D. R. GIS preprocessing for rapid initialization of HEC-HMS

hydrological basin models using web-based data services. **Environmental Modelling and Software**, v. 130, p. 104732, ago. 2020.

CEMIG. **Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental - RADA**. Uberlândia, MG: Manna & Toledo, 2011.

CEMIG. **Relatório Anual 2019 da UHE Nova Ponte em Atendimento à Resolução Conjunta ANA ANEEL n 03/2010**. Belo Horizonte, MG, 2020.

CHARLEY, W. J. **HEC-RTS (Real-Time Simulation) version 2 for real time flood forecasting and water control**. 2nd Joint Federal Interagency Conference. **Anais...Las Vegas**: 2010

CHEN, Y. et al. Effects of irrigation on water and energy balances in the Heihe River basin using VIC model under different irrigation scenarios. **Science of the Total Environment**, v. 645, p. 1183–1193, 2018.

CHO, H. **Development of a GIS Hydrologic Modeling System by Using the Programming Interface of GRASS GIS**. Korea: Universidade Nacional de Kyungpook, 2001.

CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics**. McGraw-Hill, New York.: [s.n.].

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo, sP: Edgard Blücher, 236 p. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

CHU, X.; STEINMAN, A. Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 135, n. 1, p. 119–124, 2009.

CMIP6. **CMIP6 climate projections**. Disponível em: <<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6?tab=form>>. Acesso em: 23 jan. 2022.

COLLISCHONN, B.; TUCCI, C. Relações regionais entre precipitação e evapotranspiração mensais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 3, p. 205–214, 2014.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

COLLISCHONN, W. et al. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878–895, 2007.

COLLISCHONN, W. et al. **Manual de Referência Teórica do MGB**. Porto Alegre: HGE, IPH, UFRGS., 2020.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 95–118, 2001.

COMTOIS, D. **summarytools: Tools to quickly and neatly summarize data. R package**, 2021. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=summarytools>>

CPRM. **Mapa de declividade em percentual do relevo brasileiro**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Gestao-Territorial/Mapa-de-Declividade-em-Percentual-do-Relevo-Brasileiro-3497.html>>. Acesso em: 2 jun. 2021.

CRAWFORD, N. H.; BURGESS, S. J. History of the Stanford Watershed Model. **Water Resources Impact**, v. 6, n. 2, p. 3–6, 2004.

CRAWFORD, N. H.; LINSLEY, R. K. **Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV**. Technical Report No 39, Palo Alto, CA: Department of Civil Engineering, Stanford University, 1966.

CRIPPEN, R. et al. NASADEM global elevation model: Methods and progress. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLI-B4, p. 125–128, 13 jun. 2016.

CUNHA, S. et al. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia /Evaluation of the SCS method for effective rainfall and flood hydrograph estimation. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 837–848, 2015.

DANG, T. D.; CHOWDHURY, A. F. M. K.; GALELLI, S. On the representation of water reservoir storage and operations in large-scale hydrological models: implications on model parameterization and climate change impact assessments. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 1, p. 397–416, 24 jan. 2020.

DE JONG, P. et al. Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. **Science of the Total Environment**, v. 634, p. 1540–1553, 2018.

DEVI, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001–1007, 2015.

DHI. **Mike 2021 download**. Disponível em:

<<https://www.mikepoweredbydhi.com/download/mike-2021>>. Acesso em: 4 abr. 2021.

DIAS, V. DE S. et al. Historical streamflow series analysis applied to furnas HPP reservoir watershed using the SWAT model. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 4, p. 1–13, 2018.

DONIGIAN JR, A. S.; IMHOFF, J. C. History and Evolution of Watershed Modeling Derived from the Stanford Watershed Model. In: SINGH, V. P.; FREVERT, D. K. (Eds.). . **Watershed Models**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. p. 21–45.

DOOGE, J. C. I. Scale problems in hydrology. In: **Reflections on Hydrology: Science and Practice**. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1997. v. 48p. 84–145.

EDWARDS, P. N. History of climate modeling. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 2, n. 1, p. 128–139, 2011.

EMBRAPA. **Sistema de Informação de Solos Brasileiros**. Disponível em:

<<https://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>>. Acesso em: 28 set. 2021.

EPE. **Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo: Documento de Apoio ao PNE 2050**. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

EPE. **Balço Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Rio de Janeiro: EPE, 2020.

ESPINDOLA, H. S.; NODARI, E. S.; SANTOS, M. A. DOS. Rio Doce: riscos e incertezas a partir do desastre de Mariana (MG). **Revista Brasileira de História**, v. 39, n. 81, p. 141–162, ago. 2019.

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

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com sistema de informação geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 243–254, 2014.

FELDMAN, A. D. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference**

- Manual.** Davis: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000.
- FELIX, V. S.; PAZ, A. R. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 3, p. 556–569, set. 2016.
- FERREIRA, R. S.; UAGODA, R. E. S. Análise da predição do balanço hídrico da bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 3, p. 880–893, 2017.
- FICKLIN, D. L. et al. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 374, p. 16–29, jul. 2009.
- FLATO, G. et al. Evaluation of climate models. In: **Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. p. 741–866.
- FLEISCHMANN, A. S. et al. **Desenvolvimento do módulo de reservatórios do modelo hidrológico MGB-IPH**. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** Brasília: ABRH, 2015
- FONSECA, I. F. DA; BURSZTYN, M.; MOURA, A. M. M. DE. Conhecimentos técnicos, políticas públicas e participação: o caso do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama). **Revista de Sociologia e Política**, v. 20, n. 42, p. 183–198, 2012.
- FRANCHINI, M. et al. Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v. 175, p. 293–338, 1996.
- FREITAS, M. A. V.; SOITO, J. L. S. S. Energia e recursos hídricos. **Parcerias Estratégicas**, n. 27, p. 177–217, 2008.
- FSF. **GNU General Public License, version 2**. Disponível em: <<https://www.gnu.org/licenses/old-licenses/gpl-2.0.html>>. Acesso em: 5 abr. 2021.
- FUJITA, T. **Calibração e validação de um modelo hidrológico para a Bacia Do Rio Ivaí**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- GASSMAN, P. W. et al. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 1211–1250, 2007.
- GOLDEMBERG, J. Energia e sustentabilidade. **Revista de Cultura e Extensão USP**, n. 14, p. 33–43, 2015.
- GOLMOHAMMADI, G. et al. Evaluating three hydrological distributed watershed models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. **Hydrology**, v. 1, n. 1, p. 20–39, 2014.
- GREEN, C. H.; VAN GRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. **Environmental Modelling and Software**, v. 23, p. 422–434, 2008.
- GT AGENDA 2030. VI Relatório Luz da Sociedade Civil Sustentável de Desenvolvimento da Agenda 2030 Brasil. 2022.
- GUPTA, A.; GOVINDARAJU, R. S. Propagation of structural uncertainty in watershed hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 575, n. March, p. 66–81, 2019.
- HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. Models, paradigms and the new Geography. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (Eds.). **Models in Geography**. Londres: Methuen e Co.,

1967. p. 19–41.

HAIDER, H. et al. Appraisal of climate change and its impact on water resources of Pakistan: A case study of mangla watershed. **Atmosphere**, v. 11, n. 10, 2020.

HALWATURA, D.; NAJIM, M. M. M. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. **Environmental Modelling and Software**, v. 46, p. 155–162, 2013.

HAMMAN, J. J. et al. The variable infiltration capacity model version 5 (VIC-5): Infrastructure improvements for new applications and reproducibility. **Geoscientific Model Development**, v. 11, n. 8, p. 3481–3496, 2018.

HARGREAVES, G. L.; HARGREAVES, G. H.; RILEY, J. P. Agricultural benefits for Senegal River Basin. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 111, n. 2, p. 113–124, jun. 1985.

HEAVENS, N. G.; WARD, D. S.; MAHOWALD, N. M. Studying and Projecting Climate Change with Earth System Models. **Nature Education Knowledge**, v. 4, n. 5, p. 4, 2013.

HGE. **MGB: Fórum**. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/mgb/forum/>>. Acesso em: 5 abr. 2021.

HOLANDA, C. E. F. DE. **Avaliação do desempenho estatístico dos algoritmos de classificação Random Forest (RF), Decision Tree (DT) e Support Vector Machine (SVM) para imagens de satélite com diferentes cubos de dados: estudo de caso no bioma cerrado** Belo Horizonte, MGDissertation (Master's degree in Geography). Federal University of Minas Gerais, , 2021.

HONAKER, J.; KING, G.; BLACKWELL, M. Amelia II: A program for missing data. **Journal of Statistical Software**, v. 45, n. 7, p. 1–47, 2011.

HÖRMANN, G. et al. Using a simple model as a tool to parameterise the SWAT model of the Xiangxi river in China. **Quaternary International**, v. 208, p. 116–120, 2009.

IBGE. **Mapeamento de Recursos Naturais do Brasil: Escala 1:250.000**. Rio de Janeiro, RJ, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>>. Acesso em: 21 maio. 2020

IBGE. **Malha Municipal**. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.].

IBGE. **Macrocaracterização dos recursos naturais do Brasil: províncias estruturais, compartimentos de relevo, tipos de solos, regiões fitoecológicas e outras áreas**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2019b.

IBGE; MMA. **Limites dos biomas do Brasil**. Disponível em: <<https://maps.csr.ufmg.br/>>. Acesso em: 6 fev. 2021.

IGAM. **Hidrografia**. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/banco-de-noticias/1-ultimasnoticias/1312-hidrografia>>. Acesso em: 19 maio. 2021.

INMET. **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**, 2020. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 16 fev. 2021

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

IPCC. Summary for Policymakers. In: **Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global**

greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. Geneva, Switzerland: [s.n.]. p. 27.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. [s.l.: s.n.].

IPCC. Sixth Assessment Report. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>>.

IPEA. Agenda 2030: ODS - Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. [s.l.: s.n.].

JALLIFFIER-VERNE, I. et al. Impacts of global change on the concentrations and dilution of combined sewer overflows in a drinking water source. **Science of the Total Environment**, v. 508, p. 462–476, 2015.

JAMES, D.; HORNIK, K. **chron: Chronological Objects which Can Handle Dates and Times. R package version 2.3-56.**, 2020. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=chron>>

JOVINO, E. S. et al. Impactos do uso e cobertura do solo na produção de sedimentos em área de manancial peri-urbano tropical. **Sociedade & Natureza**, v. 34, n. 1, p. 1–16, 21 jun. 2022.

KLAAS, D. K. S. Y. et al. Assessing climate changes impacts on tropical karst catchment: Implications on groundwater resource sustainability and management strategies. **Journal of Hydrology**, v. 582, p. 124426, 2020.

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal**, v. 31, n. 1, p. 13–24, mar. 1986.

KUNDZEWICZ, Z. W. et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources. **Environmental Science e Policy**, v. 79, p. 1–8, jan. 2018.

LAPRISE, R. Regional climate modelling. **Journal of Computational Physics**, v. 227, n. 7, p. 3641–3666, 2008.

LELIS, T. A. et al. Impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: Simulação de cenários. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 6, n. 2, p. 282–294, 31 ago. 2011.

LENTON, T. M. et al. Climate tipping points — too risky to bet against. **Nature**, v. 575, p. 592–595, 28 nov. 2019.

LEWIS, S. L.; MASLIN, M. A. Defining the Anthropocene. **Nature**, v. 519, p. 171–180, 11 mar. 2015.

LIANG, X. et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D7, p. 14415–14428, 1994.

LIMA, H. R. **No caminho das águas: Territórios em risco à jusante da Hidrelétrica Nova Ponte, no rio Araguari, Minas Gerais.** [s.l.] Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

LONDE, L. R. et al. Desastres relacionados à água no Brasil: Perspectivas e recomendações. **Ambiente & Sociedade**, n. 4, p. 133–152, 2014.

LOUZADA, V. M.; RIBEIRO, C. B. DE M. Impacts of land-use change on southeast Amazonia basin streamflow. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 14, n. 2, p. 1, 19 mar. 2019.

- MA, L. et al. MIKE SHE modeling of ecohydrological processes: Merits, applications, and challenges. **Ecological Engineering**, v. 96, n. 2016, p. 137–149, nov. 2016.
- MAGILLIGAN, F. J.; NISLOW, K. H. Changes in hydrologic regime by dams. **Geomorphology**, v. 71, n. 1–2, p. 61–78, 2005.
- MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. **Parcerias Estratégicas**, n. 27, 2008.
- MARHAENTO, H. et al. Attribution of changes in the water balance of a tropical catchment to land use change using the SWAT model. **Hydrological Processes**, v. 31, p. 2029–2040, 2017.
- MARINHO-FILHO, G. M. et al. Modelos hidrológicos: Conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35–47, 2012.
- MAROTZKE, J. et al. Climate research must sharpen its view. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 2, p. 89–91, 16 fev. 2017.
- MARTINS, R. D.; FERREIRA, L. DA C. Uma revisão crítica sobre cidades e mudança climática: vinho velho em garrafa nova ou um novo paradigma de ação para a governança local? **Revista de Administração Pública**, v. 45, n. 3, p. 611–641, 2011.
- MCCARTHY, G. T. **The Unit Hydrograph and Flood Routing**. [s.l.] U.S. Corps Eng, Providence, R.I, 1939.
- MEDEIROS, M. S. et al. **Manual de exemplo de aplicação do modelo MGB 2018 utilizando o IPH-Hydro Tools**. Porto Alegre: IPH-UFRGS, 2019.
- MEDEIROS, P. R. P. et al. Changes in nutrient loads (N, P and Si) in the São Francisco estuary after the construction of dams. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 54, n. 4, p. 387–397, 2011.
- MELLO, K. DE et al. Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 270, n. May, p. 110879, 2020.
- MIGLIACCIO, K. W.; CHAUBEY, I. Comment on Cao W, Bowden BW, Davie T, Fenemor A. 2006. ‘Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability.’ **Hydrological Processes** 20(5): 1057–1073. **Hydrological Processes**, v. 21, p. 3226–3228, 2007.
- MINAS GERAIS. **Decreto nº 39.912, de 22 de setembro de 1998. Institui o comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Araguaí e dá outras providências**. Diário [do] Executivo, Belo Horizonte, MG, 1998.
- MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service Curve Number. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 7, p. 1291–1313, 2004.
- MOGES, E. et al. Review: Sources of hydrological model uncertainties and advances in their analysis. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 1, p. 1–23, 2021.
- MOREIRA, L. L.; SCHWAMBACK, D.; RIGO, D. Sensitivity analysis of the Soil and Water Assessment Tools (SWAT) model in streamflow modeling in a rural river basin. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 13, n. 6, p. 1, 9 nov. 2018.
- MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

- MUHAMMAD, A. et al. Climate change impacts on reservoir inflow in the Prairie Pothole Region: A watershed model analysis. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 1, p. 1–18, 2020.
- NARASIMHAN, B.; DHANESH, Y. **Excel template to calculate SWAT soil parameters using the Pedo Transfer Function (PTF)**, 2012.
- NASA JPL. **NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001**. Disponível em: <[https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules/collection-details?p=C1546314043-LPDAAC_ECS&pg\[0\]\[gsk\]=-start_date&q=nasadem&tl=1624469479.181!3!!](https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules/collection-details?p=C1546314043-LPDAAC_ECS&pg[0][gsk]=-start_date&q=nasadem&tl=1624469479.181!3!!)>. Acesso em: 22 jun. 2021.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.
- NEITSCH, S. L. et al. **Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Versão 2009**. Temple: Texas Water Resources Institute, 2011.
- NOBRE, C. Mudanças climáticas globais : Possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias Estratégicas**, v. 12, p. 239–258, 2001.
- NOBRE, C. A.; REID, J.; VEIGA, A. P. S. **Fundamentos Científicos das Mudanças Climáticas**. São José dos Campos, SP: Rede Clima/Inpe, 2012.
- NORATO, H. G.; DUARTE, A. R. Uma proposta para a detecção do adequado período de aquecimento em modelos de simulação. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 6, n. 4, p. 11–26, 2011.
- NUNES, G.; MINOTI, R. T.; KOIDE, S. Mathematical modeling of watersheds as a subsidy for reservoir water balance determination: The case of paranoá lake, Federal District, Brazil. **Hydrology**, v. 7, n. 4, p. 1–30, 2020.
- O'NEILL, B. C. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, p. 3461–3482, 2016.
- OLIVEIRA, R. F. et al. Hydrological calibration and validation of the MGB-IPH model for water resource management in the upper Teles Pires River basin in the Amazon-Cerrado ecotone in Brazil. **Acta Amazonica**, v. 49, n. 1, p. 54–63, mar. 2019.
- OLIVEIRA, V. A. et al. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 5005–5023, dez. 2017.
- OLIVEIRA, W. F. **Modelagem do Regime Hidrológico das Bacias do Rio Piracicaba e do Alto Rio São Francisco no Clima Futuro**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós- Graduação em Ciências Climáticas. Natal, 2022.
- ONO, G. M. **Monitoramento e Análise da Sedimentação no Reservatório Passaúna - PR**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental, 2020.
- ONS. **O Sistema Interligado Nacional**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 5 jul. 2021.
- OOMS, J. **writexl: Export Data Frames to Excel “xlsx” Format. R package version 1.4.0.**, 2021. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=writexl%0A>>
- OUÉDRAOGO, W. A. A.; RAUDE, J. M.; GATHENYA, J. M. Continuous modeling of the Mkurumudzi River catchment in Kenya using the HEC-HMS conceptual model: Calibration,

validation, model performance evaluation and sensitivity analysis. **Hydrology**, v. 5, n. 3, 2018.

PBMC. **Capítulo 8 Avaliação de Modelos Globais e Regionais Climáticos**. [s.l.: s.n.]. v. 1

PBMC. **Mudanças Climáticas e Cidades: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro, RJ: PBMC, COPPE – UFRJ, 2016.

PEDROSA, A. S.; SOUZA, R. C. M. As unidades de paisagem no Triângulo Mineiro: “Desaparecimento” da paisagem Cerrado. **Caderno de Geografia**, v. 24, n. 1, p. 13–26, 2014.

PEIXOTO, R. DE A. O. **Estudo do Transporte de Sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão - UPGRH-PN 1**. [s.l.] Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

PEREIRA, A. L. S.; MACEDO, D. R. Análise de métodos de interpolação para o mapeamento da precipitação na bacia do reservatório de Nova Ponte/MG. **Cadernos do Leste**, v. 17, n. 17, p. 34–45, 2017.

PEREIRA, H. M. et al. **Ecosistemas e Bem-Estar Humano: Avaliação para Portugal do Millennium Ecosystem Assessment**. Lisboa: Escolar Editora, 2009.

PIERCE, D. **ncdf4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files. R package version 1.19**, 2021. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=ncdf4>>

PONTES, P. R. M. et al. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888–904, 2015.

PONTES, P. R. M. et al. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling and Software**, v. 94, p. 1–20, 2017.

QIN, P. et al. Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation. **Journal of Hydrology**, v. 580, n. November 2018, 2020.

QIU, J. et al. Evaluating the performance of conservation practices under climate change scenarios in the Miyun Reservoir Watershed, China. **Ecological Engineering**, v. 143, p. 105700, jan. 2020.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing, , 2021. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>

RANDERS, J.; GOLUKE, U. An earth system model shows self-sustained melting of permafrost even if all man-made GHG emissions stop in 2020. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2020.

RATHJENS, H. et al. CMhyd User Manual Documentation for Preparing Simulated Climate Change Data for Hydrologic Impact Studies. 2016.

RAULINO, J. B. S.; SILVEIRA, C. S.; LIMA NETO, I. E. Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality of large semi-arid reservoirs in Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 66, n. 8, p. 1321–1336, 2021.

RAZAD, A. Z. et al. Future impacts of climate change on sediment influx rate in hydropower reservoir using SWAT. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 880, n. 1, 2021.

REFSGAARD, J. C.; STORM, B. MIKE SHE. In: SINGH, V. P. (Ed.). . **Computer Models of Watershed Hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995. p. 809–846.

REFSGAARD, J. C.; STORM, B.; CLAUSEN, T. Système Hydrologique Européen (SHE): review and perspectives after 30 years development in distributed physically-based hydrological modelling. **Hydrology Research**, v. 41, n. 5, p. 355–377, 1 out. 2010.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. DE; RIBEIRO, J. F. (Eds.). . **Cerrado: Ecologia e Flora**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 152–212.

RICHARDSON, C. W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. **Water Resources Research**, v. 17, n. 1, p. 182–190, 1981.

RIPPLE, W. J. et al. World scientists' warning of a climate emergency 2021. **BioScience**, v. 71, n. 9, p. 894–898, 2021.

ROHLI, R. V.; VEGA, A. J. **Climatology**. 4. ed. Burlington: Jones & Bartlett Learning, 2018.

ROMA, J. C. Os objetivos de desenvolvimento do milênio e sua transição para os objetivos de desenvolvimento sustentável. **Ciência e Cultura**, v. 71, n. 1, p. 33–39, 2019.

ROTAVA, J.; BRESSIANI, D. A. **Scripts em Python para Processamento de Dados e Interpolação para o formato do Soil and Water Assessment Tool.**, 2020. Disponível em: <<https://github.com/SWAT-Brasil/util/>>

RUDDIMAN, W. F. The Anthropocene. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 41, p. 45–68, 30 maio 2013.

SÁ JÚNIOR, A. **Aplicação da Classificação de Köppen para o Zoneamento Climático do Estado de Minas Gerais**. [s.l.] Universidade Federal de Lavras, 2009.

SALLA, M. R. et al. **Variabilidade em produção de energia hidrelétrica na Bacia hidrográfica do Rio Araguari , Minas Gerais**. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...**Bento Gonçalves, RS: ABRH, 2013

SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. DA S. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, n. 103, p. 41, 2014.

SÁNCHEZ, L. et al. **Os impactos do rompimento da Barragem de Fundão: o caminho para uma mitigação sustentável e resiliente**. Relatório ed. Glande, Suíça: UICN, 2018.

SANDU, M. A.; VIRSTA, A. Applicability of MIKE SHE to Simulate Hydrology in Argesel River Catchment. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 6, p. 517–524, 2015.

SANTOS, C. et al. Using a hydrologic model to assess the performance of regional climate models in a semi-arid watershed in Brazil. **Water**, v. 11, p. 17, 18 jan. 2019.

SANTOS, F. M. DOS; OLIVEIRA, R. P. DE; LOLLO, J. A. DI. Effects of Land Use Changes on Streamflow and Sediment Yield in Atibaia River Basin—SP, Brazil. **Water**, v. 12, n. 6, 16 jun. 2020.

SANTOS, H. F. Modernização da agricultura e dinâmica do agronegócio globalizado no Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. **Geografia em Questão**, v. 12, n. 1, p. 9–36, 2019.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005.

- SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 1569–1578, set. 2006.
- SAYÃO, L. F.; SALES, L. F. Dados abertos de pesquisa: ampliando o conceito de acesso livre. **RECIIS – Rev. Eletron. de Comun. Inf. Inov. Saúde**, v. 8, n. 2, p. 76–92, 2014.
- SCANTIMBURGO, A. Economia reprimarizada e desmonte do regime regulatório ambiental no governo bolsonaro. **Revista do Instituto de Estudos Econômicos e Internacionais**, p. 67–79, 2022.
- SCHARFFENBERG, W. **Hydrologic Modeling System HEC HMS User's Manual: Version 4.2**. Davis: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2016.
- SÉFÉRIAN, R. et al. Development and evaluation of CNRM Earth system model-CNRM-ESM1. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 4, p. 1423–1453, 2016.
- SÉFÉRIAN, R. et al. Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth System Processes in Present-Day and Future Climate. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 12, p. 4182–4227, 2019.
- SEMENOVA, O.; BEVEN, K. Barriers to progress in distributed hydrological modelling. **Hydrological Processes**, v. 29, p. 2074–2078, 15 abr. 2015.
- SHEPHERD, T. G. Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections. **Nature Geoscience**, v. 7, n. 10, p. 703–708, 21 out. 2014.
- SILVA, A. K. L. et al. Estimation of sediment production in oil palm expansion areas in the Amazon. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 344–348, 2018a.
- SILVA, A. M. **Análise de Múltiplos Cenários Futuros Climáticos e de uso e Cobertura da Terra na Estimativa de Vazões na Bacia do Rio Salgado, Semiárido Nordeste**. [s.l.] Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, 2019.
- SILVA, C. G. T. Análise dos projetos para a redução dos riscos de desastres ambientais efetivados pelo governo federal entre 2011 e 2015 e daqueles que estão atualmente em atividade / Analysis of projects to reduce the risks of environmental disasters effective by the fe. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 5, n. 2, p. 1775–1798, 26 abr. 2022.
- SILVA, M. V. M. et al. Projection of climate change and consumptive demands projections impacts on hydropower generation in the Sao Francisco river basin, Brazil. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 3, 2021.
- SILVA, N. D. M.; CHRISTOFARO, C. Calibração do modelo hidrológico SWAT para estimativa da vazão em sub-bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha. **Revista Geografias**, p. 31–39, 2017.
- SILVA, R. M. et al. Hydrological simulation in a tropical humid basin in the cerrado biome using the SWAT model. **Hydrology Research**, v. 49, n. 3, p. 908–923, 2018b.
- SILVA, R. M.; MEDEIROS, I. C. Análise Hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT. **GeoFocus**, n. 14, p. 211–231, 2014.
- SILVA, R. V.; KOBAYAMA, M. TOPMODEL: Teoria integrada e revisão. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, n. 14, p. 97–110, 31 dez. 2007.
- SINGH, V. P.; FREVERT, D. K. **Watershed Models**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.

SIQUEIRA, P. P. et al. Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 37, n. September, p. 100931, 2021.

SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos**. Belo Horizonte, MG, 2019. Disponível em: <<http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>>. Acesso em: 16 fev. 2020

SMF. **MIKE Powered By DHI Forum**. Disponível em: <<http://forum.mikebydhi.com/>>. Acesso em: 5 abr. 2021.

SOARES, M. R. G. DE J. et al. Potencial de retenção de águas pluviais pelo método “Curve Number”. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 3, p. 476–485, 2014.

SODRÉ, F. F. Fontes Difusas de Poluição da Água: Características e métodos de controle. **Artigos Temáticos do AQQUA**, v. 1, p. 9–16, 2012.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. **Water Resources Bulletin**, v. 30, n. 3, p. 453–462, 1994.

STEINMETZ, A. A. **Impacto das Mudanças Climáticas sobre as Vazões em Bacias Hidrográficas do Pampa Brasileiro**. [s.l.] Universidade de Pelotas, 2020.

STRAUCH, M.; VOLK, M. SWAT plant growth modification for improved modeling of perennial vegetation in the tropics. **Ecological Modelling**, v. 269, p. 98–112, 2013.

TAMU. **Software and Data Tools**. Disponível em: <<https://swat.tamu.edu/>>. Acesso em: 6 abr. 2021a.

TAMU. **SWAT User Groups**. Disponível em: <<https://swat.tamu.edu/support/>>. Acesso em: 5 abr. 2021b.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, p. 12–29, ago. 2012.

TODINI, E. The ARNO rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, v. 175, p. 339–382, 1996.

TRENBERTH, K. E. Climate change caused by human activities is happening and it already has major consequences. **Journal of Energy and Natural Resources Law**, v. 36, n. 4, p. 463–481, 2018.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. DE S.; LAURENT, F. Definição das unidades de resposta hidrológica na Bacia Hidrográfica do rio Santa Maria- RS. **Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 84, p. 269–284, 15 dez. 2021.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed. [s.l.] UFRGS - ABRH, 2020.

TUCCI, C. W. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: Problemas e soluções. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 7–16, 2008.

UHLÉNBRÖCK, S.; ROSER, S.; TILCH, N. Hydrological process representation at the meso-scale: The potential of a distributed, conceptual catchment model. **Journal of Hydrology**, v. 291, p. 278–296, 2004.

UN. **General Assembly. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/Res/70/1, Resolution adopted by the General Assembly on 25**

September 2015, 2015.

UNESCO; UN-WATER. **United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change**. Paris: UNESCO, 2020.

USACE. **HEC-HMS User's Manual: Version 4.8**. Davis: Hydrologic Engineering Center, 2021a.

USACE. **Reservoir Simulation (HEC-ResSim)**. Disponível em: <[https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rtsdocs/rtsm/latest/using-hec-rts-overview/running-forecast-models#RunningForecastModels-ReservoirSimulation\(HEC-ResSim\)worddav66cdb37f378f2a802c257bcfb215df7c.png3534](https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rtsdocs/rtsm/latest/using-hec-rts-overview/running-forecast-models#RunningForecastModels-ReservoirSimulation(HEC-ResSim)worddav66cdb37f378f2a802c257bcfb215df7c.png3534)>. Acesso em: 5 abr. 2021b.

USACE. **Downloads**. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx>>. Acesso em: 4 abr. 2021c.

USDA SCS. Section 4: Hydrology. In: **National Engineering Handbook**. Washington, D.C.: U.S. Gov. Print. Office, 1972.

USEPA. **Hydrological Simulation Program - FORTRAN (HSPF)**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ceam/hydrological-simulation-program-fortran-hspf>>. Acesso em: 4 abr. 2021.

USEPA. **BASINS Plugins: Watershed Model plug-ins**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ceam/basins-plugins>>. Acesso em: 18 fev. 2020a.

USEPA. **BASINS User Information and Guidance**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ceam/basins-user-information-and-guidance>>. Acesso em: 4 abr. 2021b.

UW. **VIC Model User Guide**. Disponível em: <<https://vic.readthedocs.io/en/master/Documentation/UserGuide/>>. Acesso em: 19 maio. 2021.

UW. **Discussion group for those using the VIC model**. Disponível em: <https://mailman13.u.washington.edu/mailman/listinfo/vic_users>. Acesso em: 5 abr. 2021.

VAN VLIET, M. T. H. et al. Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 4, p. 375–380, 2016.

VIJI, R.; PRASANNA, P. R.; ILANGO VAN, R. Gis based SCS - CN method for estimating runoff in Kundahpalam watershed, Nilgries District, Tamilnadu. **Earth Sciences Research Journal**, v. 19, n. 1, p. 59–64, 2015.

VONO, V. **Efeitos da implantação de duas barragens sobre a estrutura da comunidade de peixes do rio Araguari (Bacia do Alto Paraná, MG)**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

WANG, Y. et al. A diagnostic decision support system for BMP selection in small urban watershed. **Water Resources Management**, v. 31, p. 1649–1664, 9 mar. 2017.

WANG, Y. et al. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: A Systemic Review. **Journal of Coastal Research**, v. 93, n. sp1, p. 22, 23 set. 2019.

WASSER WORLD. **HEC-HMS Users**. Disponível em: <<https://www.facebook.com/groups/hmsusers/>>. Acesso em: 19 maio. 2021.

WICKHAM, H. **tidyr: Tidy Messy Data. R package version 1.1.2.**, 2020. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=tidyr>>

WICKHAM, H. et al. **dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.0.2.**, 2020. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=dplyr>>

WICKHAM, H.; HESTER, J.; BRYAN, J. **readr: Read Rectangular Text Data. R package version 2.1.2.**, 2022. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=readr>>

WILLIAMS, J. R. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. **Transactions of the ASABE**, v. 12, 1969.

YUKIMOTO, S. et al. The meteorological research institute Earth system model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 97, n. 5, p. 931–965, 2019.

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R.; HAO, F. Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River Basin using the SWAT model. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 901–910, 2007.

ZORITA, E.; VON STORCH, H. The analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods. **Journal of Climate**, v. 12, n. 8 p. 2474–2489, 1999.