



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO HEC-RAS
PARA ESTIMATIVAS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO
CONSIDERANDO O CENÁRIO CLIMÁTICO FUTURO:
IMPLICAÇÕES PARA A RECUPERAÇÃO DO RIO
DOCE**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Hernan William Silva Chadud

**Itajubá, MG, Brasil
2024**

**APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO HEC-RAS PARA
ESTIMATIVAS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO
CONSIDERANDO O CENÁRIO CLIMÁTICO FUTURO:
IMPLICAÇÕES PARA A RECUPERAÇÃO DO RIO DOCE**

por

Hernan William Silva Chadud

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientador: Arcilan Trevenzoli Assireu
Coorientador: Samara Calçado de Azevedo

Itajubá, MG, Brasil
2024

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

**APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO HEC-RAS PARA
ESTIMATIVAS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO CONSIDERANDO O
CENÁRIO CLIMÁTICO FUTURO: IMPLICAÇÕES PARA A
RECUPERAÇÃO DO RIO DOCE**

elaborada por

Hernan William Silva Chadud

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



Arcilan Trevenzoli Assireu, Dr. (UNIFEI)
(Presidente/Orientador)

Documento assinado digitalmente



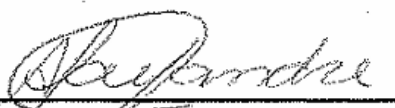
SAMARA CALCADO DE AZEVEDO
Data: 27/11/2024 15:24:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Samara Calcado de Azevedo, Dra. (UNIFEI)



ROGER RODRIGUES TORRES
Data: 27/11/2024 15:20:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Roger Rodrigues Torres, Dr. (UNIFEI)



Alexandre Germano Marciano, Dr. (UNIFEI)

Itajubá, 26 de dezembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder saúde e força para concluir este trabalho.

Aos meus pais, irmãos, demais familiares e namorada por todo apoio, carinho, incentivo e paciência durante estes anos.

Ao Prof. Arcilan por aceitar me orientar neste trabalho, confiar em mim e transmitir conhecimentos que foram fundamentais para a elaboração do mesmo.

Aos demais professores do curso de Ciências Atmosféricas da UNIFEI pela dedicação e paciência em compartilhar de seus conhecimentos ao longo do curso.

Aos meus amigos, por todo apoio, força, incentivo e companheirismo.

A todos que de certa forma contribuíram direta ou indiretamente para que este trabalho fosse possível.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO HEC-RAS PARA ESTIMATIVAS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO CONSIDERANDO O CENÁRIO CLIMÁTICO FUTURO: IMPLICAÇÕES PARA A RECUPERAÇÃO DO RIO DOCE.

AUTOR(A): HERNAN WILLIAM SILVA CHADUD
ORIENTADOR: ARCILAN TREVENZOLI ASSIREU
Local e Data da Defesa: Itajubá, 26 de dezembro de 2024.

O desastre de Mariana, ocorrido em 2015 com o rompimento da barragem de Fundão, liberou milhões de metros cúbicos de rejeitos na Bacia do Rio Doce, causando danos socioambientais severos. Esse evento ressaltou a necessidade de análises hidrodinâmicas precisas para prever e mitigar os impactos de desastres semelhantes. Neste contexto, a aplicação do modelo HEC-RAS, aliada à análise climatológica, se torna fundamental para estimar o regime de vazão e a mancha de inundação de eventos extremos sob cenários climáticos futuros. Este estudo foca na confluência dos rios Piranga e do Carmo, utilizando os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos climáticos MPI-ESM1-2-HR e IPSL-CM6A-LR para simular eventos extremos de vazão e alterações na dinâmica de escoamento. A integração de dados de terreno de alta resolução e séries climáticas de longo prazo, possibilita calibrar e validar o modelo com maior precisão. Os resultados auxiliam na elaboração de estratégias de mitigação de riscos, recuperação ambiental e proteção de comunidades locais vulneráveis.

Palavras-chave: HEC-RAS. MGB. Mudanças climáticas. Rio Doce. Mancha de inundação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bacia Hidrográfica do Rio Doce, área de estudo e municípios incluídos nela.....	5
Figura 2 - Fluxograma de aplicação do MGB-IPH. Fonte: Medeiros <i>et al.</i> (2019)	10
Figura 3 - Modelo Digital de Elevação da área de estudo.....	12
Figura 4 - Minibacias para a confluência dos rios Piranga e do Carmo na BHRD.....	12
Figura 5 - Estações fluviométricas utilizadas para a calibração do MGB-IPH.....	13
Figura 6 - Sub-bacias obtidas na área de estudo.....	14
Figura 7 - Modelo Digital de Terreno.	18
Figura 8 - Fluxograma do processo de simulação hidrodinâmica bidimensional no HEC-RAS. Fonte: MARCIANO, 2024.	20
Figura 9 - Comparação entre os hidrogramas dos dados históricos observados e dos dados históricos simulados para os modelos MPI (acima) e IPSL (abaixo).....	24
Figura 10 - Climatologia das vazões no período histórico para os dados observados e dados simulados pelos modelos MPI e IPSL.....	25
Figura 11 - Comparação entre os hidrogramas os dados do período histórico e do período futuro dos cenários SSP2-4.5 (acima) e SSP5-8.5 (abaixo) do modelo MPI-ESM1-2-HR.	26
Figura 12 - Comparação entre os hidrogramas os dados do período histórico e do período futuro dos cenários SSP2-4.5 (acima) e SSP5-8.5 (abaixo) do modelo IPSL-CM6A-LR.	27
Figura 13 - Climatologia dos dados de vazões do período histórico e do período futuro dos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos MPI-ESM1-2-HR e IPSL-CM6A-LR.	28
Figura 14 - Condição de vazão (acima) e profundidade (abaixo) para a área de estudo do modelo MPI, cenário SSP5-8.5.	30
Figura 15 - Condição de vazão para a área de estudo do modelo MPI, para o cenário SSP2-4.5 (a e b) e o cenário SSP5-8.5 (c e d), considerando o período de futuro próximo (a e c) e futuro médio (b e d).....	31
Figura 16 - Condição de profundidade para a área de estudo do modelo MPI, para o cenário SSP2-4.5 (a e b) e o cenário SSP5-8.5 (c e d), considerando o período de futuro próximo (a e c) e futuro médio (b e d).	32
Figura 17 - Condição de vazão para a área de estudo do modelo IPSL, para o cenário SSP2-4.5 (a e b) e o cenário SSP5-8.5 (c e d), considerando o período de futuro próximo (a e c) e futuro médio (b e d).	32
Figura 18 - Condição de profundidade para a área de estudo do modelo IPSL, para o cenário SSP2-4.5 (a e b) e o cenário SSP5-8.5 (c e d), considerando o período de futuro próximo (a e c) e futuro médio (b e d).	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estatísticas de Ajuste.	15
Tabela 2 – Estatísticas de Ajuste para os modelos durante o período histórico.	23
Tabela 3 - Apresentação de velocidade de escoamento e profundidade das simulações hidrodinâmicas.	33

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AIM – *Asia-Pacific Integrated Model*

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

AR5 – *Fifth Assessment Report*

AR6 – *Sixth Assessment Report*

BHRD – Bacia Hidrográfica do Rio Doce

C3S – *Copernicus Climate Change Service*

CBERS – *China-Brazil Earth Resources Satellite*

CMC – *Climate Modelling Center*

CMIP5 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

CMIP6 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*

DGI – Divisão de Geração de Imagens

GCM – *General Circulation Model*

GEE – Gases de Efeito Estufa

HEC-RAS – *Hydrologic Engineering Corps - River Analysis System*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBIO – Instituto BioAtlântica

IDE-SISEMA – Infraestrutura de Dados Especiais-Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

IIASA – *International Institute for Applied Systems Analysis*

IMAGE – *Integrated Model to Assess the Global Environment*

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

IPSL – *Institut Pierre-Simon Laplace*

IPSL-CM6A-LR – *Institut Pierre-Simon Laplace Climate Model 6A – Low Resolution*

JGCRI – *Joint Global Change Research Institute*

LMDZ – *Laboratoire de Météorologie Dynamique Zoom*

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDT – Modelo Digital de Terreno

MESSAGE – *Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact*

MGB – Modelo de Grande Bacias

MGB – Modelo de Grandes Bacias

MPI-ESM1.2-HR – *Max Planck Institute Earth System Model 1.2 for the High-Resolution Model Intercomparison Project*

MUX – Câmera Multiespectral

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NEMO – *Nucleus for European Modelling of the Ocean*

NEX-GDDP – *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections*

NIES – *National Institute for Environmental Studies*

NIMA – *National Imagery and Mapping Agency*

ONU – Organização das Nações Unidas

ORCHIDEE – *Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems*

PBL – *Netherlands Environmental Assessment Agency*

PNNL – *Pacific Northwest National Laboratory*

RCP – *Representative Concentration Pathways*

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

SSP – *Shared Socioeconomic Pathways*

URH – Unidades de Resposta Hidrológica

USACE – *United States Army Corps of Engineers*

WCRP – World Climate Research Programme

WFI – Câmera imageadora de Campo Largo

WPM – Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	IX
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVO GERAL	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. MATERIAIS E MÉTODOS	4
3.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	4
3.2. PROJEÇÕES CLIMÁTICAS	5
3.2.1. <i>Cenários de Mudanças Climáticas</i>	6
3.2.2. <i>Modelos Climáticos</i>	8
3.3. MODELO HIDROLÓGICO DE GRANDES BACIAS	9
3.3.1. <i>Discretização</i>	10
3.3.2. <i>Calibração</i>	11
3.3.3. <i>Modelagem</i>	16
3.4. MODELO DIGITAL DE TERRENO	16
3.4.1. <i>Extração de calha</i>	17
3.4.2. <i>Interpolação</i>	17
3.5. SISTEMA DE ANÁLISE FLUVIAL	19
3.5.1. <i>Dados de entrada</i>	21
3.5.2. <i>Simulação hidrodinâmica bidimensional</i>	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1. RESULTADOS DO MGB-IPH	22
4.1.1. <i>Período Histórico</i>	22
4.1.2. <i>Período Futuro</i>	26
4.2. SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA	29
4.2.1. <i>Resultados</i>	29
5. CONCLUSÃO	34
6. REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

Em novembro de 2015, o rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, operado pela mineradora Samarco S.A., no município de Mariana, Minas Gerais, marcou um dos maiores desastres socioambientais da história do Brasil, conhecido como o Desastre de Mariana. Este evento liberou cerca de 43,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro (GOLDER, 2016), contaminando os rios Gualaxo do Norte, Carmo, Doce e, por fim, o Oceano Atlântico. A onda de rejeitos percorreu aproximadamente 663,2 km de cursos d'água, devastando 1470 hectares de ecossistemas e afetando milhares de comunidades ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD) (IBAMA, 2016; FOESCH *et al.*, 2020; SEGURA *et al.*, 2016).

Os impactos ambientais e sociais do desastre foram diversos, afetando diretamente e indiretamente a biodiversidade e as comunidades locais, através da destruição causada pela inundação e da liberação de rejeitos e contaminantes (IBAMA, 2016). Estudos indicam que, nos seis meses subsequentes, houve um aumento superior a 80% no transporte de sedimentos na bacia, afetando significativamente a qualidade da água e o equilíbrio ecológico regional (MAGRIS *et al.*, 2019). Embora parte dos rejeitos tenha sido transportada ao litoral do Espírito Santo, uma fração considerável permaneceu no leito e margens dos rios, sendo remobilizada gradativamente por eventos meteorológicos intensos (HATJE *et al.*, 2017).

Em janeiro de 2022, anos após o desastre de Mariana, a região foi novamente afetada por um evento extremo: uma inundação intensa causada por um evento extremo de chuva. Este evento foi aproximadamente 53% mais severo em magnitude que as inundações que ocorreram após o rompimento da barragem de Fundão, tornando-se a maior dos últimos 25 anos e a terceira maior registrada na BHRD (MARCIANO, 2024). O estudo realizado por Marciano (2024) indicou que este evento apresentou potencial para revolver e transportar sedimentos depositados no leito e margens do rio. Esses sedimentos, remobilizados, podem ter intensificado os impactos ambientais do desastre de Mariana, assim como que, em algumas áreas, o mesmo processo pode ter contribuído para a redistribuição e diluição de rejeitos, suavizando impactos específicos a jusante.

A possibilidade de eventos extremos oriundos de condições naturais superarem, nos âmbitos da vazão e mancha de inundação, eventos não naturais, como o Desastre de Mariana, na BHRD levanta o questionamento se, sob condições causadas pelos impactos das mudanças climáticas, tais eventos poderiam se tornar mais frequentes e intensos. Esta tendência representa um agravamento significativo dos riscos socioambientais, aumentando a vulnerabilidade das comunidades e ecossistemas locais. Além disso, tais eventos têm o potencial de remobilizar sedimentos e rejeitos previamente depositados no leito e margens dos rios, podendo intensificar impactos ambientais adversos em algumas áreas, enquanto atenuam outros, ao redistribuir contaminantes.

Este estudo ganha relevância, pois visa investigar a dinâmica hidrológica na confluência entre os rios Piranga e do Carmo, um ponto estratégico para a BHRD. A análise considera os impactos das mudanças climáticas, com o objetivo de compreender como eventos extremos de vazão podem alterar o comportamento do escoamento, a extensão das manchas de inundação e as condições hidrodinâmicas locais. Os resultados esperados são fundamentais para embasar estratégias de mitigação de riscos e aprimorar o planejamento ambiental na região.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Este estudo teve como objetivo avaliar as mudanças no escoamento fluvial e na mancha de inundação na região da confluência entre o rio Piranga e o rio do Carmo, na Bacia Hidrográfica do Rio Doce, durante eventos extremos de vazão sob a influência de mudanças climáticas.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar a performance do Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas na modelagem hidrológica da chuva-vazão;
- Analisar e fornecer a simulação hidrológica do escoamento fluvial e mancha de inundação para servir de ferramenta auxiliar para a elaboração de planos de ações emergenciais e de remediações;
- Apresentar os possíveis impactos ambientais das mudanças climáticas, de modo a aumentar a consciência popular;
- Avaliar como o escoamento e a mancha de inundação são afetados durante eventos extremos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Descrição da área de estudo

Dentre os grandes afluentes do rio Doce, os mais relevantes para este estudo são os rios Piranga, do Carmo, Suaçuí Grande e Manhuaçu, cujas fozes são um dos pontos principais das áreas de estudo.

A confluência dos rios Piranga e do Carmo, localizada no estado de Minas Gerais, é um marco geográfico de extrema importância para a Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD) por ser onde se inicia o rio Doce. Esta região caracteriza-se por um ambiente de transição entre áreas montanhosas e de planície fluvial, apresentando uma dinâmica hidrológica complexa e significativa tanto para a ecologia local quanto para as comunidades ribeirinhas.

O Quadrilátero Ferrífero, conhecido por ser uma das regiões mais importantes para a mineração no Brasil, contribui significativamente para a configuração do ambiente físico da confluência. As atividades mineradoras ao longo das bacias dos rios Piranga e do Carmo aumentam a carga de sedimentos e rejeitos transportados para a confluência, impactando os processos de mistura e deposição. Além disso, essas atividades geram pressão sobre a qualidade da água e a biodiversidade aquática na Bacia (ALMEIDA *et al.*, 2024).

O rio Piranga, que nasce na Serra da Mantiqueira, percorre uma região com intensa atividade agropecuária e industrial, transportando sedimentos e nutrientes ao longo de sua extensão. Por sua vez, o rio do Carmo, que atravessa regiões igualmente influenciadas pela mineração e ocupação humana, desempenha um papel importante na diluição e dispersão desses materiais, especialmente no ponto de união. Essa dinâmica torna a confluência um local propenso à deposição de sedimentos em áreas de baixa energia hidráulica e à remobilização durante eventos extremos, como as enchentes (FOESCH; SEGURA; MAGRIS, 2019).

Além de sua importância hidrológica, a confluência é uma zona ecologicamente sensível. Fragmentos de mata ciliar ainda presentes são essenciais na manutenção da estabilidade ecológica e na proteção contra a erosão. Contudo, os impactos das mudanças climáticas, aliados à histórica exploração do Quadrilátero

Ferrífero, têm aumentado os riscos de degradação ambiental, erosão e perda de biodiversidade.

Desta forma, a área de estudo abrange a confluência do rio Piranga com o rio do Carmo (Figura 1) por sua importância para a BHRD e por serem os principais rios que recebem as águas do quadrilátero ferrífero.

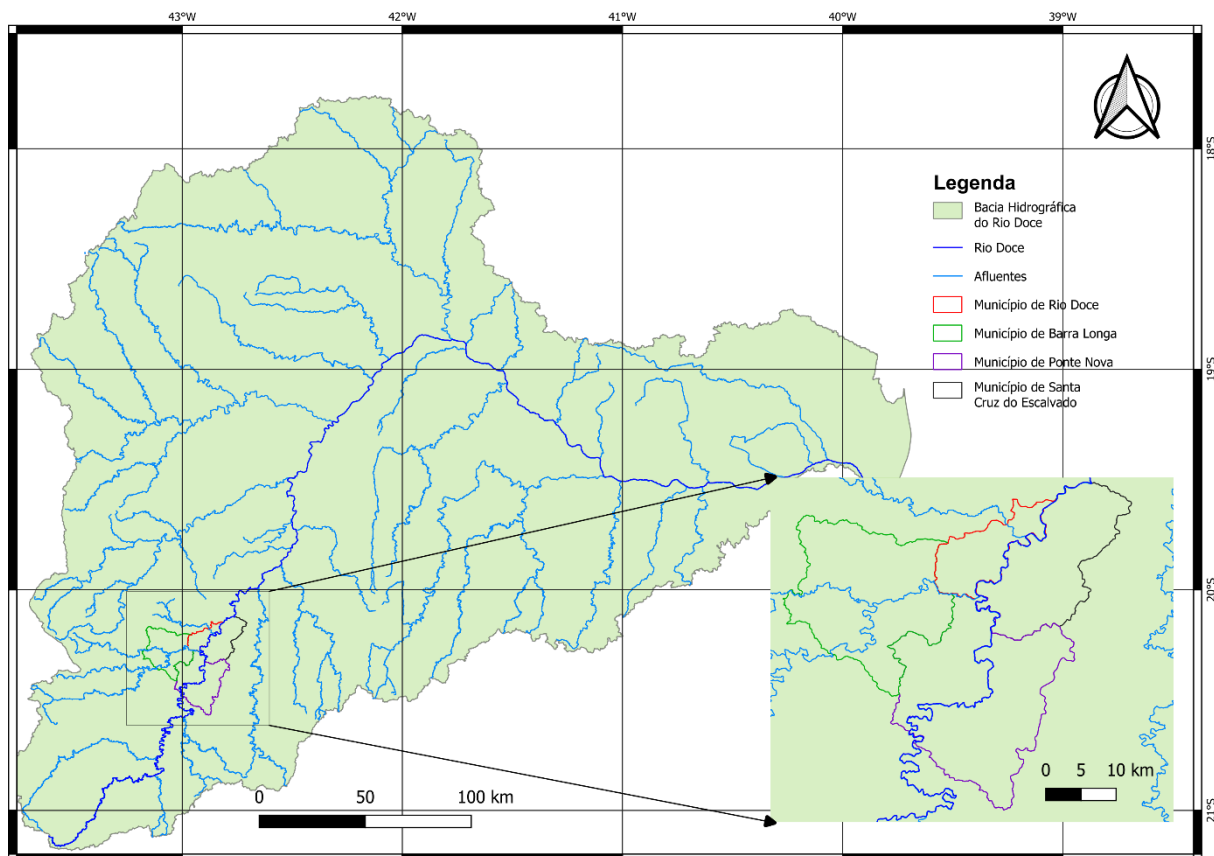


Figura 1 – Bacia Hidrográfica do Rio Doce, área de estudo e municípios inclusos nela.

3.2. Projeções Climáticas

As mudanças climáticas se referem a alterações nos padrões meteorológicos e climáticos, consequência de ações e atividades antrópicas, especialmente o uso amplamente difundido de combustíveis fósseis, que geram aumento nas concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera e consequente aumento na temperatura média da superfície do planeta, caracterizando um dos principais desafios que a população mundial tem enfrentado, no âmbito de seus impactos e ações de mitigação e adaptação a estes (SILVA *et al.*, 2024; IPCC, 2021).

Para investigar esses potenciais impactos são utilizados modelos climáticos e cenários de mudanças climáticas, para se obter uma representação numérica do clima futuro e estimar as respostas das forçantes radiativas presentes e futuras (IPCC, 2019; NAZARENKO *et al.*, 2015). Modelos climáticos são modelos sofisticados que simulam o sistema climático baseado em variadas considerações e aproximações sobre emissões de GEEs futuros, assim auxiliando na previsão de como tais nível de concentração e emissão de GEE podem impactar as condições climáticas, permitindo a avaliação de possíveis impactos à sociedade e ao meio ambiente.

3.2.1. Cenários de Mudanças Climáticas

Para a modelagem do clima futuro, foram desenvolvidos cenários de mudanças climáticas, que descrevem possíveis trajetórias de concentrações de GEE na atmosfera, conhecidos como *Representative Concentration Pathways* (RCP), e possíveis desenvolvimentos socioeconômicos, chamado de *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) (VAN VUUREN *et al.*, 2014; O'NEILL *et al.*, 2020; KRIEGLER *et al.*, 2014; IPCC, 2021).

Os RCPs são cenários que delimitam diferentes trajetórias de concentração de GEEs atmosféricos baseado em variados níveis de emissão e forçantes radiativas. Em meio a diversos RCPs, são quatro os mais utilizados:

- RCP2.6: uma trajetória mais otimista que visa limitar o aquecimento global abaixo de 2°C acima do nível pré-industrial, considerado o nível base, através de reduções nas emissões de GEEs, com forçante radiativa de $2,6 \text{ W m}^{-2}$;
- RCP4.5: um cenário de estabilização onde as emissões atingem seu pico por volta de 2040 e diminuem, com forçante de $4,5 \text{ W m}^{-2}$;
- RCP6.0: um cenário de esforços moderados para a mitigação das mudanças climáticas, causando redução gradual nas concentrações de GEEs, com forçante radiativa de $6,0 \text{ W m}^{-2}$;

- RCP8.5: um cenário onde não há ou há pouco esforço para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas, chamado de cenário “business-as-usual”, assume altos níveis de emissão levando a aquecimento global significativo em 2100, com forçante radiativa de $8,5 \text{ W m}^{-2}$ (VAN VUUREN *et al.*, 2014).

Os SSPs foram desenvolvidos de modo a englobar uma diversidade de cenários de desenvolvimento socioeconômico futuro, provendo uma análise qualitativa sobre estes, focando em dois aspectos principais: os desafios para a adaptação e para a mitigação às mudanças climáticas. Vale destacar, no entanto, que os SSPs não contemplam respostas adaptativas ou mitigativas, nem os impactos diretos das mudanças climáticas, mas incluem projeções de sobre as populações nacionais, nível de urbanização e Produto Interno Bruto. Desenvolvidos desta forma de modo, estes cenários possibilitam uma análise dos efeitos de políticas públicas e da magnitude de impactos das mudanças climáticas, permitindo que estas projeções sejam usadas como referência para diversos estudos (O’NEILL *et al.*, 2020).

A integração de SSPs e RCPs formam uma aproximação importante para a compreensão e o estudo de possíveis futuros frente às mudanças climáticas, auxiliando na elaboração de estratégias eficientes para a mitigação e adaptação em resposta aos riscos e vulnerabilidades socioambientais globais. Os SSP-RCPs são rotulados de acordo com o SSP e RCP combinados, e os mais comumente utilizados são quatro:

- O **SSP1-2.6** combina uma narrativa sustentável do SSP1 com uma forçante radiativa alvo moderada de $2,6 \text{ W m}^{-2}$, visando limitar o aquecimento global abaixo de 2°C ;
- O **SSP2-4.5** representa um cenário intermediário, com desenvolvimento socioeconômico entre o sustentável e o atual e com forçante radiativa alvo moderada de $4,5 \text{ W m}^{-2}$;
- O **SSP3-7.0** reflete um mundo marcado pela rivalidade regional e grande dificuldade para a adaptação e mitigação, com forçante radiativa de $7,0 \text{ W m}^{-2}$;

- O **SSP5-8.5** é o cenário mais pessimista, que considera que a sociedade não vai mudar seu estilo de vida, sendo dependente de combustíveis fósseis e causando grande dificuldade para mitigação, e intensa forçante radiativa de $8,5 \text{ W m}^{-2}$ (IPCC, 2021).

Neste estudo, para subsidiar os modelos hidrológicos a serem utilizados nas simulações, foram selecionados os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 do banco de dados de modelos e projeções climáticas National Aeronautics and Space Administration (NASA) Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections - Coupled Model Intercomparison Project 6 (NEX-GDDP-CMIP6).

O NEX-GDDP-CMIP6 é um conjunto de dados de alta resolução (25 km) desenvolvido pela NASA baseado no CMIP6 com o objetivo de subsidiar e auxiliar aplicações e estudos diversos acerca das mudanças climáticas, seus impactos na sociedade e meio ambiente, e estratégias de mitigação e adaptação (THRASHER *et al.*, 2022; JIANG *et al.*, 2023). Sua resolução temporal diária em conjunto com a inclusão de cenários SSPs promove a análise de diversos cenários climáticos, desde os mais brandos, que apresentam maior esforço para a mitigação, até as trajetórias de altas emissões.

3.2.2. Modelos Climáticos

Foram escolhidos dois modelos do NEX-GDDP-CMIP6, para subsidiar as análises desse estudo, sendo eles o IPSL-CM6A-LR (*Institut Pierre-Simon Laplace Climate Model*) e o MPI-ESM1-2-HR (*Max Planck Institute Earth System Model*).

O MPI é um modelo de alta resolução, desenvolvido pelo *Max Planck Institute*, destaca-se pela sua capacidade de representar padrões de circulação atmosférica e interações oceano-atmosfera. É particularmente eficaz na simulação de variabilidade climática em escala sazonal e interanual, como o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENSO) (GUTJAHR *et al.*, 2019).

O IPSL, desenvolvido pelo *Institut Pierre-Simon Laplace*, enfatiza a representação de processos biofísicos e feedbacks climáticos, como a interação entre vegetação e clima. Sua resolução mais baixa em comparação ao MPI é

compensada por uma modelagem robusta de processos de longo prazo, como as mudanças no ciclo de carbono (BOUCHER *et al.*, 2020).

Estes foram os modelos selecionados de acordo com a análise realizada e resultados apresentados por Oliveira *et al.* (2023), onde foi analisada a performance de dados de precipitação de 50 diferentes modelos do CMIP6 para dois subdomínios da América do Sul, o sul da Amazônia e o sudeste brasileiro no período histórico de 1995 a 2014. Neste, o MPI-ESM1-2-HR se destacou como um dos melhores modelos para o sudeste brasileiro, representando bem a maioria das estações, exceto o outono, enquanto o IPSL CM6A-LR apresentou melhores resultados para o sul da Amazônia e performance média para o outro subdomínio, embora neste tenha obtido bom desempenho durante o verão, estação mais relevante para este estudo (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

3.3. Modelo Hidrológico de Grandes Bacias

O Modelo de Grandes Bacias (MGB) é uma ferramenta hidrológica distribuída desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Este modelo é projetado para a simulação de processos hidrológicos e ambientais, reanálise de eventos extremos passados, previsão de vazões em curto e médio prazo para eventos de cheia e operação de reservatórios, avaliação de impactos relacionados a mudanças no uso do solo e às mudanças climáticas e avaliação e medidas de controle a eventos de inundação, além de ser utilizado na conversão de dados de chuva em dados de vazão em bacias hidrográficas de grande escala, definidas como regiões com área superior a 1000 km², onde os processos hidrológicos, como a propagação de ondas de cheia e o tempo de concentração, são significativos (BARBOSA, 2024; COLLISCHONN, 2020; LIMA; COLLISCHONN; MARENGO, 2014).

O MGB, durante seu pré-processamento, processamento e pós-processamento, incorpora diversas etapas e processamento de informações até se obter o resultado final. A Figura 2 apresenta o fluxograma das etapas a serem seguidas para a aplicação do modelo MGB-IPH (MEDEIROS *et al.*, 2019).

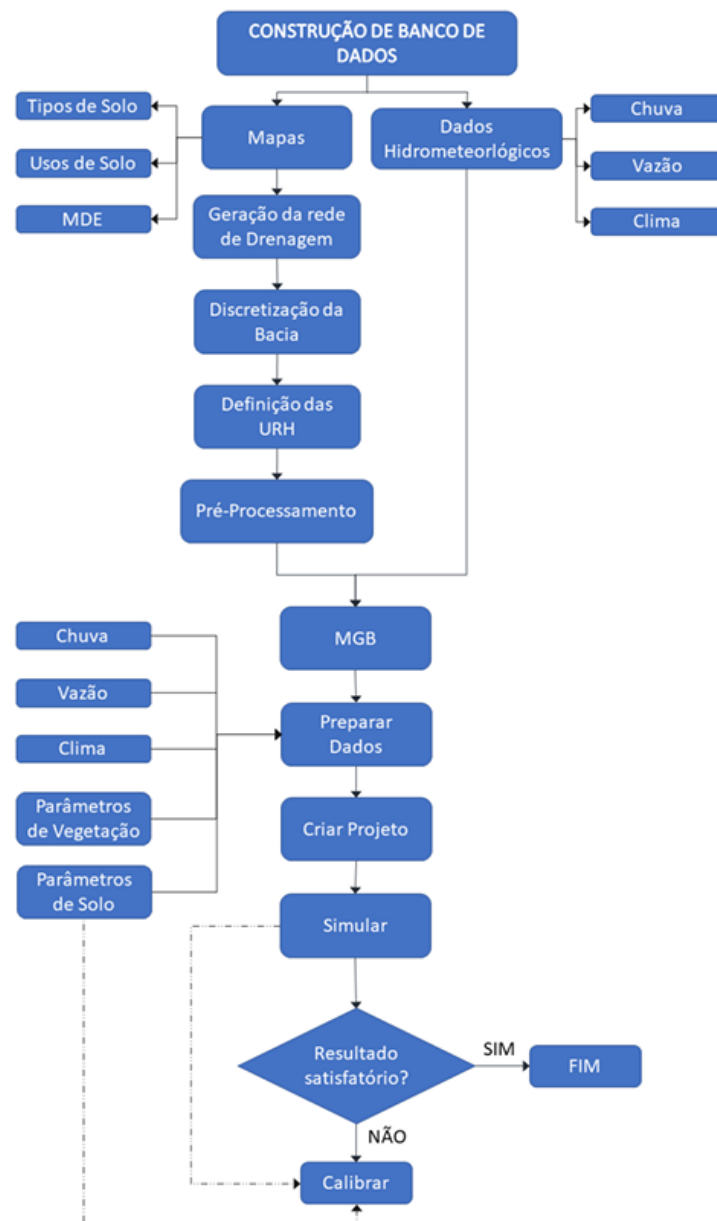


Figura 2 - Fluxograma de aplicação do MGB-IPH.
Fonte: Medeiros *et al.* (2019)

3.3.1. Discretização

Na discretização realizada para o MGB, a área de estudo, a confluência dos rios Piranga e do Carmo e entorno, é dividida em três unidades, de minibacias, de sub-bacias e de Unidades de Resposta Hidrológica (URHs). As minibacias dizem respeito às áreas adjacentes a um dado trecho de um rio delimitadas através dos dados de topografia e as sub-bacias são agrupamentos regionais de minibacias.

O modelo divide a área de estudo em Unidades de Resposta Hidrológica, que são subdivisões de minibacias de acordo com propriedades específicas, como vegetação e tipo de solo, sendo consideradas homogêneas por ponto de grade no modelo (FAN *et al.*, 2015; LIMA; COLLISCHONN; MARENGO, 2014). Ele utiliza ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para integrar dados geoespaciais, como Modelos Digitais de Elevação (MDE), e mapas de uso do solo e cobertura vegetal, para obter maior detalhamento na parametrização (COLLISCHONN, 2020). Ao anteceder a modelagem do MGB com uma etapa de geoprocessamento, com técnicas de pré-processamento partindo de MDEs e rotinas de calibração, consegue-se melhorar as etapas de pré-processamento do modelo hidrológico (LIMA; COLLISCHONN; MARENGO, 2014).

3.3.2. Calibração

A calibração do Modelo de Grandes Bacias, neste estudo, foi realizada utilizando ferramentas de SIG e o *plug-in* IPH-Hydro Tools, que é um conjunto de ferramentas de geoprocessamento desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas. É utilizado para a modelagem hidrológica, especialmente para a delimitação de bacias hidrográficas (identificação de sub-bacias, minibacias e redes de drenagem), processamento de dados hidrológicos e pré-processamento de dados para subsidiar modelos hidrológicos como o MGB (SIQUEIRA *et al.*, 2016; MEDEIROS *et al.*, 2019).

A calibração do MGB para a Bacia do Rio Doce foi realizada aqui utilizando como base o período de 1970 a 2014 de dados observados. Semelhante ao realizado por Santos (2022), para a etapa de pré-processamento do modelo, foi utilizado o MDE do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), adquirido do Banco de Dados Geomorfométricos TOPODATA (VALERIANO; ROSSETTI; ALBUQUERQUE, 2009), apresentado na Figura 3. Dos dados de altimetria do MDE são obtidas as direções de fluxo de água, rede de drenagem, sub-bacias e outros parâmetros necessários (SIQUEIRA, 2017).

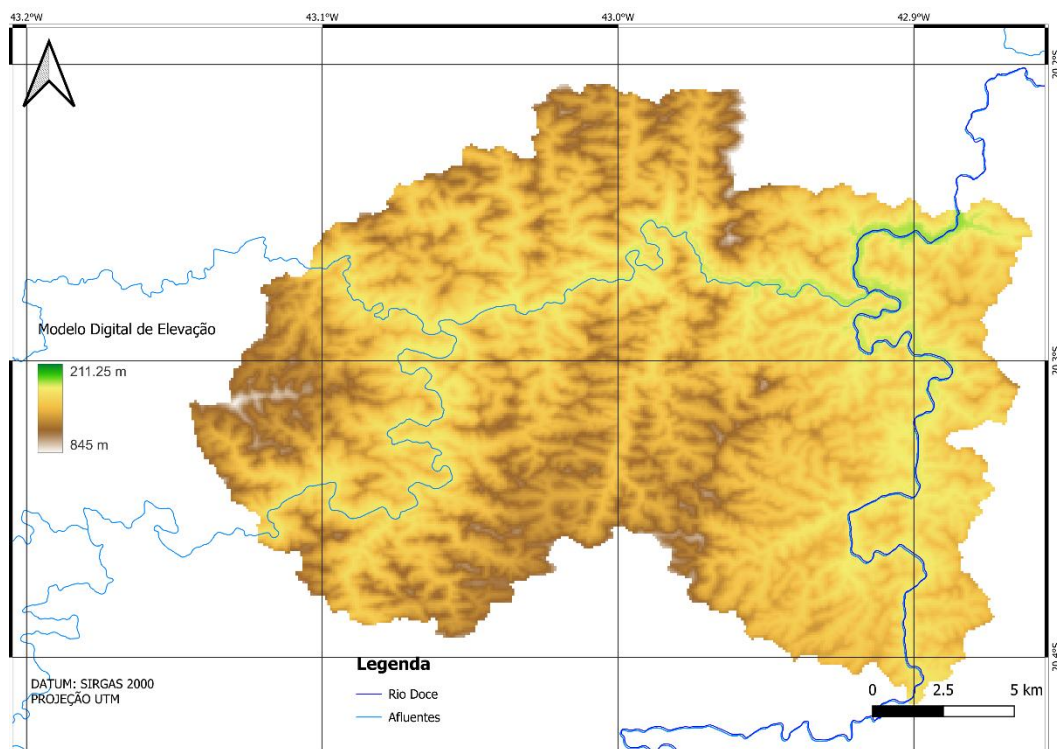


Figura 3 - Modelo Digital de Elevação da área de estudo.

Para a segmentação da rede de drenagem da bacia, é necessário definir uma área mínima de drenagem a partir da qual a rede passa a ser considerada (MEDEIROS *et al.*, 2019). Neste estudo, para a área de interesse, foi definido valor limiar de 10 km², para abranger todos os rios de interesse, obtendo assim 26 minibacias, apresentadas na Figura 4.

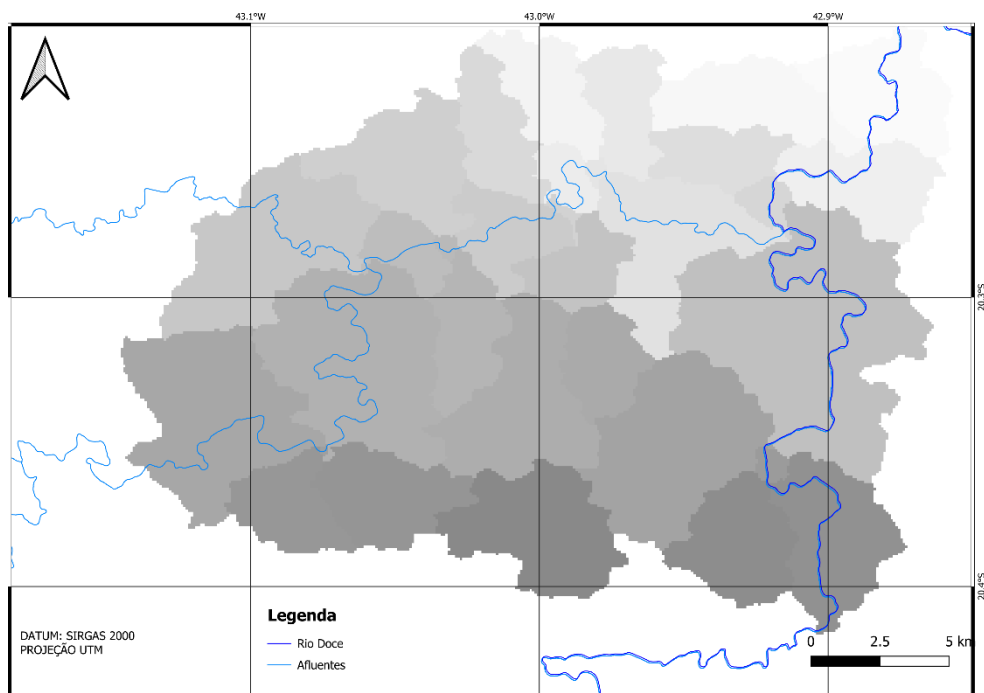


Figura 4 - Minibacias para a confluência dos rios Piranga e do Carmo na BHRD.

A delimitação das sub-bacias se baseou em dados de vazão observada provenientes de 3 estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA). As estações foram selecionadas por conta da sua disponibilidade de dados fluviométricos contínuos, com dados a partir de 1970. A Figura 5 apresenta a localização dos postos fluviométricos na área de interesse na BHRD.

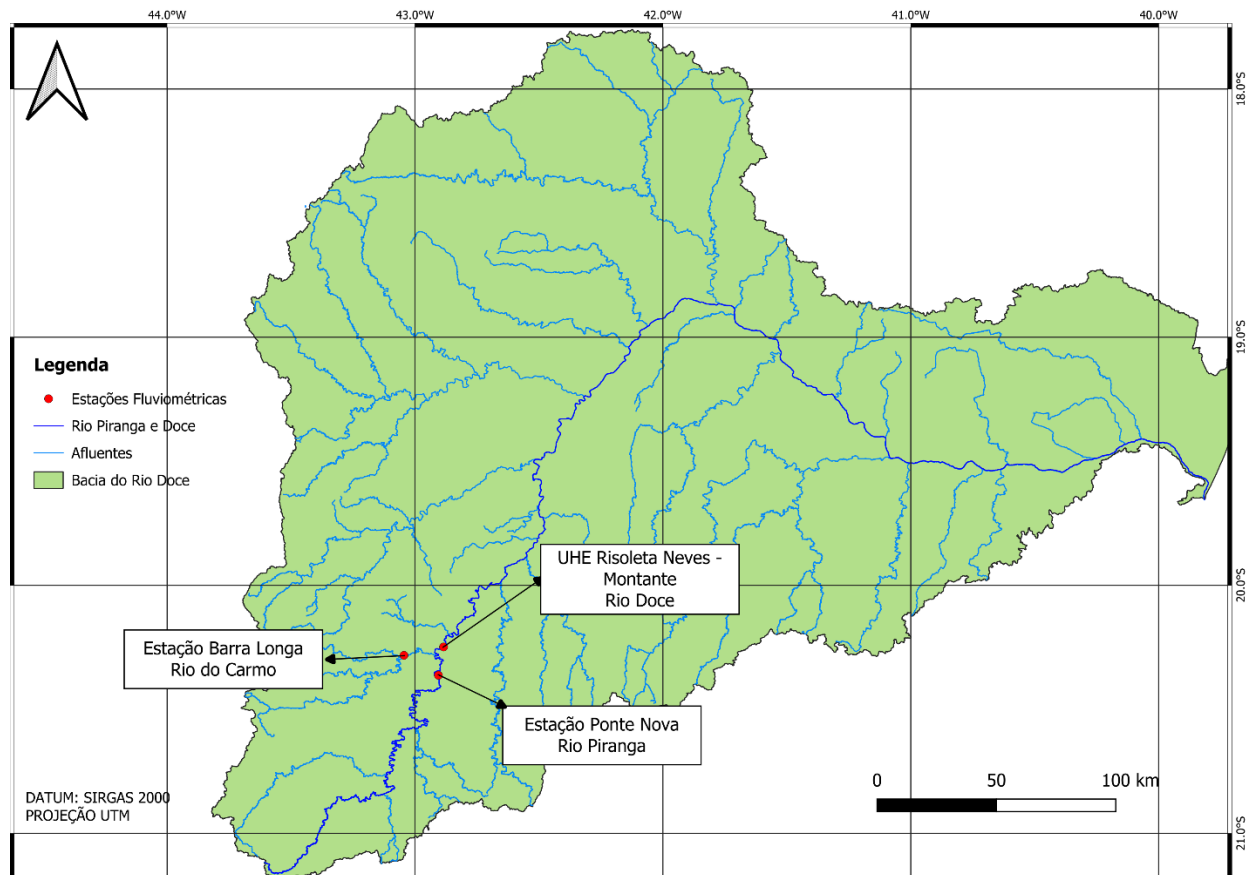


Figura 5 - Estações fluviométricas utilizadas para a calibração do MGB-IPH.

Na delimitação das sub-bacias, foram utilizados as 2 estações fluviométricas e o exutório do rio Doce, sendo geradas 3 sub-bacias, apresentadas na Figura 6.

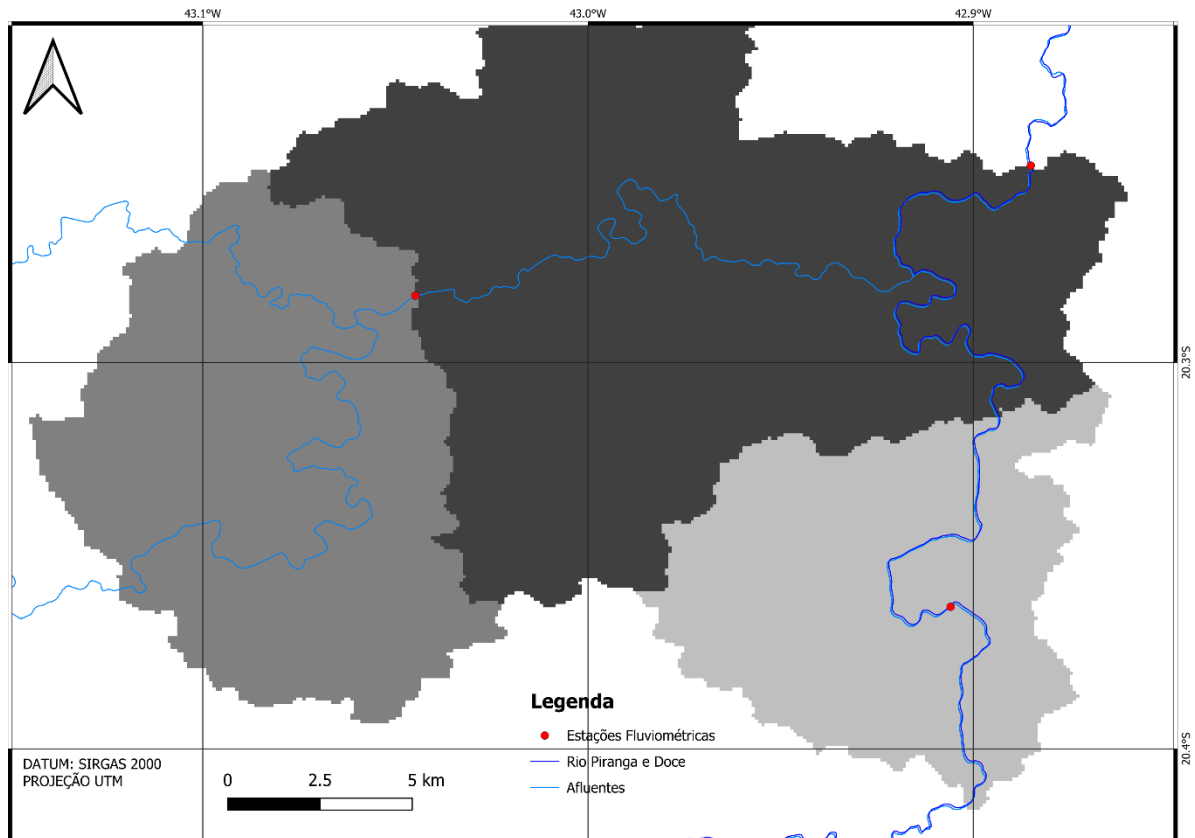


Figura 6 - Sub-bacias obtidas na área de estudo.

Na execução do modelo, através da ferramenta do MGB para aquisição e interpolação de dados de precipitação da ANA para as áreas de interesse, foram adquiridos dados de 196 estações pluviométricas. Completa a geração das sub-bacias e minibacias no IPH-Hydro Tools, continua-se a calibração no MGB.

Durante o processo de calibração no MGB, o modelo incorpora parâmetros ajustáveis associados às URHs e às minibacias, visando melhorar a acurácia do resultado simulado comparado com os dados de vazão observados. Os parâmetros são calibrados para cada sub-bacia, visto que a qualidade do resultado pode variar em função de características geográficas e climáticas. Para avaliar a performance do modelo, foram utilizados três coeficientes: o Nash-Sutcliffe (Nash), o Nash-Sutcliffe dos logaritmos (Nashlog) e o Erro de Volume (EVOL), cujos valores de ajuste estão apresentados na Tabela 1.

O coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe é uma medida estatística amplamente utilizado e potencialmente confiável na modelagem hidrológica e ambiental para avaliar a precisão de um modelo em representar um conjunto de dados observados (MCCUEN; KNIGHT; CUTTER, 2006). Desenvolvido por Nash e

Sutcliffe, o Nash é importante especialmente para indicar o desempenho das vazões altas e médias da simulação, sendo aplicado principalmente em simulações de chuva-vazão, de qualidade da água e de modelos climáticos (CHANG et al., 2024).

Tabela 1 – Estatísticas de Ajuste.

Sub-bacia/Modelo	Nash	Nashlog	EVol
Rio Piranga	0.829	0.822	2.252
Rio do Carmo	0.620	0.699	-1.031
Rio Doce	0.866	0.857	0.153

O Nash-Sutcliffe dos logaritmos se refere a variante do modelo Nash em que é aplicada uma transformação logarítmica aos dados observados e simulados antes do cálculo da eficiência. A aproximação é particularmente útil a avaliação do desempenho da simulação em representar condições de baixa vazão dos dados observados (MCCUEN; KNIGHT; CUTTER, 2006).

O coeficiente Nash é uma medida normalizada que varia de $-\infty$ e 1 e compara o erro quadrático médio da simulação com a variância da série. De acordo com Felix e Paz (2015), em ambos coeficientes Nash e Nashlog, os melhores resultados são encontrados mais próximo de 1.

O coeficiente Erro de Volume se refere a discrepâncias entre os volumes dos dados simulados e observados. O EVOL é importante para avaliar quão bem o modelo está simulando o volume de água real e quão boa é a simulação de balanço hídrico (MCCUEN; KNIGHT; CUTTER, 2006). Quando analisando o coeficiente, se assume que, quanto mais próximo de zero, melhor é o desempenho do modelo (FELIX; PAZ, 2015).

Os resultados das estatísticas obtidos demonstram que o ajuste do modelo para o Nash e Nashlog estiveram entre bom (0,4 e 0,7) e muito bom (acima de 0,7), portanto pode se afirmar que ambos valores máximos e mínimos estão bem representados, de acordo com os limiares apontados por Barbosa (2024). De forma semelhante, os valores do coeficiente EVol também apresentou um ótimo ajuste,

estando próximos de zero e que o balanço de água é bem representado por essa calibração (SANTOS, 2022).

3.3.3. Modelagem

Para a execução do MGB, foi utilizado o ambiente de compilação do software Visual Studio, com base em algoritmos próprios para a modelagem em linguagem FORTRAN, disponibilizados pelo IPH. Através do Visual Studio, foram realizados os ajustes necessários de parâmetros dos algoritmos e foram realizadas as modelagem de chuva-vazão.

As rodadas de modelagem iniciais do modelo foram executadas usando dados observados de precipitação e vazão no período de 1970 a 2014, oriundos do mesmo banco de dados da etapa de calibração, de modo a se gerar uma base para a comparação com os dados dos períodos históricos dos modelos, permitindo a análise da performance destes.

Para a modelagem das projeções futuras, são utilizados dados binários de precipitação dos períodos históricos e cenários de cada modelo. Os dados da vazão observada foram mantidos, sendo ajustados conforme a necessidade para as simulações dos períodos futuros.

3.4. Modelo Digital de Terreno

O Modelo Digital de Terreno (MDT) é uma representação numérica da distribuições espacial de características de terreno de uma área, composta por um conjunto de pontos com coordenadas conhecidas (usualmente sendo utilizadas as coordenadas geográficas de latitude e longitude) e dados de elevação (DOYLE, 1978; LAIPELT *et al.*, 2024). Diferente do MDE, o MDT descreve somente a superfície do solo, excluindo outros objetos acima deste, como infraestrutura e vegetação.

O MDT da calha do rio é uma informação básica essencial para a execução do sistema *Hydrologic Engineering Center - River Analysis System* (HEC-RAS). Assim, neste estudo um foi elaborado a partir de uma integração de informações e dados obtidos de imagens de satélite do *China-Brazil Earth Resources Satellite 4A*

(CBERS-4^a; INPE, 2019), do levantamento topobatimétrico realizado pela ANA entre 2017 e 2019 (SNIRH, 2019) e do dados de elevação do SRTM obtidos do banco de dados TOPODATA (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2009).

3.4.1. Extração de calha

O CBERS-4a é um satélite sino-brasileiro de sensoriamento remoto de média resolução desenvolvido como parte do programa *China-Brazil Earth Resources Satellite* (CBERS), este que visa a produção de uma série de satélites de sensoriamento remoto para mapeamento, monitoramento de mudanças de uso de solo, gerenciamento de recursos naturais e apoio a prevenção e socorro a desastres dos dois países (INPE, 2019). O CBERS-4a foi lançado em 2019 e está equipado com câmeras para observações ópticas de todo o globo terrestre, além de um sistema de coleta de dados e monitoramento ambiental. O satélite é equipado com as seguintes câmeras:

- Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM);
- Câmera Multiespectral (MUX);
- Câmera imageadora de Campo Largo (WFI).

Utilizando as imagens da câmera WPM do satélite, foi realizada a extração da calha principal dos rios Piranga, do Carmo e Doce. Foram escolhidas as imagens da câmera WPM, pois esta conta com cinco bandas, sendo quatro multiespectrais, de resolução espacial de 8 metros, e uma pancromática, de resolução de 2 metros (INPE, 2019), em que, através da aplicação de ferramentas do software QGIS, foi possível realizar a fusão entre as imagens e obter imagens multiespectrais de resolução de 2 metros. As imagens utilizadas são referentes a agosto de 2023, durante a estação de seca na região, permitindo uma melhor visualização de bancos de areia, margens e ilhas na região.

3.4.2. Interpolação

Por conta da ausência de um levantamento topobatimétrico de livre acesso para a Bacia do Rio Doce, para a elaboração do MDT foi necessário realizar uma interpolação de dados de batimetria de locais conhecidos. Desta forma, foram

utilizados dados das seções transversais topobatimétricas na BHRD, originado de um levantamento de 375 seções nos rios Caratinga, Piracicaba, Piranga, Doce e outros, realizado entre 2017 e 2019 pela empresa CONSOMINAS Engenharia Ltda. e pelo Instituto BioAtlântica (IBIO), disponível no Catálogo de Metadados da ANA, na plataforma do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2019).

Como as seções transversais disponibilizam informação de pontos determinados, entre uma seção e outra não se sabe a condição do leito do rio. Portanto, nesta interpolação, semelhante à realizada por Marciano (2024), se assume que, sob o nível da água, a elevação varia de forma linear entre o ponto de uma seção e outra.

Quanto aos locais sobre o nível da água, como margens e ilhas, foram utilizados dados de elevação do MDE do SRTM, visto que não seria razoável aplicar valores das seções topobatimétricas em locais em que a superfície terrestre é observada através das imagens de satélite e seria prejudicial para a precisão da simulação. Assim, o Modelo Digital de Terreno resultante pode ser observado na Figura 7.

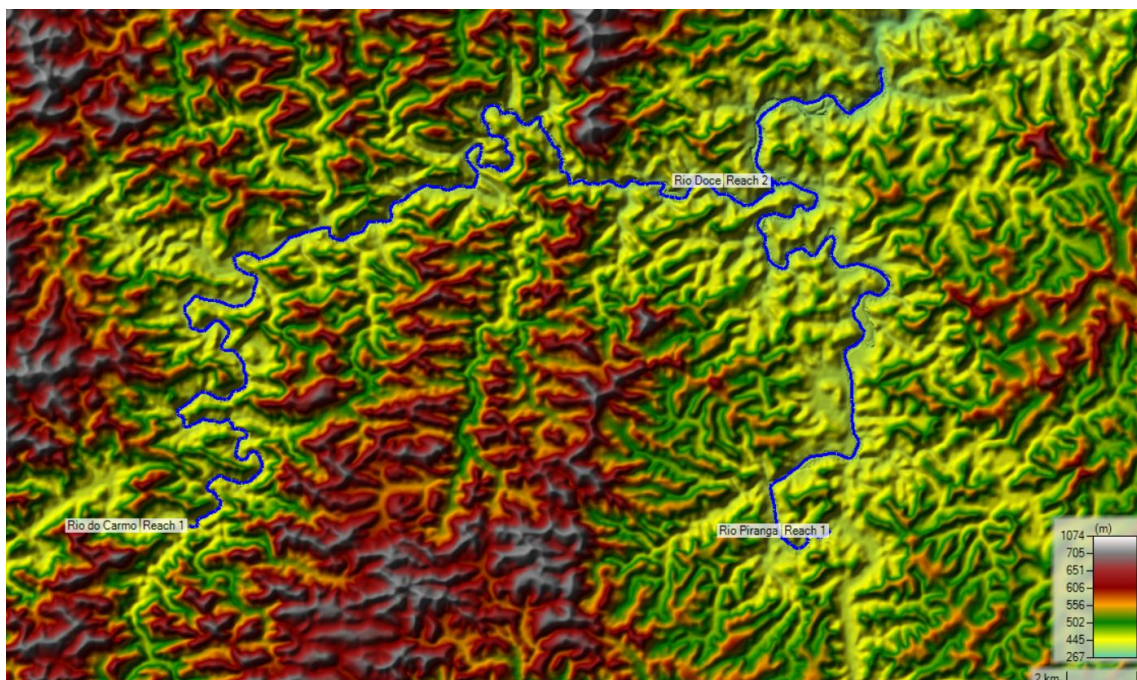


Figura 7 - Modelo Digital de Terreno.

O trecho do rio do Carmo considerado no estudo se inicia em cerca de 396 metros de altitude, no município de Barra Longa, e termina no município de Rio Doce, em cerca de 339 metros. O trecho do rio Piranga considerado se inicia em cerca de 383 metros de altitude, no município de Ponte Nova, e termina em cerca de 340 metros, em Rio Doce. O início do rio Doce se dá na foz dos outros dois rios, no município de mesmo nome e em cerca de 338 metros de altitude, e o último ponto considerado se encontra no mesmo município, em 320 metros. O trecho considerado do rio do Carmo possui extensão aproximada de 42680 metros, enquanto o rio Piranga possui extensão de 21229 metros e o rio Doce, 6668 metros. Na região da confluência foram identificadas diversas ilhas, o que pode vir a influenciar o escoamento do rio.

3.5.Sistema de Análise Fluvial

O programa HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*), desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), é amplamente utilizado para simulações hidráulicas e hidrológicas em canais fluviais. Robusto e de livre acesso, o HEC-RAS oferece análises uni e bidimensionais, permitindo a modelagem de escoamentos em regime permanente e não permanente, transporte de sedimentos e qualidade da água, com alta confiabilidade e aplicabilidade em diferentes condições (FERNANDEZ *et al.*, 2013, USACE, 2016a; HORRIT; BATES, 2002).

Baseado na solução da equação da energia, as perdas na simulação por atrito são calculadas pelo modelo com a equação de Manning, sendo o coeficiente de rugosidade determinado por análises geomorfológicas do terreno (USACE, 2016a). Para a simulação de escoamento instável, o HEC-RAS resolve as equações de conservação de massa e momento usando a aproximação de diferenças finitas (MARCIANO, 2024).

A modelagem hidrológica de escoamento instável é crítica para estudar a hidrodinâmica de rios e estuários, especialmente durante eventos como picos e variações de volume e vazão, inundações, rompimentos de barragens e outros eventos anômalos. No HEC-RAS, a simulação de escoamento instável contabiliza variações no escoamento, nível da água e transporte de sedimento em resposta a

condições transientes. Esse tipo de simulação permite a análise de fenômenos como propagação de onda, mancha de inundação e interação entre o escoamento e as condições topográficas e estruturas construídas.

Neste estudo o HEC-RAS foi selecionado para a realização da modelagem de escoamento instável bidimensional por ser um sistema de livre acesso e com manual de usuário e de fundamentos dos modelos, pela interface de relativa facilidade de uso, pela performance de suas simulações e visualização de resultados, de acordo com os trabalhos realizados por Marciano *et al.* (2024), Milanovich (2019) e Dysarz *et al.* (2017).

O modelo hidrodinâmico bidimensional (2D) do HEC-RAS, obtido neste estudo através da solução das equações de Saint-Venant, permite a análise de padrões de escoamento, profundidade e elevação em terrenos complexos (USACE, 2016a). O modelo 2D permite a integração com um SIG, facilitando a vetorização de cursos d'água e seções transversais a partir do MDT da área de estudo.

A Figura 8 apresenta uma síntese do processo de simulação hidrodinâmica bidimensional no HEC-RAS.

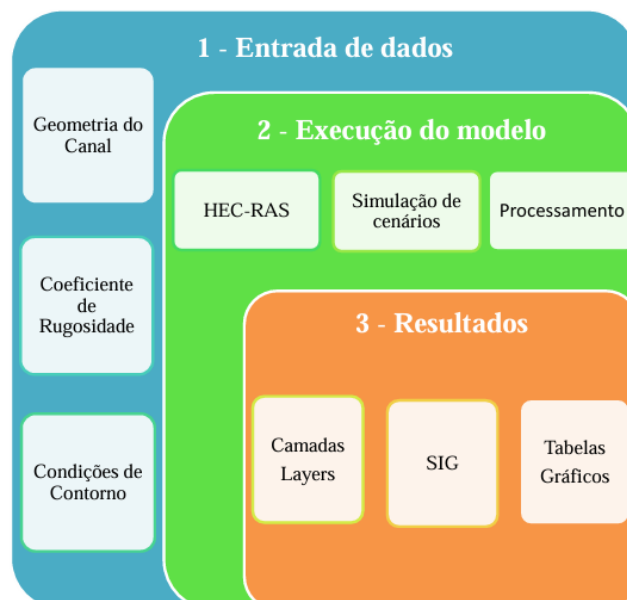


Figura 8 - Fluxograma do processo de simulação hidrodinâmica bidimensional no HEC-RAS.
Fonte: MARCIANO, 2024.

3.5.1. Dados de entrada

Para a execução da análise de escoamento instável bidimensional, três informações principais são necessárias: a geometria do canal; o coeficiente de rugosidade de Manning; e as condições de contorno.

A geometria do canal, elaborando no próprio HEC-RAS, diz respeito a um polígono que delimite a área de simulação e a malha computacional, desenvolvido com base em um MDT inserido no programa.

Os valores do coeficiente de rugosidade de Manning devem ser inseridos para a calha dos cursos d'água. Neste estudo foram adotados os valores calculados por Marciano (2024) para a região da confluência dos rios Piranga e do Carmo, com base no proposto por Chow (1959), a partir da caracterização física do canal. Os valores adotados foram de 0.035 para a calha principal e 0.11 para a calha secundária (MARCIANO, 2024).

As condições de contorno dizem respeito às condições hidrológicas que o curso d'água apresenta no tempo, sendo, para este programa, os dados de vazão, dados de nível d'água ou hidrograma, inseridos diretamente no programa na forma de planilha.

3.5.2. Simulação hidrodinâmica bidimensional

Na simulação hidrodinâmica, para cada cenário de cada modelo foram selecionados dois eventos extremos de vazão, informação adquirida pelo resultado do MGB, sendo um dentro do período de 2020 a 2040, aqui considerado como futuro próximo, e um dentro do período de 2040 e 2060, considerado como futuro médio. A partir desta data, foi considerado um período de simulação de 2 meses antes do evento e 2 meses depois. Não foram consideradas estruturas hidráulicas no estudo, por não ser de interesse para este.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados da modelagem hidrológica de chuva-vazão do Modelo de Grandes Bacias e da simulação hidrodinâmica bidimensional para a região da confluência entre o rio Piranga e rio do Carmo e entorno, na Bacia Hidrográfica do Rio Doce.

4.1. Resultados do MGB-IPH

Para a análise dos dados obtidos do MGB, inicialmente será apresentado o desempenho dos dados do cenário histórico dos modelos climáticos, explorando sua habilidade em representar as dinâmicas hidrológicas da área de estudo e fornecendo uma análise da confiabilidade desses modelos em simular os períodos futuros. Posteriormente, serão apresentados os resultados obtidos a partir dos dados de projeções dos modelos climáticos para os cenários futuros, permitindo observar as tendências futuras e o potencial da área de estudo para eventos extremos sob a influência de maiores forçantes radiativas, relativo à forçante atual.

4.1.1. Período Histórico

Semelhante ao realizado na calibração, foram calculadas as estatísticas de ajuste do MGB para o período histórico, apresentada na Tabela 2, para facilitar a visualização de padrões observáveis por meio da comparação entre os dados observados e os dados históricos dos modelos MPI e IPSL. A partir destes dados, é possível afirmar que, embora a calibração tenha obtido resultados melhores, as estatísticas trouxeram valores de Nash e Nashlog razoáveis que indicam que os extremos máximos e mínimos de vazão não foram tão bem representados quanto durante a calibração, embora o coeficiente de Erro de Volume mantenha valores mais aceitáveis, indicando que o balanço de volume ainda está sendo bem representado (BARBOSA, 2024; SANTOS, 2022).

Tabela 2 – Estatísticas de Ajuste para os modelos durante o período histórico.

Sub-bacia/Modelo	Nash	Nashlog	EVol
	MPI-ESM1-2-HR		
	1	0.021	0.069
2	-0.040	0.004	-6.590
3	0.019	0.064	-5.304
Sub-bacia/Modelo	Nash	Nashlog	EVol
	IPSL-CM6A-LR		
	1	0.071	0.151
2	0.025	0.092	-8.373
3	0.066	0.143	-7.341

Após, foram realizadas comparações entre os hidrogramas dos dados históricos observados e dos dados das simulações históricas dos dois modelos, apresentados na Figura 9, com o objetivo de analisar a capacidade e precisão dos modelos em representar as características de vazão da região. A comparação foi feita considerando os dados do posto fluviométrico do rio Piranga. Isso porque, embora haja variações entre as estações e os rios, as características hidrológicas se mantêm de forma razoavelmente constante entre as estações, permitindo que um ponto possa ser utilizado para representar tendências gerais e o desempenho dos modelos, neste caso sendo utilizada a sub-bacia do rio Piranga.

Através da comparação entre os dados observados e simulados, é necessário indicar duas características principais. Primeiro, é visível a deficiência do modelo em representar com precisão eventos extremos e picos de vazão, isso porque tais condições podem ser influenciadas por eventos específicos e variáveis locais. Dito isso, também é notado que os dados de modelagem obtiveram boa precisão em representar a sazonalidade da vazão fluvial no rio Piranga, especialmente com os dados do modelo MPI.

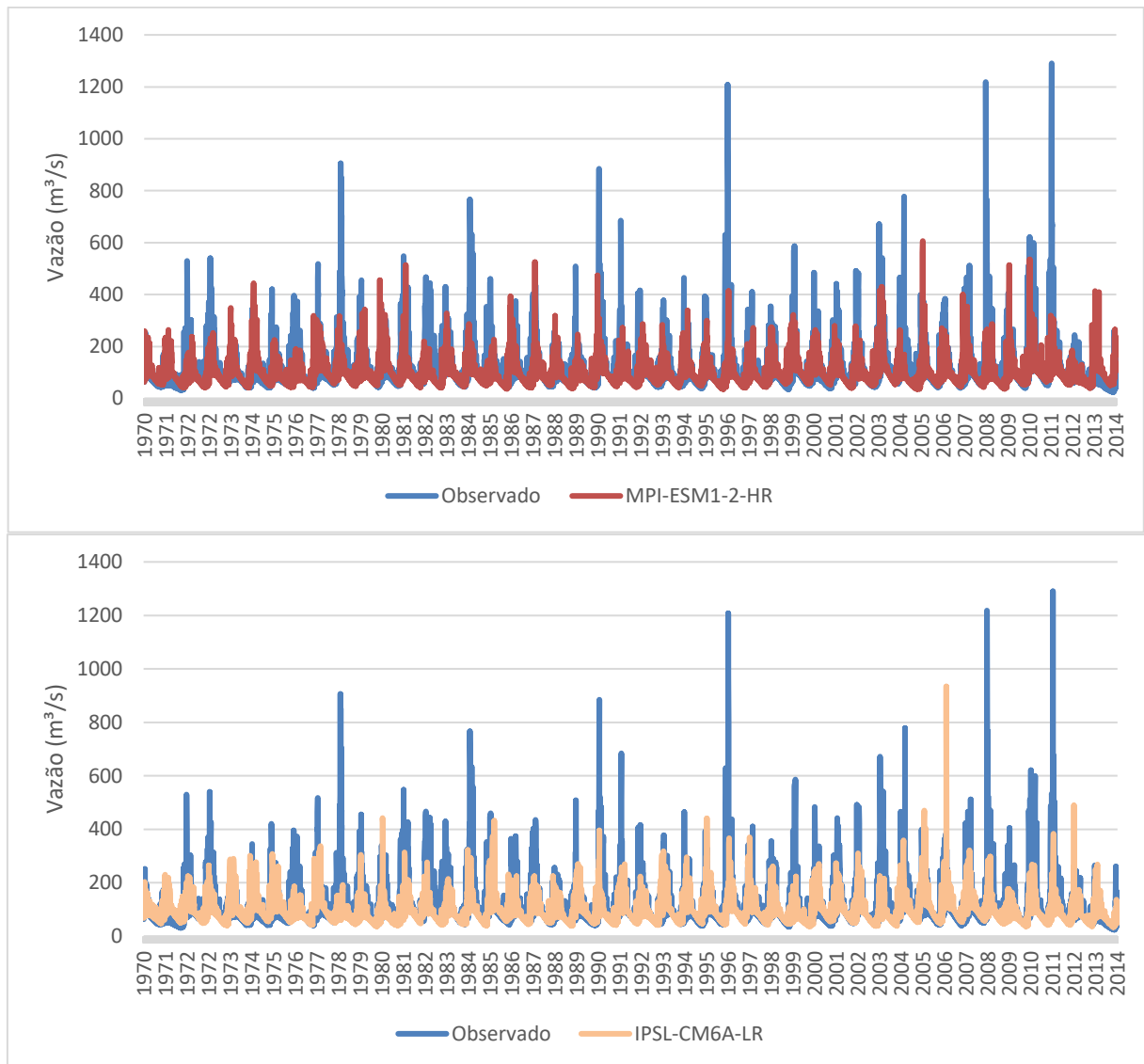


Figura 9 - Comparação entre os hidrogramas dos dados históricos observados e dos dados históricos simulados para os modelos MPI (acima) e IPSL (abaixo).

Continuando a análise comparativa dos dados históricos, a Figura 10 apresenta a climatologia mensal das vazões para a mesma sub-bacia considerada anteriormente. É fundamental essa análise climatológica para avaliar a acurácia de cada modelo em representar as condições hidrológicas sazonais históricas da área de estudo e o desempenho dos modelos na modelagem dos cenários futuros.

Embora tenham subestimado um pouco a vazão, ambos modelos representaram bem a sazonalidade hidrológica da região, assim possibilitando a aplicação destes modelos na simulação dos cenários futuros.

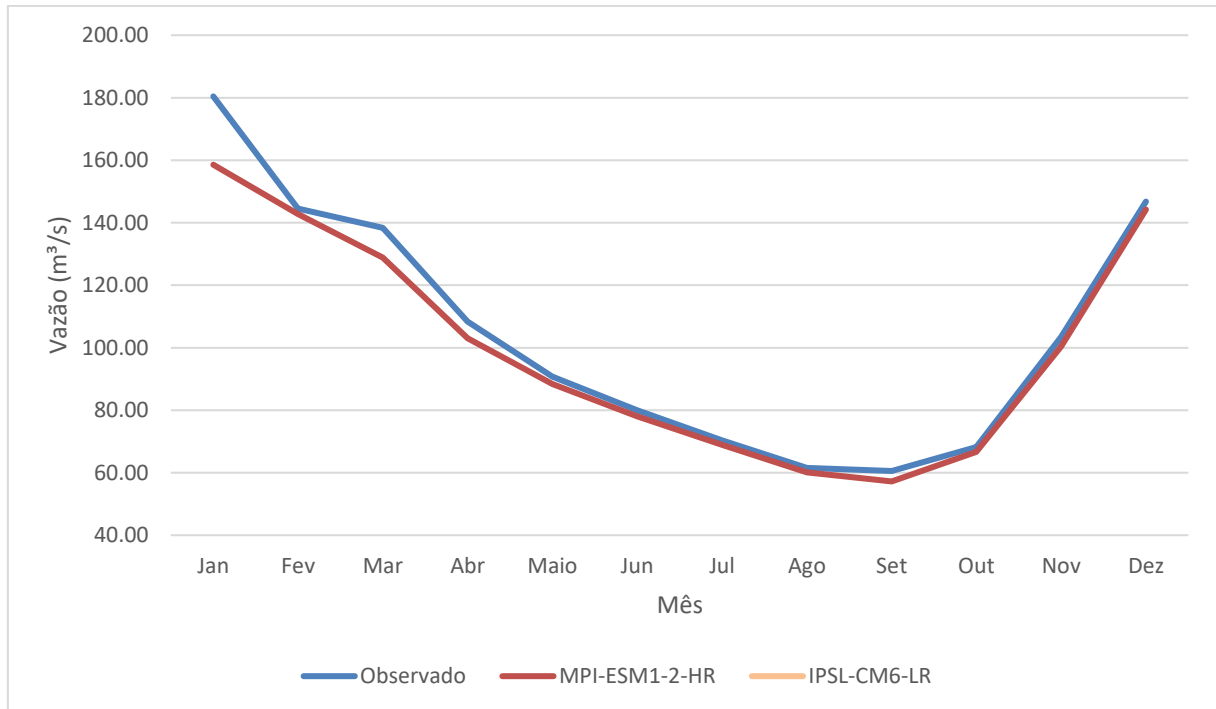


Figura 10 - Climatologia das vazões no período histórico para os dados observados e dados simulados pelos modelos MPI e IPSL.

Durante o verão, a diferença entre os dados observados e de modelos se tornou maior, com a subestimativa dos modelos aumentando, enquanto durante o inverno os modelos representaram melhor as condições hidrológicas históricas, embora a subestimativa tenha se mantido. Partindo dessa primeira consideração, a menor precisão durante a estação chuvosa pode ser atribuída a complexidade inerente à modelagem desses períodos por modelos climáticos e meteorológicos (BARBOSA, 2024). Consequência do aquecimento superficial maior, comparado com outras estações do ano, durante o verão há maior atividade convectiva local, contribuindo para intensificar a variabilidade do regime de precipitação, através do aumento de chuvas convectivas usualmente de pequena escala, e dificultar a previsão e modelagem meteorológica (ZHAO *et al.*, 2024).

De forma análoga, a precisão da modelagem aumenta durante as outras estações. A menor volatilidade do clima e a menor incidência de eventos extremos de precipitação e vazão durante estações de transição, mas principalmente durante o inverno, contribuíram para o aumento significativo da performance dos modelos.

4.1.2. Período Futuro

Para a análise da influência dos cenários de mudanças climáticas na vazão da área de estudo, foram utilizadas as simulações dos períodos históricos dos modelos como ponto de referência. Desta forma, através da comparação entre as simulações dos períodos futuros e do período histórico, torna-se possível avaliar o impacto das alterações climáticas no padrão hidrológico da área de estudo. Assim como feito na comparação entre períodos históricos na seção anterior, as comparações realizadas consideraram a sub-bacia do rio Piranga. A Figura 11 apresenta os resultados obtidos pelos dois cenários do modelo MPI e a Figura 12, os resultados obtidos pelos dois cenários do modelo IPSL.

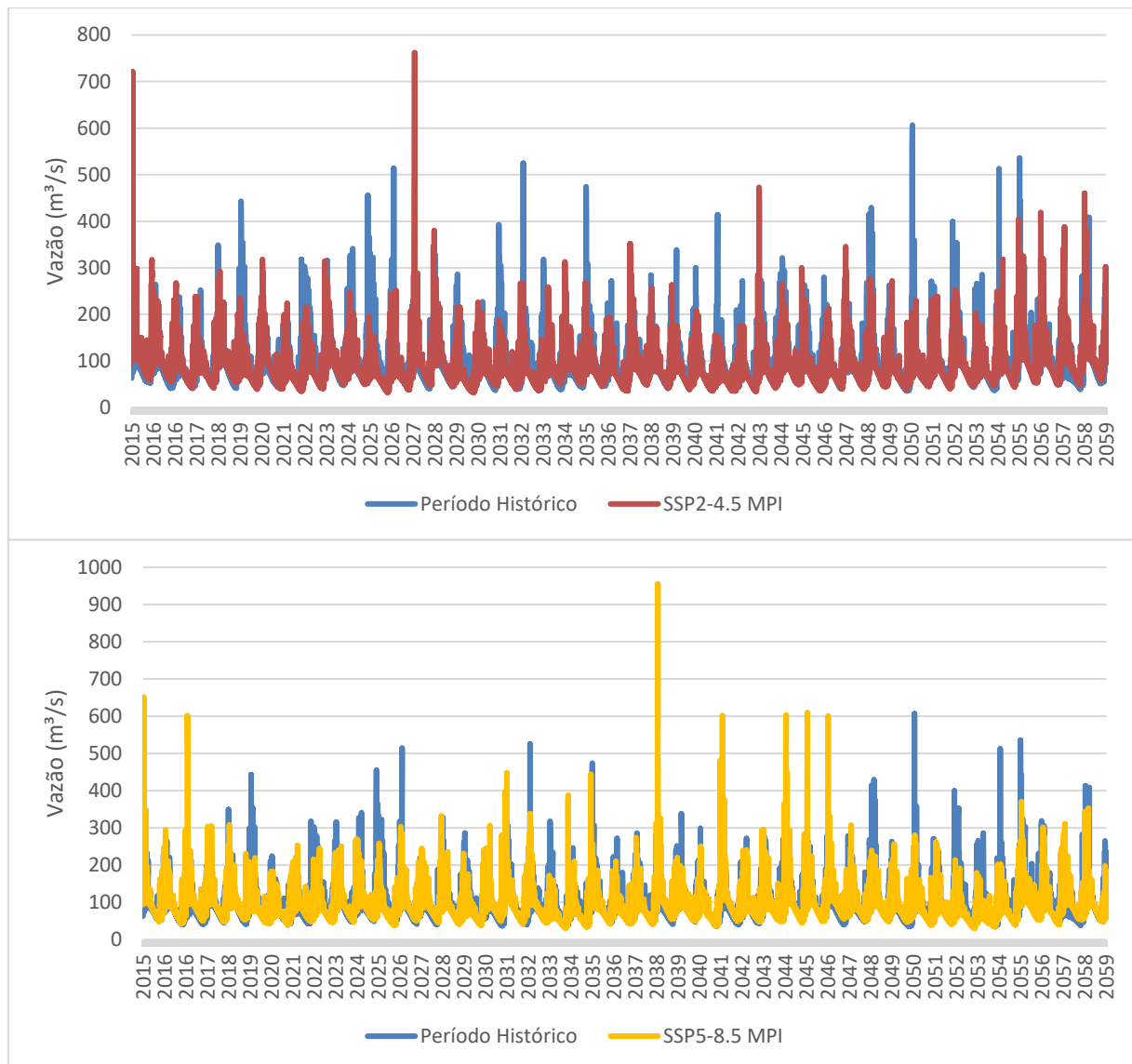


Figura 11 - Comparação entre os hidrogramas os dados do período histórico e do período futuro dos cenários SSP2-4.5 (acima) e SSP5-8.5 (abaixo) do modelo MPI-ESM1-2-HR.

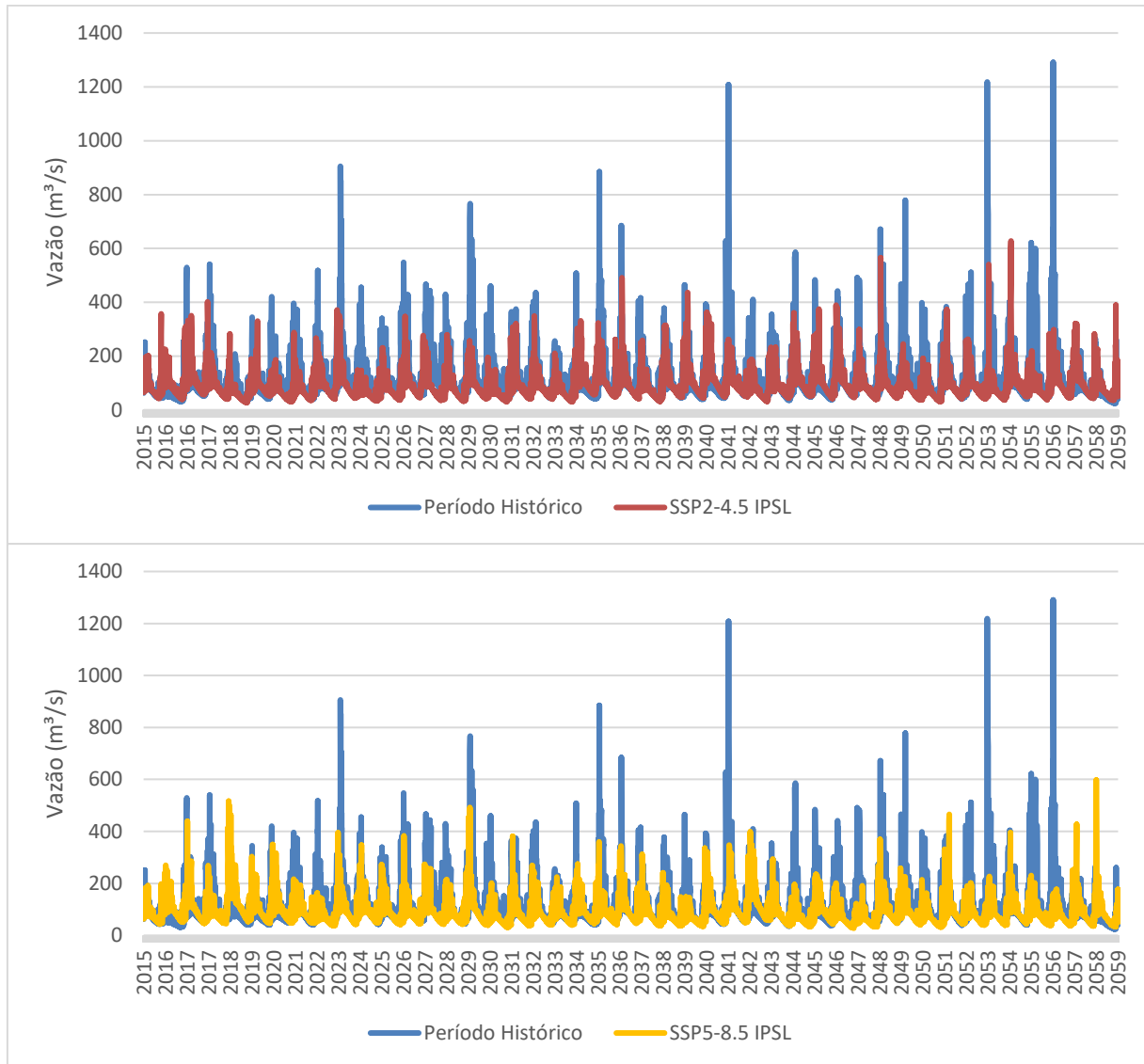


Figura 12 - Comparação entre os hidrogramas os dados do período histórico e do período futuro dos cenários SSP2-4.5 (acima) e SSP5-8.5 (abaixo) do modelo IPSL-CM6A-LR.

Entre os dois modelos considerados, os resultados obtidos pelo MPI em ambos cenários representam melhor a tendência histórica do modelo. Ainda sobre este modelo, o cenário SSP2-4.5 projeta eventos extremos de vazão em menor intensidade e frequência, enquanto o SSP5-8.5 projeta aumento destes em frequência e intensidade, o que é atribuído ao aumento na frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação como consequência das mudanças climáticas.

Os mesmos cenários gerados pelo IPSL se mantiveram semelhantes, com padrão de vazão abaixo das vazões dos dados do período histórico e poucos eventos extremos.

Nas análises de climatologia dos modelos, apresentadas na Figura 13, a condição anterior, em que os modelos apresentaram valores subestimados, se manteve, embora a subestimativa tenha diminuído para os cenários SSP5-8.5 de ambos os modelos.

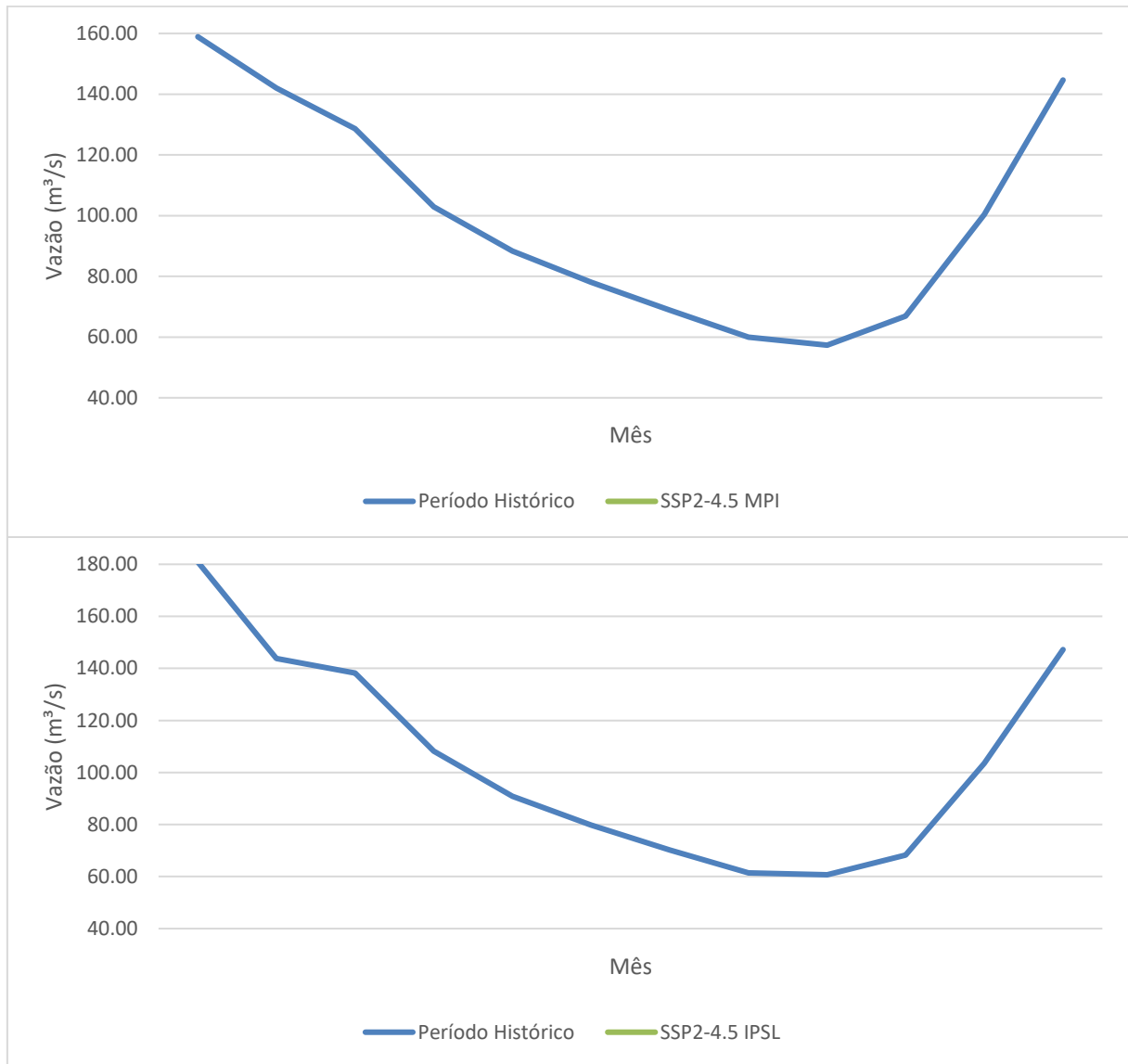


Figura 13 - Climatologia dos dados de vazões do período histórico e do período futuro dos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos MPI-ESM1-2-HR e IPSL-CM6A-LR.

4.2. Simulação Hidrodinâmica

De modo a simular o escoamento bidimensional na confluência dos rios Piranga e do Carmo, foram inseridos no HEC-RAS os dados de contorno e de terreno processados anteriormente, e o coeficiente de rugosidade de Manning.

Foram selecionados dois dias para cada cenário e modelo para realizar a simulação hidrodinâmica bidimensional, para os períodos de 2020 a 2040 e 2040 a 2060. O período de simulação foi de 4 meses, sendo 2 meses antes do evento e 2 meses depois, e todos os eventos extremos observados pelos resultados da modelagem chuva-vazão do MGB ocorreram durante as estações chuvosas. As datas selecionadas foram:

Para o modelo MPI-ESM1-2-HR, foram selecionadas as datas:

- Modelo MPI-ESM1-2-HR:
 - Cenário SSP2-4.5: 23/01/2028 e 22/12/2043;
 - Cenário SSP5-8.5: 18/01/2039 e 11/01/2046.
- Modelo IPSL-CM6A-LR:
 - Cenário SSP2-4.5: 05/02/2037 e 20/01/2055;
 - Cenário SSP5-8.5: 21/01/2030 e 28/12/2058.

4.2.1. Resultados

De modo a se ter uma base da vazão, profundidade e área alagada, no período simulado do MPI, cenário SSP5-8.5, foi retirado um horário de baixa vazão e volume, do dia 05/02/2039, apresentado na Figura 14. No início do rio Doce, após a confluência, esta data apresentou valores de velocidade por volta de 0,6 m/s e profundidade de 1,5 m.

Na confluência e no início do rio Doce, durante períodos de volume e vazão normais, as velocidades de escoamento são *fortemente* influenciadas pela presença de ilhas, de modo que a variável aumenta de intensidade em virtude do afunilamento

entre as ilhas e diminui a jusante delas. Com o encontro das águas dos rios, a velocidade de escoamento no início do rio Doce aumenta, sendo principalmente influenciada pela velocidade do rio Piranga.

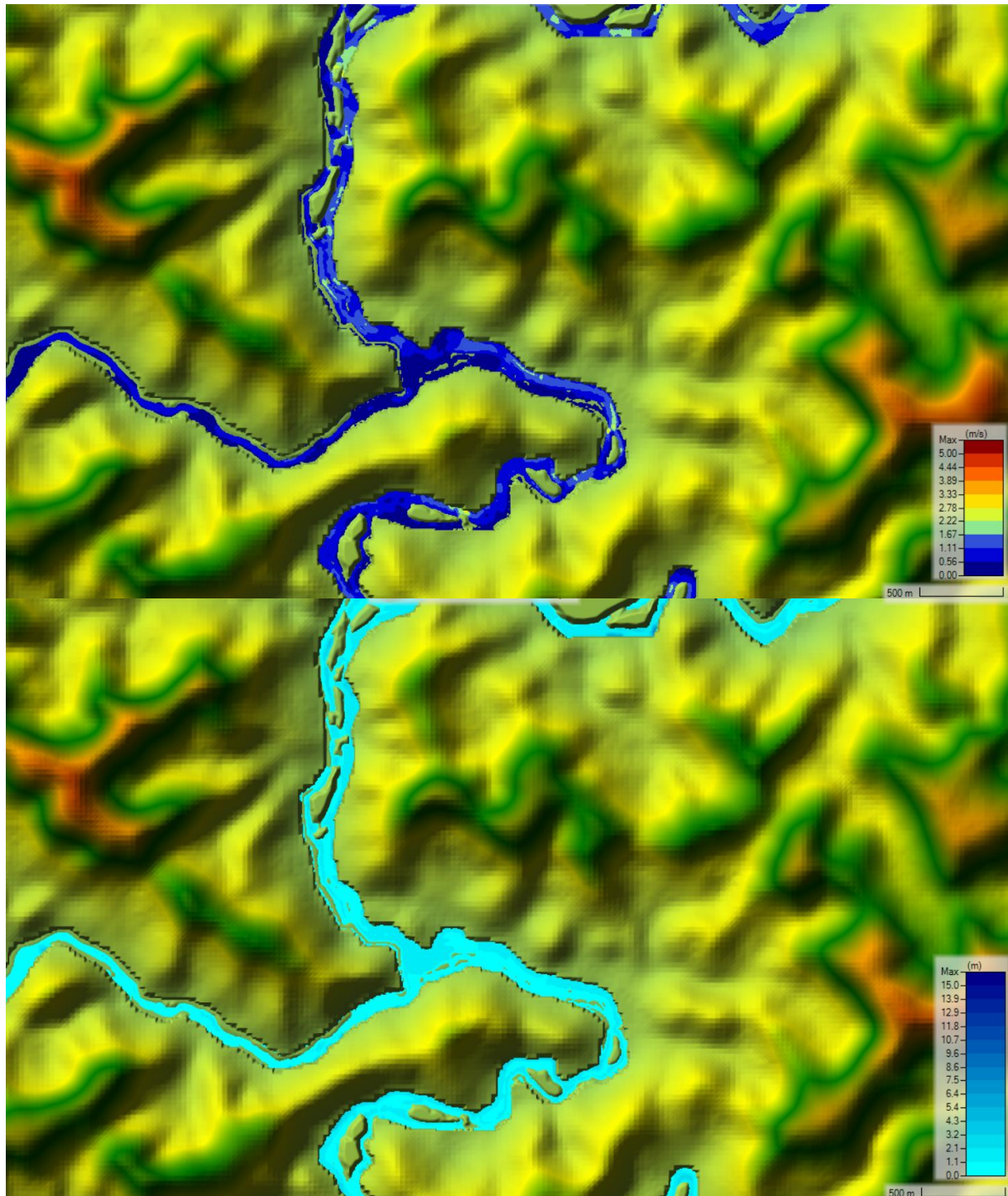


Figura 14 - Condição de vazão (acima) e profundidade (abaixo) para a área de estudo do modelo MPI, cenário SSP5-8.5.

Como a simulação hidrodinâmica foi realizada considerando eventos de vazão maiores que 400 m³/s no rio Piranga, a influência das ilhas na confluência diminui

porque, de acordo com Marciano (2024), elas se encontram constantemente inundadas durante as estações de chuva. O efeito de baixa velocidade a jusante das ilhas que se encontram sobre o nível da água mesmo durante esses eventos também é minimizado, em virtude do maior volume.

Para comparação, as figuras abaixo trazem as simulações de vazão e profundidade para os modelos MPI-ESM1-2-HR (Figura 15 e Figura 16, respectivamente) e IPSL-CM6A-LR (Figura 17 e Figura 18, respectivamente) são apresentadas.

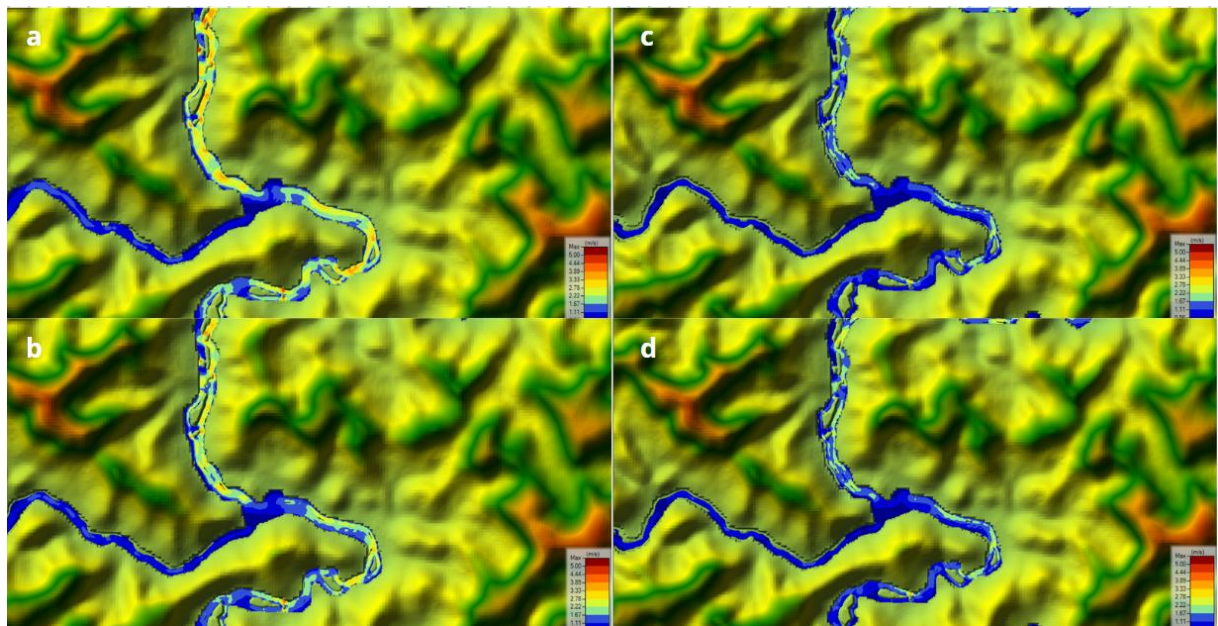


Figura 15 - Condição de vazão para a área de estudo do modelo MPI, para o cenário SSP2-4.5 (a e b) e o cenário SSP5-8.5 (c e d), considerando o período de futuro próximo (a e c) e futuro médio (b e d).

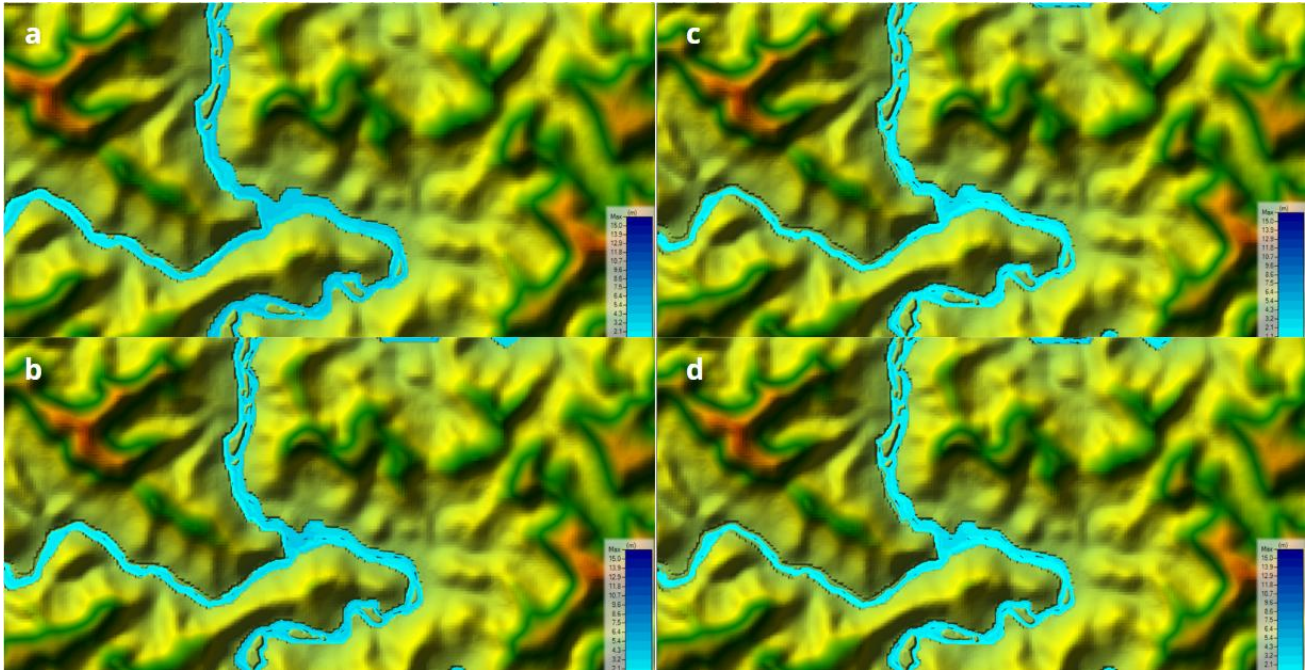


Figura 16 - Condição de profundidade para a área de estudo do modelo MPI, para o cenário SSP2-4.5 (a e b) e o cenário SSP5-8.5 (c e d), considerando o período de futuro próximo (a e c) e futuro médio (b e d).

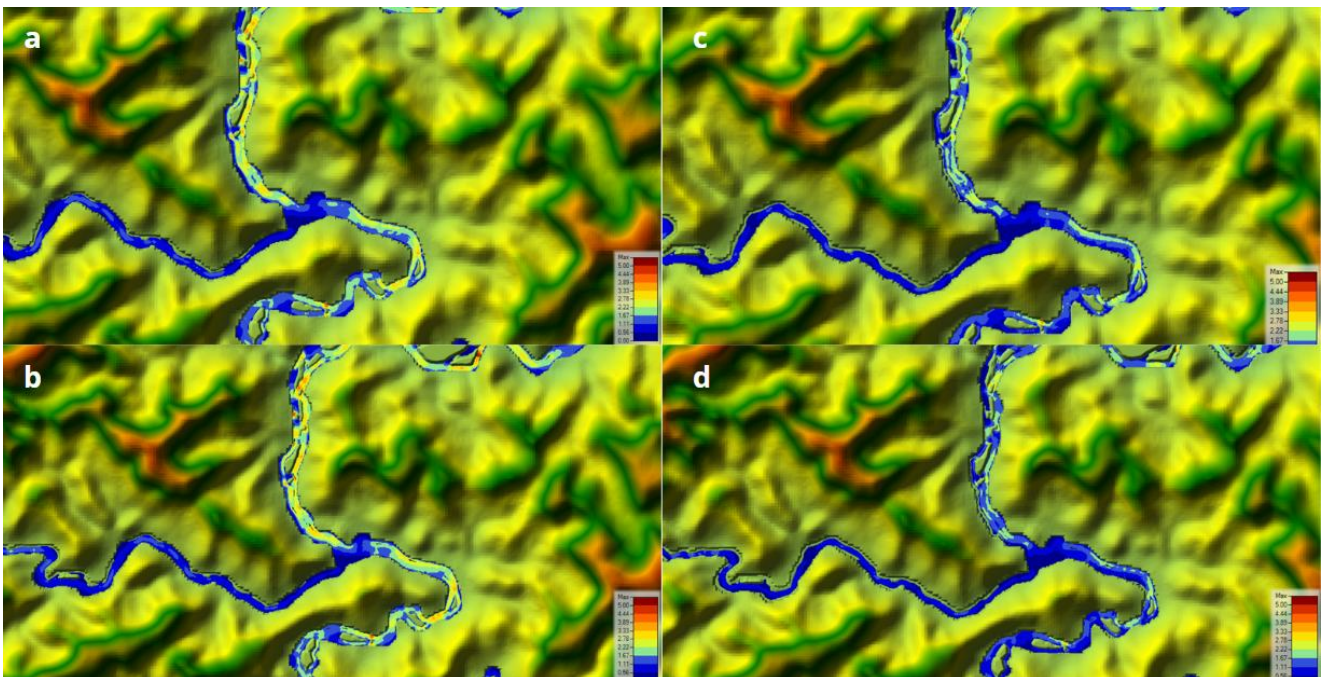


Figura 17 - Condição de vazão para a área de estudo do modelo IPSL, para o cenário SSP2-4.5 (a e b) e o cenário SSP5-8.5 (c e d), considerando o período de futuro próximo (a e c) e futuro médio (b e d).

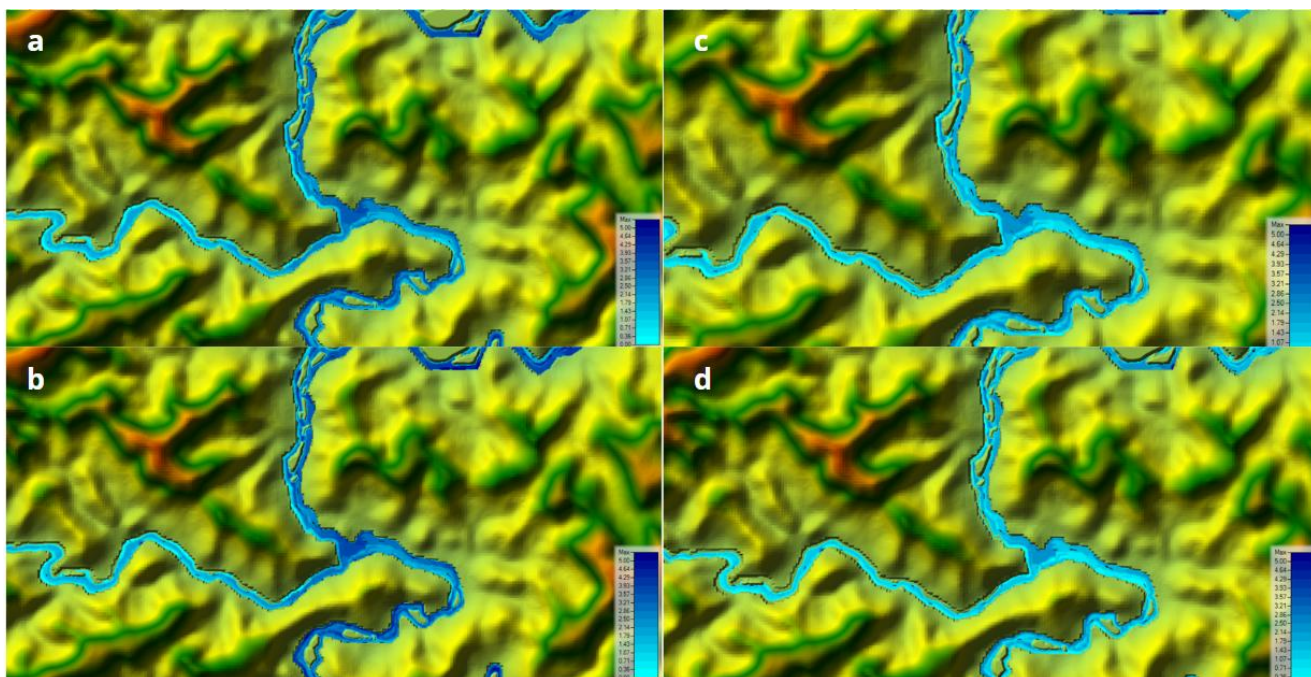


Figura 18 - Condição de profundidade para a área de estudo do modelo IPSL, para o cenário SSP2-4.5 (a e b) e o cenário SSP5-8.5 (c e d), considerando o período de futuro próximo (a e c) e futuro médio (b e d).

A área molhada dos rios variou pouco nessa região durante os eventos, consequência da topografia local, sendo que as áreas inundadas foram majoritariamente margens e ilhas com baixa elevação. Dito isso, a variação de profundidade e velocidade foram relevantes. Enquanto nos eventos menos intensos foram encontradas velocidade entre 1,5 e 1,8 m/s no início do rio Doce e profundidade por volta de 2 metros, os eventos mais intensos apresentaram velocidades superiores a 2 m/s e profundidades maiores que 3 m. A Tabela 3 apresenta os valores de velocidade de escoamento e profundidade encontradas em cada simulação.

Tabela 3 - Apresentação de velocidade de escoamento e profundidade das simulações hidrodinâmicas.

MPI-ESM1-2-HR							
SSP2-4.5				SSP5-8.5			
23/01/2028		22/12/2043		14/01/2039		10/01/2046	
Vel. (m/s)	Prof. (m)	Vel. (m/s)	Prof. (m)	Vel. (m/s)	Prof. (m)	Vel. (m/s)	Prof. (m)
2,8	4	2,5	3	1,5	2,1	1,6	2,2
IPSL-CM6A-LR							
SSP2-4.5				SSP5-8.5			
05/02/2037		20/01/2055		21/01/2030		28/12/2058	
Vel. (m/s)	Prof. (m)	Vel. (m/s)	Prof. (m)	Vel. (m/s)	Prof. (m)	Vel. (m/s)	Prof. (m)
2,1	3,5	2,5	3,7	1,6	2,4	1,5	2,2

5. CONCLUSÃO

Durante as simulações, foi observado que a influência das mudanças climáticas no padrão do escoamento na confluência dos rios Piranga e do Carmo, através dos dados obtidos do MGB, resultou em um decréscimo na vazão média anual, enquanto eventos extremos de vazão permanecem com intensidade semelhante ou maior que os dados históricos observados e com frequência semelhante a atual ou pouco maior, o que corrobora o apresentado pelo IPCC sobre a tendência do padrão das chuvas para a região sudeste da América do Sul, que eventos extremos de precipitação tendem a aumentar em frequência e intensidade enquanto a média anual de precipitação não varia ou varia pouco (IPCC, 2021). Dito isso, é importante ressaltar que aqui é considerado um período de 2015 a 2060, e é provável que durante o período de 2060 a 2100 as mudanças em decorrência do aquecimento global sejam mais pronunciadas.

Quanto aos modelos, como demonstrado por Oliveira *et al.* (2023), o MPI, em ambos cenários e nos dados históricos, representaram melhor a realidade da área de estudo. Além disso, este modelo apresentou mais eventos extremos de vazão que os cenários do IPSL, sendo que o cenário SSP2-4.5, mais otimista, projetou eventos extremos “mais amenos”, com poucos picos de vazão acima de 600 m³/s e nenhum acima de 800 m³/s, enquanto o cenário SSP5-8.5 projetou diversos picos acima de 600 m³/s e somente um acima de 800 m³/s.

Os resultados no âmbito da mancha de inundação obtidos das simulações apresentam que, durante eventos intensos na confluência de estudo, não houveram grandes transbordamentos, o que corrobora com o discutido por Marciano (2024), por conta do “encaixe do curso d’água na topografia.” Dito isso, algumas ilhas da confluência que tem potencial para ser inundadas estiveram sob o nível de água durante todo o período.

6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G. S.; SALOMÃO, G.; DALL'AGNOL, R.; TARANTINO, R.; MEREIDOS, L.; SAHOO, P.; PONTES, P. R. M.; SILVA, E. V.; MARQUES, E. D.; LEÃO, L. P.; SOARES, A.; MENDONÇA, R. Hydrogeochemical Process, Evaluation of Pollution Source Apportionment and Baseline Characteristics of Surface Water in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **SSRN**, 42p., 2024. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5034639>.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Encarte Especial sobre a bacia do rio Doce: Rompimento da barragem em Mariana/MG**. Brasília: 2016. Disponível em: https://sb.fgv.br/catalogo/index.asp?codigo_sophia=225204. Acesso em: 10 maio 2024.

ARNDT, I.; VOIGT, S.; PETSCHICK, R.; HOU, A.; RADDATZ, J.; ALBUQUERQUE, A. L. S.; BAHR, A. Spatiotemporal Discharge Variability of the Doce River in SE Brazil During MIS 6 and 5. **Frontiers in Earth Science**, v. 10. P. 864381, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.864381>.

BARBOSA, M. A. **Análise da influência das mudanças climáticas no aproveitamento hidroenergético da bacia hidrográfica do rio Sapucaí**. 2024. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2024.

BOUCHER, O. *et al.* Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 12, n. 7, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>.

CAMPANA, K. D. S. Simulação do transporte de sedimentos em trecho do rio Doce (ES) utilizando modelagem computacional. **Destarte**, v. 11, n. 2, p. 95-130, 2022. Disponível em: <https://estacio.periodicoscientificos.com.br/index.php/destarte/article/download/1505/1249>. Acesso em: 11 abr. 2024.

CAMPOS, J. A.; SILVA, D. D.; PIRES, G. F.; FERNANDES, E. I. F.; AMORIM, R. S. S.; MENEZES, F. C. M.; RIBEIRO, C. B. M.; LORENTZ, J. F.; AIRES, U. R. V. Modeling environmental vulnerability for 2050 considering different scenarios in the Doce River Basin, Brazil. **Water**, v. 16, n. 10, p. 1459, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w16101459>.

CBH-DOCE – Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Doce. A bacia do rio Doce, 2016. Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>.

CHANG, X.; GAO, F.; GONG, Z.; HU, T.; SUN, S. Hydrological drivers of groundwater recharge changes under different emission scenarios in agricultural lands. **EGUsphere** [preprint]. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3186>.

CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics**. McGraw-Hill Book Company. New York, 507-510, 1959. Disponível em: <https://heidarpour.iut.ac.ir/sites/heidarpour.iut.ac.ir/files/u32/open.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2024.

CLARKE, L.; EDMONDS, J.; KREY, V.; RICHELIS, R.; ROSE, S.; TAVONI, M. International climate policy architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios. **Energy Economics**, v. 31, n. 2, p. S64-S81, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2009.10.013>.

COELHO, A. L. N. **Alterações Hidrogeomorfológicas no Médio-Baixo Rio Doce/ES**. Tese (Doutorado em Geografia, Área de concentração: Ordenamento Territorial Ambiental) –

Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal Fluminense, Niterói. Rio de Janeiro, 2007.

COELHO, A. L. N. Bacia hidrográfica do Rio Doce (MG/ES): uma análise socioambiental integrada. **Geografares**, n. 7, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/geografares/article/download/156/82>. Acesso em: 15 maio 2024.

COELHO, C. D. **Identificação de regiões homogêneas e geração de relações geomorfológicas de canais: impactos na modelagem hidrodinâmica em grandes bacias hidrográficas**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. Minas Gerais, 2020.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for largescale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>.

CUPOLILLO, F.; ABREU, M. L.; VIANELLO, R. L. Climatologia da Bacia do Rio Doce e sua relação com a topografia local. **Revista Geografias**, v. 4, n. 2, p. 45-60, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.35699/2237-549X.13251>.

DIAS, C. A.; COSTA, A. S. V.; GUEDES, G. R.; UMBELINO, G. J. M.; SOUSA, L. G.; ALVES, J. H.; SILVA, T. G. M. Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce. **Espinhaço**, v. 7, n. 1, p. 21-35, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3952940>.

DOYLE, F. J. Digital Terrain Models. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 44, n. 12, p. 1481-1485, Reston, VA (USA), 1978.

EDENHOFER, O.; PICHS-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; FARAHANI, E.; KADNER, S.; SEYBOTH, K.; ADLER, A.; BAUM, I.; BRUNNER, S.; EICKEMEIER, P.; KRIEMANN, B.; SAVOLAINEN, J.; SCHLÖMER, S.; VON STECHOW, C.; ZWICKEL, T.; MINX, J. C. (eds.). IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Satélites de Monitoramento, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento>.

EPIPHANIO, J. C. N. CBERS-3/4: características e potencialidades. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: INPE, 2011. p. 9009.

FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P.R.M.; COLLISCHONN, W. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11, 2015, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: 2015.

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. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/229590>.

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, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616009>.

FERNANDEZ, P.; MOURATO, S.; MOREIRA, M. Comparação dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na delimitação de zonas inundáveis. **Revista Recursos Hídricos**, v. 34, n. 1, p. 63-73, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5894/rh34n1-5>.

FOESCH, M. D. S.; FRANCELINO, M. R.; ROCHA, P. A.; GOMES, A. R. L. River water contamination resulting from the Mariana Disaster, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 4, p. e20180132, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.013218>.

FUJINO, J.; NAIR, R.; KAINUMA, M.; MASUI, T.; MATSUOKA, Y. Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using aim global model. **The Energy Journal**, v. 27, n. 3, p. 343-354, 2006. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/23297089>. Acesso em: 19 maio 2024.

GIORGETTA, M. A. *et al.* Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 5, n. 3, p. 572-597, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jame.20038>.

GOLDER (2016). Avaliação dos Impactos do Meio Físico resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão. Relatório número RT-023_159-515-2282_00-J, preparado para Samarco Mineração S.A, 2016.

GUTJAHR, O.; PUTRASAHAN, D.; LOHMANN, K.; JUNGCLAUS, J. H.; STORCH, J. S.; BRÜGGEMANN, N.; HAAK, H.; STÖSSEL, A. Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 7, p. 3241-3281, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3241-2019>.

HATJE, V.; PEDREIRA, R. M. A.; REZENDE, C. E.; SCHETTINI, C. A. F.; SOUZA, G. C.; MARIN, D. C.; HACKSPACHER, P. C. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 10706, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x>.

HIJIOKA, Y.; MATSUOKA, Y.; NISHIMOTO, H.; MASUI, T. Global GHG emission scenarios under GHG concentration stabilization targets. **Journal of Global Environmental Engineering**, v. 13, p. 97-108, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/279549757_Global_GHG_emission_scenarios_under_GHG_concentration_stabilization_targets. Acesso em: 19 maio 2024.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. **Journal of Hydrology**, v. 268, n. 1-4, p. 87-99, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00121-X).

HOUDIN, F.; RIO, C.; GRANDPEIX, J. Y.; MADELEINE, J. B.; CHERUY, F.; ROCHETIN, N.; JAM, A.; MUSAT, I.; IDELKADI, A.; FAIRHEAD, L.; FOUJOLS, M. A.; MELLUL, L.; TRAORE, A. K.; DUFRESNE, J. L.; BOUCHER, O.; LEFEBVRE, M. P.; MILLOUR, E.; VIGNON, E.; JOUHAUD, J.; DIALLO, F. B.; LOTT, F.; GASTINEAU, G.; CAUBEL, A.; MEURDESOLF, Y.; GHATTAS, J. LMDZ6A: The Atmospheric Component of the IPSL Climate Model With Improved and Better Tuned Physics. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 12, n. 7, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2019MS001892>.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Rompimento da Barragem de Fundão: Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG, 2016. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/informes/rompimento-da-barragem-de-fundao>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. A Bacia do Rio Doce: estudo geográfico. Rio de Janeiro: SERGRAF do IBGE, 1955. 199p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malha Municipal, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Catálogo de Imagens. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/explore>.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. CBERS 04a, 2019. Disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br/sobre/cameras/cbbers04a.php>.

JIANG, F.; WEN, S.; GAO, M.; ZHU, A. Assessment of NEX-GDDP-CMIP6 Downscale Data in Simulating Extreme Precipitation over the Huai River Basin. **Atmosphere**, v. 14, n. 10, p. 1497, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos14101497>.

KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; HALLEGATTE, S.; EBI, K. L.; RIAHI, K.; WINKLER, H.; VAN VUUREN, D. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared climate policy assumptions. **Climatic Change**, v. 122, p. 401-414, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0971-5>.

LAIPELT, L.; ANDRADE, B. C.; COLLISCHONN, W.; TEIXEIRA, A. A.; PAIVA, R. C. D.; RUHOFF, A. ANADEM: A Digital Terrain Model for South America. **Remote Sensing**, v. 16, n. 13, p. 2321, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16132321>.

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

LYRA, B. U.; RIGO, D. Deforestation impact on discharge regime in the Doce River Basin. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 4, p. e2370, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2370>. Acesso em: 15 maio 2024.

MADEC, G.; BOURDALLÉ-BADIE, R.; BOUTTIER, P. A.; BRICAUD, C.; BRUCIAFERRI, D.; CALVERT, D.; CHANUT, J.; CLEMENTI, E.; COWARD, A.; DELROSSO, D.; ETHÉ, C.; FLAVONI, S.; GRAHAM, T.; HARLE, J.; IOVINO, D.; LEA, D.; LÉVY, C.; LOVATO, T.; MARTIN, N.; MASSON, S.; MOCABERO, S.; PAUL, J.; ROUSSET, C.; STORKEY, D.; STORTO, A.; VANCOPPENOLLE, M. **NEMO ocean engine**. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3248739>.

MAGRIS, R. A.; MARTA-ALMEIDA, M.; MONTEIRO, J. A. F.; BAN, N. C. A modelling approach to assess the impact of land mining on marine biodiversity: Assessment in coastal catchments experiencing catastrophic events (SW Brazil). **Science of The Total Environment**, v. 659, p. 828-840, abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.238>.

MARCIANO, A. G. **Caracterização da hidrodinâmica e do transporte de sedimentos dos três principais afluentes do rio Doce**. 2024. 266 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2024.

MARCIANO, A. G.; ASSIREU, A. T.; AZEVEDO, S. C.; SILVA, B. C.; ABREU, A. T.; NALINI, H. A. Jr. Mudanças intensas na morfologia da confluência impulsional por um pulso hidrológico extremo: impactos na restauração do Rio Doce. **Revista Brasileira de**

Recursos Hídricos, v. 29, p. 9, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230139>.

MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇİ, O.; YU, R.; ZHOU, B. (eds.). IPCC, 2021: Summary for Policymakers. *In*: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 3–32. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.

MCCUEN, R. H.; KNIGHT, Z.; CUTTER, A. G. Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 11, n. 6, p. 597, 2006. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597)).

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

MOHAMMAD, M. E.; AL-ANSARI, N.; ISSA, I. E.; KNUTSSON, S. Sediment in Mosul Dam reservoir using the HEC-RAS model. **Lakes & Reservoirs: Research & Management**, v. 21, n. 3, p. 235-244, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/lre.12142>.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 7282, p. 747-756, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature08823>.

MUKUL, M.; SRIVASTAVA, V.; JADE, S.; MUKUL, M. Uncertainties in the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 41672, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep41672>.

NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6). 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.7917/OFSG3345>.

NAZARENKO, L.; SCHMIDT, G. A.; MILLER, R. L.; TAUSNEV, N.; KELLEY, M.; RUEDY, R.; RUSSELL, G. L.; ALEINOV, I.; BAUER, M.; BAUER, S.; BLECK, R.; CANUTO, V.; CHENG, Y.; CLUNE, T. L.; DEL GENIO, A. D.; FALUVEGI, G.; HANSEN, J. E.; HEALY, R. J.; KIANG, N. Y.; KOCH, D.; LACIS, A. A.; LEGRANDE, A. N.; LERNER, J.; LO, K. K.; MENON, S.; OINAS, V.; PERLWITZ, J.; PUMA, M. J.; RIND, D.; ROMANOU, A.; SATO, M.; SHINDELL, D. T.; SUN, S.; TSIGARIDIS, K.; UNGER, N.; VOULGARAKIS, A.; YAO, M. S.; ZHANG, J. Future climate change under RCP emission scenarios with GISS ModelE2. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 7, n. 1, p. 244-267, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2014MS000403>.

O'NEILL, B. C.; CARTER, T. R.; EBI, K.; HARRISON, P. A.; KEMP-BENEDICT, E.; KOK, K.; KRIEGLER, E.; PRESTON, B. L.; RIAHI, K.; SILLMANN, J.; RUIJVEN, B. J.; VUUREN, D.; CARLISLE, D.; CONDE, C.; FUGLESTVEDT, J.; GREEN, C.; HASEGAWA, T.; LEININGER, J.; MENTEITH, S.; PICHS-MADRUGA, R. Achievements and needs for the climate change

scenario framework. **Nature Climate Change**, v. 10, p. 1074-1084, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00952-0>.

O'NEILL, B. C.; KRIEGLER, E.; EBI, K. L.; KEMP-BENEDICT, E.; RIAHI, K.; ROTHMAN, D. S.; RUIJVEN, B. J.; VUUREN, D. P.; BIRKMANN, J.; KOK, K.; LEVY, M.; SOLECKI, W. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 169-180, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>.

OLIVEIRA, D. M.; RIBEIRO, J. G. M.; FARIA, L. F.; REBOITA, M. S. Performance dos modelos climáticos do CMIP6 em simular a precipitação em subdomínios da América do Sul no período histórico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 1, p. 116-133, 2023. <https://doi.org/10.26848/rbqf.v16.1.p116-133>.

OLIVEIRA, R. F.; ZOLIN, C. A.; VICTORIA, D. C.; LOPES, T. R.; VENDRUSCULO, L. G.; PAULINO, J. 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, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201800812>.

PIMENTA, J. V.; OLIVEIRA, M. M.; BARROS, N. O.; ASSIREU, A. Derivadores rastreados por satélite aplicados a ambientes fluviais: aplicação para estudos acerca da recuperação do rio doce. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2023, Florianópolis. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos, INPE, 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/derivadores-rastreados-por-satelite-aplicados-a-ambientes-fluviais-aplicacao-par?lang=pt-br>. Acesso em: 15 maio 2024.

PIRES, A. P. F.; REZENDE, C. L.; ASSAD, E. D.; LOYOLA, R.; SCARANO, F. R. Forest Restoration can increase the Rio Doce watershed resilience. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 3, p. 187-193, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.08.003>.

RAO, S.; RIAHI, K. The role of non-CO₂ greenhouse gases in climate change mitigation: long-term scenarios for the 21st century. **The Energy Journal**, v. 27, n. 3, p. 177-200, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-VolSI2006-NoSI3-9>.

RIAHI, K.; GRÜBLER, A.; NAKICENOVIC, N. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 74, n. 7, p. 887-935, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.026>.

RIAHI, K.; VUUREN, D. P.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B. C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CUARESMA, J. C.; KC, S.; LEIMBACH, M.; JIANG, L.; RAO, S.; EMMERLING, J.; EBI, K.; TAVONI, M. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153-168, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

SANTOS, F. C.; SILVA, B. C. Ajuste do modelo MGB-IPH à Bacia do Rio Sapucaí para aplicação em previsões de vazão. In: Simpósio de Iniciação Científica, 5., 2022, Itajubá. Itajubá: UNIFEI, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/1307153.1-105>.

SEGURA, F. R.; NUNES, E. A.; PANIZ, F. P.; PAULELLI, A. C. C.; RODRIGUES, G. B.; BRAGA, G. U. L.; PEDREIRA, W. R. F.; BARBOSA, F. Jr.; CERCHIARO, G.; SILVA, F. F.; BATISTA, B. L. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento

Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution**, v. 218, p. 813-825, nov. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.005>.

SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; CALVO BUENDIA, E.; MASSON-DELMOTTE, V.; PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D. C.; ZHAI, P.; SLADE, R.; CONNORS, S.; VAN DIEMEN, R.; FERRAT, M.; HAUGHEY, E.; LUZ, S.; NEOGI, S.; PATHAK, M.; PETZOLD, J.; PORTUGAL PEREIRA, J.; VYAS, P.; HUNTLEY, E.; KISSICK, K.; BELKACEMI, M.; MALLEY, J. (eds.). IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 896 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157988>.

SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; CALVO BUENDIA, E.; MASSON-DELMOTTE, V.; PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D. C.; ZHAI, P.; SLADE, R.; CONNORS, S.; VAN DIEMEN, R.; FERRAT, M.; HAUGHEY, E.; LUZ, S.; NEOGI, S.; PATHAK, M.; PETZOLD, J.; PORTUGAL PEREIRA, J.; VYAS, P.; HUNTLEY, E.; KISSICK, K.; BELKACEMI, M.; MALLEY, J. (eds.). IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 866 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157988>.

SILVA, J. M. C.; ARAUJO, L. S.; TORRES, R. R.; BARBOSA, L. C. F. The sustainability of development pathways and climate change vulnerability in the Americas. **Ecological Economics**, v. 220, p. 108164, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108164>.

SIQUEIRA, P. C. Cenários de uso do solo baseados na cobertura de Áreas de Preservação Permanente (APP) e simulação hidrológica na bacia do rio Sapucaí. 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, p. 274-287, 2016.

SMITH, S. J.; WIGLEY, T. M. L. Multi-gas forcing stabilization with Minicam. **The Energy Journal**, v. 27, n. 3, p. 373-391, 2006. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/23297091>. Acesso em: 19 maio 2024.

SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Seções Transversais Topobatimétricas na Bacia do Rio Doce, 2019. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3f40dc0f-fbb3-4b90-a640-9ce978f0fa3b>.

SONG, S.; SCHMALZ, B.; FOHRER, N. Simulation, quantification and comparison of in-channel and floodplain sediment processes in a lowland area – A case study of the Upper Stör catchment in northern Germany. **Ecological Indicators**, v. 57, p. 118-127, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.030>.

THRASHER, B.; MAURER, E. P.; MCKELLAR, C.; DUFFY, P. B. Technical Note: Bias correction climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 9, p. 3309-3314, 2012.

THRASHER, B.; WANG, W.; MICHAELIS, A.; MELTON, F.; LEE, T.; NEMANI, R. NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. **Scientific Data**, v. 9, n. 262, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>.

USACE - United States Army Corps of Engineers. HEC-RAS 2D User's Manual, 2016. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/latest>.

USACE - United States Army Corps of Engineers. HEC-RAS User's Manual, 2016. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest>.

USGS EROS – United States Geological Survey-Earth Resources Observation and Science. USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Non-Void Filled. Disponível em: <https://doi.org/10.5066/F7K072R7>

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfológicos locais em cobertura nacional. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2009, Natal, RN. Anais..., São José dos Campos, SP: INPE, 2009. v. CD-ROM. p. 1-8.

VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R. Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: reconciling the new with the old. **Climatic Change**, v. 122, p. 415-429, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0974-2>.

VAN VUUREN, D. P.; DEN ELZEN, M. G. J.; LUCAS, P. L.; EICKHOUT, B.; STRENGERS, B. J.; RUIJVEN, B.; WONINK, S.; VAN HOUDT, R. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. **Climatic Change**, v. 81, p. 119-159, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9172-9>.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J. F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, S. K. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic change**, v. 109, p. 5-31, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.

VAN VUUREN, D. P.; EICKHOUT, B.; LUCAS, P. L.; DEN ELZEN, M. G. J. Long-term multi-gas scenarios to stabilise radiative forcing - exploring costs and benefits within an integrated assessment framework. **The Energy Journal**, v. 27, n. 3, p. 201-234, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-VolSI2006-NoSI3-10>.

VAN VUUREN, D. P.; KRIEGLER, E.; O'NEILL, B. C.; EBI, K.; RIAHI, K.; CARTER, T. R.; EDMONDS, J.; HALLEGATTE, S.; KRAM, T.; MATHUR, R.; WINKLER, H. A new scenario framework for Climate Change Research: scenario matrix architecture. **Climatic Change**, v. 122, p. 373-386, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0906-1>.

WANG, F.; DUCHARNE, A.; CHERUY, F.; LO, M. H.; GRANDPEIX, J. Y. Impact of a shallow groundwater table on the global water cycle in the IPSL land-atmosphere coupled model. **Climate Dynamics**, v. 50, p. 3505-3522, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3820-9>.

WISE, M.; CALVIN, K.; THOMSON, A.; CLARKE, L.; BOND-LAMBERTY, B.; SANDS, R.; SMITH, S. J.; JANETOS, A.; EDMONDS, J. Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy. **Science**, v. 324, n. 5931, p. 1183-1186, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1168475>.

YAMAMOTO, F. Y.; PAULY, G. F. E.; NASCIMENTO, L. S.; FERNANDES, G. M.; SANTOS, M. P.; FIGUEIRA, R. C. L.; CAVALCANTE, R. M.; GRASSI, M. T.; ABESSA, D. M. S. Explaining the persistence of hazardous chemicals in the Doce River (Brazil) by multiple sources of contamination and a major environmental disaster. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 9, p. 100250, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100250>.

ZHAO, Z. WANG, Z.; ZHAO, G.; ZHAO, J. A new strong convective precipitation forecasting method based on attention mechanism and spatio-temporal reasoning. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 19024, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68951-1>.