

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

MARCELLE GRESSLER

**ALTERNATIVAS DE SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO DE
BARRAGEM DE REJEITOS NO SOFTWARE HEC-RAS: UMA
ANÁLISE COMPARATIVA**

Porto Alegre, 04 de outubro de 2022



MARCELLE GRESSLER

ALTERNATIVAS DE SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO DE BARRAGEM DE REJEITOS NO SOFTWARE HEC-RAS: UMA ANÁLISE COMPARATIVA

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE ENGENHEIRA AMBIENTAL.

Orientador: Fernando Mainardi Fan

Porto Alegre, 04 de outubro de 2022



Gressler, Marcelle
ALTERNATIVAS DE SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO DE BARRAGEM
DE REJEITOS NO SOFTWARE HEC-RAS: UMA ANÁLISE
COMPARATIVA / Marcelle Gressler. -- 2022.
98 f.
Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Coorientador: Arhur da Fontoura Tschiedel.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. DamBreak. 2. modelagem hidrodinâmica. 3. fluido
hiperconcentrado. 4. não-newtoniano. 5. barragem de
rejeitos. I. Fan, Fernando Mainardi, orient. II.
Tschiedel, Arhur da Fontoura, coorient. III. Título.



MARCELLE GRESSLER

ALTERNATIVAS DE SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO DE BARRAGEM DE REJEITOS NO SOFTWARE HEC-RAS: UMA ANÁLISE COMPARATIVA

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 11 de outubro de 2022 pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Éder Daniel Teixeira – Departamento de Obras Hidráulicas

.....
Prof. Dr. Maurício Andrades Paixão – Departamento de Obras Hidráulicas

.....
Msc. Marina Refatti Fagundes – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

Conceito:A



RESUMO

O setor de exploração mineral é um relevante setor da economia brasileira, ao qual está atrelada uma expressiva geração de resíduos, que são comumente dispostos em barramentos. Acidentes e incidentes envolvendo estas estruturas possuem potencial impacto ao vale de jusante, podendo causar perdas econômicas, sociais e ambientais. Nesse sentido, faz-se relevante o estudo dos impactos de eventuais rompimentos através de modelagens hidrodinâmicas. Estas modelagens são usualmente realizadas para barragens de água, ou seja: realizam a propagação de fluido com características Newtonianas. Entretanto, o material contido no reservatório de uma barragem de rejeitos não é um fluido Newtoniano, por não ser água pura e conter partículas em suspensão, caracterizando-se como fluido hiperconcentrado. Portanto, faz-se necessária a adaptação das metodologias tradicionais de simulação, a fim de que os resultados das modelagens sejam coerentes com a realidade. Nesse contexto, este trabalho buscou avaliar comparativamente diferentes metodologias para simulação do rompimento de uma barragem de rejeitos, com propagação de fluidos hiperconcentrados, através de simulações hidrodinâmicas 2D no *software* HEC-RAS 6.2. Foram simulados cinco cenários: o primeiro, é a propagação típica de água, com cenário Newtoniano; o segundo e terceiro são baseados no aumento do coeficiente de Manning no vale de jusante para compensar características de fluidos não-newtonianos; e os cenários quatro e cinco correspondem à duas simulações que consideram o comportamento não-newtoniano do fluido como plástico de Bingham, com diferentes dados de entrada. Como resultados, foram obtidas manchas de inundação extremamente semelhantes entre si, provavelmente pela região simulada se tratar de um vale encaixado, entretanto os parâmetros de velocidades, profundidades máximas e tempo de chegada divergem – sendo mais próximos entres si nos cenários 1, 4 e 5. Além disso, os cenários 2 e 3, que correspondem ao aumento do coeficiente de Manning, apresentaram resultados de velocidades menores e tempos de chegada maiores, o que pode ser prejudicial em estudos cuja finalidade é a elaboração de Planos de Ação de Emergência, uma vez que, para definição da Zona de Auto-Salvamento variáveis como as velocidades e tempos de chegada do escoamento são fundamentais.

Palavras-chave: DamBreak, modelagem hidrodinâmica, fluido hiperconcentrado, não-newtoniano, barragem de rejeitos.



ABSTRACT

The mineral exploration sector is a relevant actor in the Brazilian economy, which is related to an expressive generation of waste, which are commonly deposited in dams. Accidents occurring with these structures have the potential to impact the downstream valley, causing economical, social and environmental losses. Therefore, the study of the dam break impacts through hydrodynamic modeling is relevant. These models are usually made for water dams so they propagate the fluids with Newtonian characteristics. However, the content of tailings dams is not a Newtonian fluid, as it is not pure water and contains suspension particles, characterizing it as a hyperconcentrated fluid. Therefore, it is necessary to adapt these traditional simulation methodologies so that the results of these models are coherent with reality. In this context, this work sought to comparatively evaluate different methodologies for simulating the failure of a tailings dam, with propagation of hyperconcentrated fluids, through 2D hydrodynamic simulations in the HEC-RAS 6.2 software. Five scenarios were simulated: the first is the typical propagation of water, with a Newtonian scenario; the second and third are based on increasing the Manning coefficient in the downstream valley to compensate for characteristics of non-Newtonian fluids and scenarios four and five correspond to two simulations that consider the non-Newtonian behavior of the fluid as a Bingham plastic, with different input data. As a result, extremely similar flood areas were obtained, probably due to the valley characteristics from the simulated area. However the parameters of speeds, maximum depths and arrival time diverge - being closer to each other in scenarios 1, 4 and 5. In addition, scenarios 2 and 3, which correspond to the increase in Manning's coefficient, presented results of lower speeds and longer arrival times, which can be harmful in studies whose purpose is the elaboration of Emergency Action Plans, since, for the definition of the Self-Rescue Zone, variables such as the speeds and arrival times of the flow are fundamental.

Palavras-chave: DamBreak, hydrodynamic modeling, hyperconcentrated fluid, non-Newtonian, tailings dam.



LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Quantitativo de barragens de minério no Brasil submetidas à PNSB por método construtivo – dados até janeiro de 2019	18
Figura 3.2 - Quantitativo de acidentes envolvendo rompimento de barragens de minério por país – dados até agosto de 2022	24
Figura 3.3 – Equação para modelagem de fluidos não-newtonianos no HEC-RAS separada em parcelas de acordo com a concentração do fluido simulado	38
Figura 4.1 - Trecho simulado	46
Figura 4.2 - Localização da área de estudo.....	47
Figura 5.1 - Fluxograma geral das etapas de realização do trabalho	48
Figura 5.2 – Sub-bacias do rio Doce – Plano de Bacia Hidrográfica do rio Doce.....	50
Figura 5.3 - Topografia do vale de jusante: MDE com inserção da calha	53
Figura 5.4 - Topografia do vale de jusante: zoom no MDE com inserção da calha na região logo a jusante do barramento	53
Figura 5.5 - Formato da brecha	58
Figura 5.6 -Poligonais utilizadas para o coeficiente de Manning	59
Figura 5.7 - Topologia do modelo simulado.....	61
Figura 5.8 – Região simulada, extensão da simulação e condições de contorno do modelo.....	62
Figura 5.9 – Localização das seções de interesse para extração dos resultados	65
Figura 6.1 -Elevação do terreno ao longo do trecho principal simulado e locação relativa das seções para extração dos resultados	68
Figura 6.2 - Resultados das manchas de inundação para os cenários simulados e áreas de articulações para aproximação	71
Figura 6.3 - Resultados das manchas de inundação para os cenários simulados – aproximação da região 01	72
Figura 6.4 - Resultados das manchas de inundação para os cenários simulados – aproximação da região 02	73
Figura 6.5 - Resultados das manchas de inundação para os cenários simulados – aproximação da região 03	74
Figura 6.6 - Resultados das manchas de inundação para os cenários simulados – aproximação da região 04	75



Figura 6.7 - Região com instabilidades na simulação de velocidades.....	77
Figura 6.8 - Hidrograma de ruptura para a seção A	78
Figura 6.9 - Hidrograma propagado na seção H	80
Figura 6.10 – Velocidades máximas para os cenários avaliados – valores truncados em um máximo de 20 m/s para possibilitar a avaliação das diferenças entre os cenários..	82
Figura 6.11 – Tempos de chegada (amarelo) e velocidades máximas (vermelho) nas seções de extração de resultados	84
Figura 6.12 – Profundidades máximas logo a jusante do barramento simulado – valores truncados em um máximo de 35 m para possibilitar a avaliação das diferenças entre os cenários	87



LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Resumo dos métodos construtivos de barragens de mineração: descrição, vantagens, desvantagens e desenho esquemático	19
Tabela 3.2 - Resumo dos mecanismos de falhas em barragens: descrição e desenho esquemático	22
Tabela 3.3 - Rompimentos de barragens de rejeitos de minérios no Brasil – dados até agosto de 2022.....	26
Tabela 3.4 – Características dos escoamentos em função da sua concentração volumétrica de sólidos e descrição das suas características de escoamento	35
Tabela 3.5 – Resumo das metodologias de simulação de fluidos hiperconcentrados no HEC-RAS a partir da versão 6.0.....	39
Tabela 3.6 - Valores típicos para o coeficiente de Manning	42
Tabela 3.7 - Resumo dos trabalhos pesquisados com enfoque no tipo de fluido simulado e no software utilizado em cada um deles.....	44
Tabela 5.1 - Vazões específicas para a sub-bacia do rio do Carmo e vazões nas bacias simuladas	51
Tabela 5.2 – Características da barragem simulada	55
Tabela 5.3 - Curva cota - volume do reservatório.....	56
Tabela 5.4 - Dados de entrada para a brecha simulada.....	58
Tabela 5.5 – Características reológicas do fluido simulado no cenário baseado em características experimentais da suspensão mineral	60
Tabela 5.6 – Características reológicas do fluido simulado no cenário baseado na concentração volumétrica.....	61
Tabela 5.7 - Características das seções de interesse para extração dos resultados	64
Tabela 5.8 – Características dos cenários de experimentos realizados	66
Tabela 6.1 – Áreas das manchas de inundação para os cinco cenários simuladois	69
Tabela 6.2 – Velocidades máximas nas seções para os cinco cenários simulados	79
Tabela 6.3 – Tempos de chegada nas seções para os cinco cenários simulados	81
Tabela 6.4 – Profundidades máximas nas seções para os cinco cenários simulados ..	85
Tabela 6.5 – Resumo dos principais resultados obtidos.....	89



LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANM	Agência Nacional de Mineração
CMB	Comissão Mundial de Barragens
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center – River Analysis System</i>
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
PAE	Plano de Ações Emergenciais
PIB	Produto Interno Bruto
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragens
SAR	Radar de Abertura Sintética
SIGBM	Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração
SNIRH	Relatório de Segurança de Barragens e Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
USACE	<i>US Army Corps of Engineers</i>
ZAS	Zona de Auto-Salvamento



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 BARRAGENS	16
3.1.1 Barragens de rejeitos	17
3.1.2 Breve histórico de acidentes envolvendo barragens de rejeitos.....	24
3.1.3 Legislação em segurança de barragens no Brasil.....	28
3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DE CORPOS HÍDRICOS COM SOFTWARE HEC-RAS.....	29
3.2.1 Fundamentos matemáticos para modelagem de escoamentos unidimensionais em regime não – permanente no HEC-RAS	31
3.2.2 Fundamentos matemáticos para modelagem de escoamento bidimensional em regime não – permanente no HEC-RAS	33
3.2.3 Fundamentos de simulações de rompimentos de barragens de água e rejeitos no HEC-RAS	34
3.2.3.1 Simulação de fluidos hiperconcentrados considerando as propriedades reológicas no software HEC-RAS	37
3.2.3.2 Simulação de fluidos hiperconcentrados considerando escoamento Newtoniano e o aumento do coeficiente de Manning no software HEC- RAS	41
3.3 ESTUDOS QUE APLICARAM O SOFTWARE HEC-RAS PARA ROMPIMENTOS DE BARRAGENS	42
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	45
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
5.1 PARÂMETROS DE ENTRADA.....	49
5.1.1 Vazões.....	49
5.1.2 Topografia do vale de jusante.....	51
5.1.3 Características do barramento e curva cota-área-volume	54
5.1.4 Formação de brecha	56
5.1.5 Rugosidade: Coeficiente de Manning.....	59
5.1.6 Reologia do fluido.....	60
5.2 TOPOLOGIA DO MODELO	61



5.2.1	<i>Condições de contorno e extensão da simulação</i>	61
5.2.2	<i>Parâmetros de simulação</i>	63
5.2.3	<i>Características computacionais</i>	63
5.3	SEÇÕES DE INTERESSE PARA EXTRAÇÃO DE RESULTADOS	63
5.4	EXPERIMENTOS REALIZADOS - CENÁRIOS	65
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
6.1	MANCHAS DE INUNDAÇÃO	68
6.2	VELOCIDADES DO ESCOAMENTO E TEMPOS DE CHEGADA	76
6.3	PROFUNDIDADES MÁXIMAS	85
6.4	RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS	89
7.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES	91
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

1. INTRODUÇÃO

O setor mineral é um relevante ator da economia brasileira, sendo, em 2021, responsável por mais de 3% do PIB do país (SANTOS, 2021). Arelada à exploração mineral, está a utilização de barramentos para a disposição dos rejeitos da produção, em meio aquoso. Atualmente, existem mais de 900 barramentos com esta finalidade no Brasil (ANM - SIGBM, 2022).

Independente da finalidade do barramento, acidentes e incidentes relacionados às barragens tem potencial de gerar danos no vale de jusante, ocasionando perdas econômicas, ambientais e sociais. No caso específico das barragens de mineração, que contém rejeitos em seus reservatórios, poderá ocorrer, no caso de um rompimento, a liberação de fluidos com diferentes concentrações de partículas sólidas em suspensão e eventuais aditivos utilizados no processo. Estes fluidos podem ser especialmente danosos e impactantes ao vale de jusante, uma vez que agem como contaminantes ao ambiente.

Devido a estes riscos, em 2010 foi instituída no Brasil a Política Nacional de Segurança de Barragens, que tem como alguns de seus instrumentos a elaboração do Plano de Segurança de Barragens (PSB) e do Plano de Ações Emergenciais (PAE). Assim, de forma a seguir as diretrizes estabelecidas por estes documentos, muitas vezes é necessária a realização de estudos de *Dam Break* para a estimativa dos efeitos de um eventual rompimento do maciço, tendo como produtos manchas de inundação, tempos de chegada das ondas de ruptura e níveis atingidos. Estes estudos são comumente realizados a partir de modelagens hidrodinâmicas e um dos *softwares* mais comumente utilizados é o HEC-RAS versão 6.2 (USACE, 2020).

A modelagem hidrodinâmica é uma ferramenta aplicada para auxiliar a gestão dos recursos hídricos através de tentativas de descrição e previsão matemática do comportamento hidrológico-hidráulico dos sistemas. Em estudos de rompimentos de barragens, estes modelos, usualmente aplicam variações das equações de Saint-Venant para simular numericamente os efeitos de

amortecimento e translação sobre o hidrograma de ruptura e sua propagação no vale de jusante. Até recentemente, o HEC-RAS apenas simulava fluidos de comportamento Newtoniano, ou seja: cujo comportamento de viscosidade (atrito interno) é constante para diferentes taxas de cisalhamento e não varia ao longo do tempo. Entretanto, em 2020 foi lançada a versão 6.0 do *software*, que permite a simulação de características relacionadas à comportamentos de viscosidades variadas.

Pela presença de partículas em suspensão, os fluidos retidos em barragens de rejeitos apresentam propriedades reológicas que divergem seus comportamentos em relação ao da água pura, o que faz com que as abordagens tradicionais de tentativas de previsão do comportamento do escoamento tenham aplicações limitadas nestes fluidos (GIBSON, 2020). Assim, a simulação destes fluidos deve considerar seu comportamento como não-newtoniano. A concentração destes rejeitos nos barramentos acaba por caracterizar tipicamente estes fluidos como hiperconcentrados.

Considerando a relevância da realização de estudo coerentes de rompimentos de barragens de rejeitos, especialmente para o atendimento às legislações relacionadas com a segurança socioambiental do vale de jusante, o presente trabalho realizou simulações hidrodinâmicas bidimensionais (2D) – para atendimento à Resolução ANM nº 95 de fevereiro de 2022 - no *software* HEC-RAS para avaliar o rompimento de uma barragem de rejeitos a partir da comparação de cinco cenários para a propagação do fluido hiperconcentrado no vale de jusante. O primeiro, é a propagação típica de água, com cenário Newtoniano; o segundo e terceiro são baseados numa metodologia que era aplicada para a modelagem de fluidos hiperconcentrados no HEC-RAS antes da possibilidade de inserção das suas características reológicas, que é o aumento do coeficiente de Manning no vale de jusante para compensar características de fluidos não-newtonianos que antes não eram consideradas; e os cenários quatro e cinco correspondem à duas simulações que consideram o comportamento não- newtoniano do fluido com diferentes dados de entrada.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo principal do presente trabalho é realizar comparações dentre alternativas de abordagens tipicamente utilizadas para simular rompimento de barragens de rejeitos no *software* HEC-RAS, apontando diferenças entre os métodos empregados.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a simulação bidimensional de rompimento da barragem com água, para fins comparativos;
- Realizar a simulação bidimensional de rompimento de barragem de rejeito com base na alteração nos coeficientes de Manning no *software* HEC-RAS, considerando dois cenários distintos para esta abordagem;
- Realizar a simulação bidimensional de rompimento de barragem de rejeito com base na inserção dos parâmetros de viscosidade de fluidos não-newtonianos no *software* HEC-RAS, considerando dois cenários distintos para esta abordagem;
- Realizar a comparação entre os cinco cenários anteriormente apresentados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse item serão apresentados os principais conceitos e termos relacionados ao desenvolvimento do trabalho, além das legislações em vigor relacionadas ao tema. A revisão bibliográfica está separada em três temas principais, sendo eles: (i) Barragens, cujo foco é a exposição da relevância do tema, com enfoque em barragens de rejeitos e segurança de barragens, temas abordados no trabalho; (ii) Modelagem matemática, onde é apresentada a relevância e aplicabilidade de estudos utilizando modelagem matemática, com enfoque no HEC-RAS, *software* aplicado neste estudo; (iii) Estudos de aplicação do *software* HEC-RAS para simulação de rompimentos de barragens, item que foi construído com base em pesquisa bibliográfica sobre o estado atual de modelagens deste gênero. Este tópico serviu como base para delimitação do tema.

3.1 Barragens

Segundo o inciso I do Artigo 1º da Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, barragens são estruturas construídas em talvegue ou cava exaurida com dique, dentro ou fora de um curso d'água perene ou intermitente. A sua finalidade é a contenção de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos.

Segundo o Manual e Políticas e Práticas de Segurança de Barragens da ANA (ANA, 2014), há mais de 5 mil anos são construídos barramentos que auxiliaram o desenvolvimento da sociedade através da reserva de água para irrigação, consumo humano e controle de cheias. Hoje, no mundo, cerca de 40% das áreas cultivadas são irrigadas (INOVAGRI, 2017), o que corresponde a 271 milhões de hectares e, destes, 40% dependem de barragens para sua estocagem de água (CMB. 2000).

Ainda, a Comissão Internacional de Grandes Barragens - ICOLD (2022), contabiliza que existam mais de 58 mil grandes barramentos (definidos como tendo mais de 15 metros de altura e/ou mais de 3 hm³ de volume reservado, ICOLD, 2022) no mundo, cujas principais finalidades de uso são irrigação,

hidroeletricidade e abastecimento populacional, correspondendo a 80% das barragens destinadas para apenas um fim (ICOLD, 2022).

No Brasil, no de 2021 existiam cerca de 22 mil barragens cadastradas no Sistema Nacional de Segurança de Barragens (SNISB) da ANA, cujos usos preponderantes são irrigação, dessedentação animal e aquicultura, que somam quase 70% dos usos (TSCHIEDEL et al., 2019). Entretanto, se consideradas apenas barragens com volume reservado maior do que 100 hm³, seus principais uso passam a abastecimento populacional e geração de energia, que somam 80% destas barragens.

É relevante notar que cerca de 15% dos barramentos totais existentes no Brasil possuem como finalidade a contenção de rejeitos de minérios (TSCHIEDEL et al., 2019). Estes barramentos estão diretamente relacionados com a produção mineral, que, apenas em 2019, gerou mais de 129 bilhões de Reais em receita no país (BRASIL – Agência Nacional de Mineração, 2020). A seguir o tema de barragens de rejeitos é aprofundado.

3.1.1 Barragens de rejeitos

Segundo a Resolução ANM 2022, barragens de mineração são:

“Barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais;

e

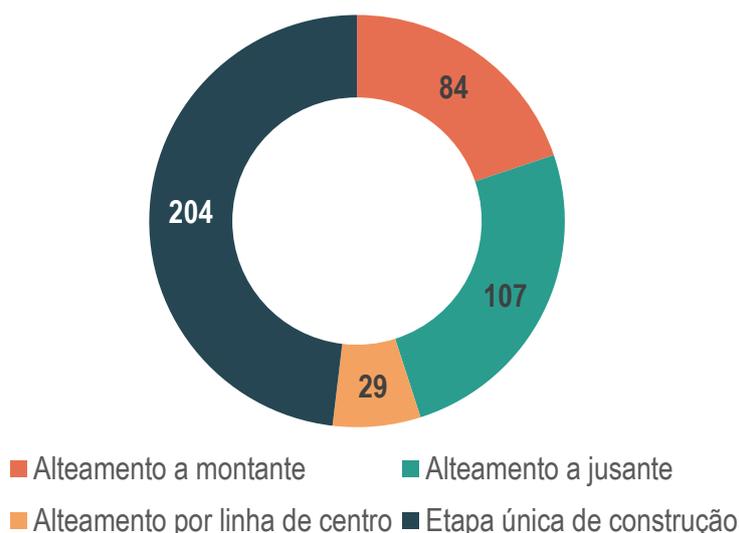
Estruturas construídas por meio de disposição hidráulica de rejeitos, como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, suscetíveis à liquefação”

O Cadastro Nacional de Barragens de Mineração (ANM - SIGBM, 2022) contabiliza que, em 2021, existiam 906 barragens com a finalidade de contenção

de resíduos de mineração no Brasil, das quais cerca de 50% encaixam no PNSB. Ou seja: metade das barragens de mineração possuem altura do maciço maior ou igual a 15 metros, capacidade total do reservatório maior ou igual a 3 hm³, contém resíduos perigosos e/ou está classificada nas como alto dando potencial associado e risco alto (BRASIL, 2022).

Ao contrário das barragens tradicionais de acumulação de água, as barragens para contenção de rejeitos normalmente são construídas em etapas, conforme a lavra avança, sofrendo alteamentos à medida que os rejeitos da mineração são gerados (SANDRONI, S; GUIDO, G., 2021). Existem três metodologias principais para estes alteamentos: a montante, a jusante e linha de centro, que podem ser realizados com material de empréstimo, rejeitos de própria mina ou uma combinação de ambos. A Tabela 3.1 apresenta um resumo contemplando uma breve descrição das metodologias com desenho esquemático e suas principais vantagens e desvantagens, enquanto a Figura 3.1 apresenta os respectivos quantitativos de barragens de minérios submetidas à PNSB por método construtivo.

Figura 3.1 - Quantitativo de barragens de minério no Brasil submetidas à PNSB por método construtivo – dados até janeiro de 2019



Fonte: adaptado de ANM, 2019.

Tabela 3.1 - Resumo dos métodos construtivos de barragens de mineração: descrição, vantagens, desvantagens e desenho esquemático

Método Construtivo	Descrição	Vantagem	Desvantagem	Figura esquemática
Montante	O alteamento da barragem ocorre sempre a montante do dique de partida, com construção dos novos barramentos sobre os rejeitos dispostos anteriormente.	<p>Baixo custo de implantação, construção e operação;</p> <p>Não ocupa novas áreas, visto que a expansão do reservatório ocorre para o interior do maciço;</p>	<p>Baixo controle construtivo, visto que os alteamentos ocorrem sobre materiais não totalmente consolidados, podendo apresentar baixa resistência ao cisalhamento e alta suscetibilidade a liquefação e <i>piping</i>;</p> <p>Dificuldade de implementação de sistemas de drenagem interna no barramento;</p> <p>Não é recomendado para armazenar grandes volumes de água;</p>	<p>MÉTODO DE MONTANTE</p>
Jusante	O alteamento da barragem ocorre sempre a jusante do dique de partida.	<p>Controle do lançamento dos rejeitos;</p> <p>Controle da compactação do solo de fundação;</p> <p>Facilidade de instalação e controle dos sistemas de drenagem;</p>	<p>Alto custo de implantação;</p> <p>Maiores volumes de material para construção;</p> <p>Necessidade de disponibilidade de área para construção a jusante;</p>	<p>MÉTODO DE JUSANTE</p>

Método Construtivo	Descrição	Vantagem	Desvantagem	Figura esquemática
		Maior segurança;		
Linha de centro	O alteamento ocorre tanto a montante quanto a jusante do dique de partida, acompanhando um eixo vertical (linha de centro). Objetiva equalizar as vantagens e desvantagens dos métodos anteriores.	Médio custo de implantação, construção e operação	Necessidade de sistema de drenagem eficiente;	<p>MÉTODO DA LINHA DE CENTRO</p>

Fonte: adaptado de Cardozo et al. (2016), IBRAM (2016). E SANDRONI, S; GUIDO, G. (2021).

Outro aspecto construtivo relevante sobre as barragens de mineração, em especial as de minério de ferro - predominantes no Brasil (ANM, 2020), é que são gerados dois tipos de rejeitos: arenosos (grãos leves e majoritariamente compostos por quartzo) e finos (mais pesados, por possuírem maior percentual residual de minérios em sua composição). Quando o processo de mineração realiza a separação destas frações, é possível depor os rejeitos em diferentes locais no reservatório – sendo os finos usualmente dispostos no corpo do reservatório, mais a montante, e a fração arenosa próximo ao barramento (SANDRONI, S; GUIDO, G., 2021).

É relevante notar que os dois rompimentos de barragens de rejeito com maior notoriedade - e danos associados - no Brasil (Fundão e Brumadinho), foram construídas com o “método de alteamento de montante” e apresentavam a distribuição dos materiais com deposição da fração arenosa saturada (suscetível à liquefação) junto do barramento. Ambos os rompimentos foram rápidos e sem sinais prévios nítidos (SANDRONI, S; GUIDO, G., 2021). A metodologia construtiva de alteamento de montante foi proibida após estes acidentes, uma vez que a estrutura do barramento se apoia sobre os rejeitos da mina, que possuem características físicas que variam em função dos materiais explorados. Ou seja: as resistências à tensão e deformação destes materiais são heterogêneas e muitas vezes desconhecidas.

A Tabela 3.2 apresenta um resumo dos principais mecanismos internos de falhas em barragens – além destes, pode haver rompimento por agentes externos, como efeitos sísmicos e ações de guerra. Segundo Sandroni e Guidicini (2021), entre 70 e 80% dos rompimentos no Brasil ocorrem por percolação ou galgamento, considerando tanto barragens de água quanto de rejeito.

Tabela 3.2 - Resumo dos mecanismos de falhas em barragens: descrição e desenho esquemático

Mecanismo de falha	Descrição do processo	Causas	Mecanismo de rompimento	Figura esquemática
Galgamento (overtopping)	Ocorre quando o nível de água da barragem ultrapassa a cota da crista do barramento, ocasionando a passagem de água por cima do coroamento da estrutura.	<ul style="list-style-type: none"> - Chuvas extremas; - Ondas no reservatório; - Subdimensionamento do vertedouro para escoar as vazões afluentes; 	Em barragens de terra ocasiona a erosão do talude de jusante.	
Erosão interna (piping)	Ocorre pela formação de um tubo preferencial de escoamento no interior do maciço (entubamento). Este processo carrega partículas de montante para jusante, aumentando progressivamente de diâmetro até o colapso da estrutura.	<ul style="list-style-type: none"> - Má compactação do solo; - Falta, mal funcionamento ou mal dimensionamento da drenagem interna; 	Em barragens de terra ocasiona a erosão dos taludes de montante e jusante. Pode também ocasionar movimentos de massas.	
Liquefação	Ocorre devido à aplicação de esforços cisalhantes sobre solos granulares saturados: o atrito entre os grãos é reduzido pela poropressão exercida	- Construção de barragens de minérios com alteamentos a jusante, que ocasionam a aplicação de esforços sobre os	Comportamento do maciço como líquido, cedendo aos esforços e rompendo ao redor da envoltória de cisalhamento. Rompimento	-

Mecanismo de falha	Descrição do processo	Causas	Mecanismo de rompimento	Figura esquemática
	pela água, fazendo com que a massa de solo saturado se comporte como fluido, cedendo sob o peso do maciço.	rejeitos dispostos no reservatório; - Falta de drenagem adequada em barragens de terra, resultando na saturação do solo.	quase instantâneo do barramento liquefeito.	
Falhas estruturais	Ocorrem quando há falha em alguma das estruturas que compõe a barragem, como: vertedouro, tomada d'água, comportas, descarregador de fundo, tuneis de derivação etc, que se tornam gatilhos e podem levar à formação de brechas e/ou perdas de volume reservado.	- Falta de instrumentação e acompanhamento; - Falta de manutenção nas estruturas;	Variado em função do tipo de falha e/ou estrutura que falhou.	

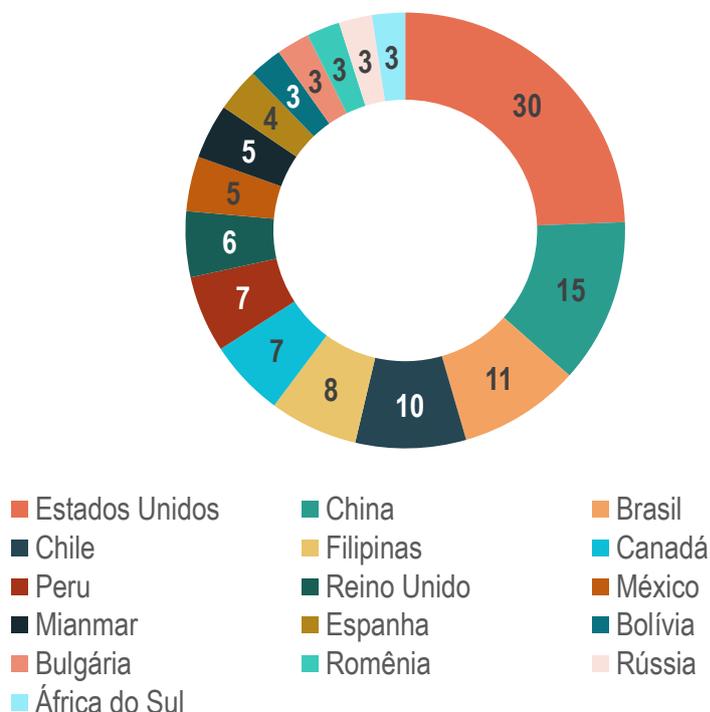
Fonte: adaptado de USACE (2016); EVANGELISTA, T. M. S. et. al (2020), TSCHIEDEL (2022);

3.1.2 Breve histórico de acidentes envolvendo barragens de rejeitos

Segundo a Lei Federal nº 12.334/2010 (alterada pela Lei Federal nº 14.066/2020), que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), “*acidentes são o comprometimento da integridade estrutural com liberação do conteúdo do reservatório, ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou de estrutura anexa*”. Assim, enchentes geradas pelo rompimento de barramentos podem surtir efeitos desastrosos a jusante (Pilotti et al, 2020).

O *World Information Service on Energy* (WISE, 2022) apresenta uma cronologia de acidentes com grandes barragens de rejeitos de minério no mundo, com dados desde 1960. Ao todo, são listados 150 acidentes, distribuídos entre os países conforme a Figura 3.2. Ressalta-se que na figura foram excluídos os países com menos de 3 acidentes por ano – assim, o total do gráfico é de 123 acidentes.

Figura 3.2 - Quantitativo de acidentes envolvendo rompimento de barragens de minério por país – dados até agosto de 2022



Fonte: adaptado de WISE, 2022

É relevante notar que os países que apresentam maior quantidade de acidentes são os principais extratores de minérios do mundo. Ainda, deve ser



destacada a ressalva de que há possibilidade de subnotificação dos casos, especialmente nos países subdesenvolvidos.

Especificamente com relação ao Brasil, dos onze rompimentos de barragens de rejeitos de minérios contabilizados pelo levantamento do WISE (2022), sete ocorreram no estado de Minas Gerais. A Tabela 3.3 apresenta um resumo das informações destes acidentes.

Em 2021, dentre as 453 barragens de mineração vistoriadas pela ANM que se encaixavam na PNSB, 10% apresentavam Categoria de Risco Alto e 56% Dano Potencial Associado alto, correspondendo, respectivamente a 46 e a 300 barramentos com este fim. Outro dado relevante é que no ano de 2021 existiam 40 barramentos com algum nível de emergência identificado, necessitando de intervenções preventivas por parte dos empreendedores.

Tabela 3.3 - Rompimentos de barragens de rejeitos de minérios no Brasil – dados até agosto de 2022

Data	Localização (mina e/ou município)	UF	Empreendedor	Minério	Tipo de acidente	Quant. de material perdido (milhões m³)	Impactos
08/01/2022	Mina do Pau Branco, Nova Lima*	MG	Vallourec S.A.	Ferro	Após fortes chuvas, uma ruptura de talude envolvendo três margens da pilha de resíduos da mina de Cachoeirinha resultou em um lançamento de resíduos da mina na barragem de retenção de água Lisa. A barragem transbordou em toda a extensão do talude, sem comprometer sua estabilidade.	-	A onda de lama que transbordou da barragem de retenção bloqueou a rodovia BR-040. Uma pessoa ficou ferida.
01/10/2019	Nossa Senhora do Livramento	MT	VM Mineração e Construção	Ouro	Falha da barragem de rejeitos	-	Os rejeitos fluíram entre 1 e 2 km a jusante do barramento, interrompendo uma linha de transmissão de energia
29/03/2019	Machadinho d'Oeste, Oriente Novo	RO	Metalmig Mineração Indústria e Comércio S/A	Estanho	Falha da barragem de rejeitos inativa após chuva forte	-	O derramamento de rejeitos danificou sete pontes, deixando 100 famílias isoladas
25/01/2019	Mina do Córrego do Feijão, Brumadinho, Região Metropolitana de Belo Horizonte	MG	Vale SA	Ferro	Falha da barragem de rejeitos	12	A onda de rejeitos devastou a estação de carregamento da mina, sua área administrativa e duas bacias menores de retenção de sedimentos (B4 e B4A). O fluxo de detritos percorreu cerca de 7 km até chegar ao Rio Paraopeba, destruindo uma ponte do ramal ferroviário da mina e se espalhando para partes da comunidade local Vila Ferteco, próximo à cidade de Brumadinho; o fluxo foi então levado adiante pelo Rio Paraopeba; 259 pessoas foram mortas e 11 estão desaparecidas.
17/02/2018	Barcarena	PA	Hydro Alunorte / Norsk Hydro ASA	Alúminio (bauxita)	Galgamento após chuva forte	-	Líquidos altamente alcalinos e carregados de metal inundaram as áreas residenciais vizinhas, inutilizando o abastecimento de água potável na área.
05/11/2015	Mina Germano, Bento Rodrigues, Mariana	MG	Samarco Mineração S.A. (50% BHP Billiton, 50% Vale)	Ferro	Falha da barragem de minérios de Fundão devido à drenagem insuficiente, que levou à liquefação da barragem de terra logo após um pequeno terremoto	32	A onda de lama inundou a cidade de Bento Rodrigues, destruindo 158 casas, deixando pelo menos 17 mortos e 2 desaparecidos; os detritos poluíram os rios Gualaxo Norte, Carmel e Doce em mais de 663 km, destruindo 15 km² de terra ao longo dos rios e cortando o abastecimento de água potável; o prejuízo é de pelo menos US\$ 6,7 bilhões.

Data	Localização (mina e/ou município)	UF	Empreendedor	Minério	Tipo de acidente	Quant. de material perdido (milhões m ³)	Impactos
10/09/2014	Mina Herculano, Itabirito	MG	Herculano Mineração Ltda	Ferro	Falha da barragem de rejeitos	-	Dois trabalhadores mortos e um desaparecido
27/04/2009	Barcarena	PA	Hydro Alunorte / Norsk Hydro ASA	Alúminio (bauxita)	Transbordamento dos canais de drenagem ao redor da bacia de lama após chuva forte	-	-
01/01/2007	Mirai	MG	Mineração Rio Pomba Cataguases Ltda	Alúminio (bauxita)	Falha da barragem de rejeitos após chuva forte	2	O fluxo de lama deixou cerca de 4 mil moradores das cidades de Mirai e Muriaé na Zona da Mata desabrigados. Lavouras e pastagens foram destruídas e o abastecimento de água ficou comprometido em cidades dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro.
22/06/2001	Sebastião das Águas Claras, Nova Lima	MG	Mineração Rio Verde Ltda	Ferro	Falha da barragem de rejeitos	-	A onda de rejeitos percorreu pelo menos 6 km, matando pelo menos dois trabalhadores da mina. Além destes, mais três trabalhadores estão desaparecidos.

Fonte: adaptado de WISE, 2022.

*esta barragem foi galgada, mas não chegou a romper.

3.1.3 Legislação em segurança de barragens no Brasil

A legislação regulamentadora referente à segurança de barragens no Brasil inicia com a Lei Federal nº 12.334/2010 (alterada pela Lei Federal nº 14.066/2020), que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), tendo como objetivos principais assegurar os padrões de segurança de barragens, reduzir as chances de acidentes e atenuar suas consequências. Anteriormente ao estabelecimento da Lei Federal nº 12.334/2010, a segurança de barragens não estava incluída na Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Federal nº 9.433/1997).

A PNSB atua através da promoção da regulamentação, monitoramento, definição de procedimentos, fiscalização de ações de segurança e enquadramento dos barramentos de acordo com classes de risco, considerando todas as etapas, desde o planejamento e projeto, até operação e eventual encerramento. Ainda, busca fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos, com a disponibilização de informações e dos seguintes instrumentos: Plano de Segurança de Barragem (PSB); Plano de Ação Emergencial (PAE); Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB); Relatório de Segurança de Barragens e Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

Complementarmente à PNSB, estão as Resoluções:

- a) Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 143/2012, que *“estabelece os critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume”*;
- b) CNRH nº 144/2012 (alterada pela Resolução CNRH nº 178/2016), que *“estabelece diretrizes para implementação da PNSB, aplicação de seus instrumentos e atuação do SNISB”*;
- c) ANA nº 132/2016, que *“estabelece critérios complementares de classificação de barragens reguladas pela ANA, quanto ao Dano Potencial Associado”*;
- d) ANA nº 236/2017, que *“estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo*

e o nível de detalhamento do PSB, das Inspeções de Segurança Regular e Especial e do PAE’,

- e) ANA nº 121/2022, que “*altera a resolução ANA nº 236, de 30 de janeiro de 2017*”.

No que tange a segurança de barragens de mineração, em fevereiro de 2022, ficou estabelecida a resolução nº 95 de Agência Nacional de Mineração, que consolida as medidas regulatórias aplicáveis às barragens de mineração. Nela, está definido que o órgão fiscalizador das barragens de mineração é a própria ANM. Além disso, a resolução define que o estabelecimento da classe de risco destes barramentos será realizado também pela ANM e separa as barragens de mineração em duas classes:

- a) as de pequeno porte e/ou pouco risco que devem ser cadastradas no Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM), monitoradas com instrumentação adequada de acordo com seu porte e devem ter mapas de inundação causada por rompimentos disponíveis, e
- b) as que estão sujeitas à Política Nacional de Segurança de Barragens, que devem elaborar os Planos de Segurança da Barragens, Plano de Ações de Emergência e realizar inspeções de segurança, com revisões cuja periodicidade é definida pela PNSB de acordo com a categoria de risco, de forma semelhante às barragens de outras finalidades.

3.2 Modelagem matemática de corpos hídricos com *software* HEC-RAS

A modelagem matemática, conforme definida por Popescu (2014), é uma simplificação esquemática da realidade, baseada na combinação de equações que descrevem diferentes processos físicos. Assim, é uma ferramenta aplicada para facilitar a compreensão da realidade, desenvolvida para auxiliar na tomada de decisões através da predição de tendências do que pode ocorrer no futuro. Além disso, a modelagem permite que sejam estudadas, sem prejuízos, diferentes alterações no sistema e os prováveis efeitos na sua dinâmica.

A matemática de recursos hídricos (hidrológica; hidráulica; hidrodinâmica) consiste na representação matemática dos recursos hídricos, sendo uma das principais ferramentas para sobrepujar os desafios no gerenciamento dos

recursos hídricos (FAN et al 2015). Trata-se de uma ferramenta de apoio nas decisões relacionadas à gestão dos recursos hídricos, devido, entre outras finalidades, às suas características auxiliares na previsão de vazões (FAN et al, 2016), na compreensão dos processos hidrológicos em bacias e planícies de inundação (FLEISHCMANN, et al, 2018), em sistemas lagunares e no suporte à decisão de outorga do uso da água (LOPES, et al, 2018). Além disso, simulações hidráulicas auxiliam no dimensionamento e na definição de técnicas de operação dos sistemas de distribuição de água (BARREIRA, 2017).

Em geral, estes modelos estudam a aplicação de equações que regem leis como a conservação de massa e da quantidade de movimento; equações de propagação do escoamento superficial, como a equação de Muskingum-Cunge; propriedades dos fluidos, como diferentes viscosidades e incompressibilidade e a existência ou projeto de estruturas da hidráulicas, como reservatórios e planícies de inundação. No caso de modelos hidrológicos também é estudada a interação da precipitação com as características físicas do meio, objetivando a simulação da geração de escoamento.

O modelo matemático aplicado neste estudo será o HEC-RAS 6.2 (USACE, 2021) (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*, em tradução livre: sistema de análise de rios), desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (*US Army Corps of Engineers*). O HEC-RAS trata-se de um modelo hidráulico/hidrodinâmico amplamente utilizado para gestão de recursos hídricos, permite representar o escoamento permanente ou não-permanente em rios, e de forma unidimensional ou bidimensional, a partir da aplicação simplificada das equações de Saint-Venant (USACE, 2021). Os resultados gerados pelo modelo permitem avaliar cotas de inundação, velocidades da água nos trechos, visualizar os perfis transversais e hidrogramas, além de visualizar a propagação de ondas de cheias. Em sua versão mais recente, foi implementada a possibilidade de propagar escoamentos não-newtonianos, através da consideração das características de concentrações, tensões de cisalhamento e viscosidade dos fluidos, que será explorado neste trabalho.

Com relação às simulações de rompimento de barragens, objeto de estudo da modelagem do presente trabalho, TSCHIEDEL (2022) afirma que os modelos apresentam diferentes complexidades, podendo ser, principalmente: (i) *modelos simplificados*, baseados na análise de dados passados, sem necessariamente envolver modelagem hidrodinâmica, que são aplicados principalmente em função da necessidade relativa à rápida obtenção de informações preliminares a respeito dos impactos oriundos de desastres e; (ii) *modelos hidrodinâmicos*, como o HEC-RAS, que, baseados em simplificações das equações de Saint-Venant, modelam e simulam numericamente os efeitos de amortecimento e translação sobre o hidrograma de ruptura em sua propagação no vale de jusante.

Nos itens a seguir são descritas as hipóteses e os equacionamentos que embasam a modelagem no HEC-RAS 6.2.

3.2.1 Fundamentos matemáticos para modelagem de escoamentos unidimensionais em regime não – permanente no HEC-RAS

A modelagem de sistemas unidimensionais em regime não-permanente é de especial interesse para a simulação e análise de rios, uma vez que os resultados de maior qualidade da simulação são obtidos ao longo do comprimento (dimensão principal), em detrimento da planície. Para a simulação de escoamentos unidimensionais em regime não-permanente, o modelo HEC- RAS opera fundamentalmente baseando-se em duas equações principais: a combinação entre o princípio da conservação de massa (1) e o princípio da conservação da quantidade de movimento (2) (USACE, 2021).

- (1) Conservação de massa: considera que a variação de massa em um volume de controle corresponde à diferença entre a massa que entra e a que sai do volume. Assim, é também conhecida como Equação da Continuidade e é representada matematicamente pela Equação 1;
- (2) Conservação da quantidade de movimento (*momentum*): regida pela segunda lei de Newton, considera que a soma das forças que atuam sobre um sistema resulta na sua taxa de variação temporal da quantidade

de movimento. É representada matematicamente pela Equação 2.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad \text{Equação 1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad \text{Equação 2}$$

Nessas equações, “A” é a área molhada (m²); “t” é o tempo (s), “Q” é a vazão (m³/s), “x” é a distância (m), “h” é a profundidade (m), S₀ é a declividade do terreno e S_f é a declividade da força de atrito, tradicionalmente obtida a partir do uso das equações de Manning e Chezy (USACE, 2021).

A combinação das equações diferenciais parciais (2) e (3) é conhecida como Equações de Saint Venant ou Equações das Águas Rasas e grande parte dos modelos que realizam simulações hídricas são baseados na sua aplicação, seja de forma completa ou simplificada. Estas equações embasam a simulação de escoamento unidimensional não-permanente em canais abertos. Ainda, a resolução destas equações para diferentes sistemas fluviais exige a utilização de métodos numéricos, podendo ser resolvidas através do esquema implícito de diferenças finitas de Priessman, ou a partir de um esquema explícito inercial de Bates (PAIVA, 2021).

Segundo TCHIEDEL et. al. (2021), a partir da versão 6.0 o HEC- RAS apresenta duas metodologias distintas para resolução destes equacionamentos, sendo elas:

- (1) Resolução do sistema por diferenças finitas de Priessman, que é resolvido considerando todos os termos não lineares através da técnica de iteração de Newton-Raphson, o que gera a limitação pela impossibilidade de iniciar a simulação em ambientes secos, uma vez que o método requer uma inferência de valor inicial. Segundo USACE (2016) alguns fatores podem contribuir para a não-estabilidade do esquema de solução, como mudanças abruptas nas seções transversais (forma e declividade) e na onda de cheia propriamente dita.

(2) Resolução do sistema por volumes finitos: que, quando comparado aos tradicionais métodos de diferenças finitas, apresenta algumas vantagens, como maior estabilidade e robustez além da possibilidade de simular ambientes inicialmente secos.

É importante ressaltar que a aplicação para regimes mistos só pode ser efetuada em casos que a situação do fluxo varia rapidamente (USACE, 2021). Ainda, é relevante notar que a aplicação das Equações de Saint-Venant requer a consideração de algumas hipóteses e simplificações fundamentais (POPESCU, 2014), quais sejam:

- O fluido é incompressível, com densidade constante;
- O escoamento é unidimensional, com variação suave de nível ao longo do perfil horizontal e velocidade constante na seção;
- As acelerações verticais são desprezíveis;
- A curvatura da linha d'água é suave;
- A declividade do fundo do canal é pequena;
- A pressão é hidrostática;

3.2.2 Fundamentos matemáticos para modelagem de escoamento bidimensional em regime não – permanente no HEC-RAS

Para simulações bidimensionais, o HEC-RAS 6.2 também considera uma equação de conservação de massa (Equação 3), mas combina duas equações de conservação de quantidade de movimento – uma no eixo longitudinal (Equação 4) e outra no vertical (Equação 5). Este sistema é conhecido como Equações de Saint-Venant 2D (“*Full Momentum Equations*”) ou uma simplificação das equações, chamada de “Modelo Onda Difusa 2D” (ou também de “*Diffuse Model*”).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad \text{Equação 3}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + f_c v = -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,yy} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,x}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h} \quad \text{Equação 4}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f_c u = -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,xx} h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,yy} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,y}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho h} \quad \text{Equação 5}$$

Nas três equações anteriores, “ u ” e “ v ” são as velocidades nas direções cartesianas, “ g ” é a aceleração da gravidade, “ Z_s ” é a elevação da lâmina d’água, “ $V_{t,xx}$ e $V_{t,yy}$ ” são os coeficientes de viscosidade turbulenta horizontal nas direções x e y , “ $\tau_{s,x}$ e $\tau_{s,y}$ ” são as tensões de cisalhamento de fundo nas direções x e y , “ R ” é o raio hidráulico, “ h ” é a profundidade de água, “ f_c ” é um parâmetro de Coriolis, “ t ” é o tempo e “ q ” são as contribuições ou abstrações de fluxo.

Estas equações também podem ser resolvidas tanto pelo sistema de volumes finitos quanto pelo sistema de diferenças finitas, descritos no item 3.2.1.

3.2.3 Fundamentos de simulações de rompimentos de barragens de água e rejeitos no HEC-RAS

O *software* HEC-RAS tem sido amplamente utilizado para simulações hidrodinâmicas do rompimento de barragens de água. Até o lançamento da versão 6.0, em 2020, o *software* não permitia a simulação de fluidos não-newtonianos. Assim, uma prática adotada era a utilização de coeficientes de Manning elevados, com o objetivo de simular os efeitos da propagação desses fluidos em interação com a planície. A partir da versão 6.0, há a possibilidade de inserção de características reológicas de fluidos e da consideração de diferentes metodologias para a simulação de fluidos hiperconcentrados. Assim, os subcapítulos 3.2.3.2 e 3.2.3.1 apresentam as respectivas metodologias.

Ainda, a simulação hidrodinâmica bidimensional de rompimentos de barragens no HEC-RAS utiliza como principais dados de entrada:

- a *topografia do terreno*, por meio de um Modelo Digital de Terreno (MDT), que é utilizado para a determinação dos caminhos do fluxo d’água. É a partir dele que é obtido o *grid* de simulação;
- as *vazões* que serão propagadas, que são adicionados por meio de condições de contorno. Podem também ser incluídos tributários e vazões incrementais;

- *as características físicas do barramento*, que podem ser adicionadas ou pela inserção direta da curva cota – área – volume do reservatório, juntamente com uma cota inicial de simulação ou através da simulação bidimensional do próprio reservatório, necessitando de uma topobatimetria da calha e das vazões ou níveis de entrada;
- *a brecha*, cujas características são: o formato, definido a partir de parâmetros como a profundidade, largura e inclinação dos taludes, o tempo de formação e o tipo de rompimento, podendo ser, para barragens de terra, definido como galgamento ou *pipping*;
- *o coeficiente de manning*, que é utilizado para representar o atrito do fluido com a superfície de contato;
- e, no caso de simulações de fluidos que não sejam água, há a opção da *inserção da reologia do fluido*, através de diferentes metodologias.

Com relação ao comportamento de fluidos não-newtonianos, O'Brien et. al. (2011) afirma que o comportamento reológico de fluidos hiperconcentrados por partículas em suspensão varia em sua forma de controle da coesão, que é a característica de força de atração entre os componentes de um corpo, que impedem que ele se quebre: em fluidos menos concentrados, há predominância da dissipação de energia na forma de atrito com as superfícies por onde escoam. Por outro lado, em fluidos com grande concentração de sólidos suspensos, a dissipação de energia passa a ocorrer de forma intrínseca ao fluido, aumentando a predominância na dispersão de energia por colisões entre as partículas em relação ao atrito. A Tabela 3.4 apresenta uma classificação geral dos tipos de escoamentos em função das suas respectivas concentrações volumétricas.

Tabela 3.4 – Características dos escoamentos em função da sua concentração volumétrica de sólidos e descrição das suas características de escoamento

Característica do escoamento	Concentração volumétrica de sólidos (%)	Descrição geral do comportamento do escoamento
	0,65 até 0,80	Não há escoamento.

Característica do escoamento	Concentração volumétrica de sólidos (%)	Descrição geral do comportamento do escoamento
Escorregamentos	0,55 até 0,65	Deformações internas e movimento lento devido às tensões.
<i>Mudflow</i>	0,48 até 0,55	Escoamento evidente, apesar de lento; Deformações plásticas sem espraçamento sobre as superfícies adjacentes.
	0,45 até 0,48	Início de espraçamentos, apesar da atuação de forças coesivas.
<i>Mudflood</i>	0,40 até 0,45	Mistura-se com facilidade; Apresenta fluidez na deformação, alastrando-se sobre superfícies horizontais – durante a movimentação pode apresentar considerável declividade; Aparecimento de ondas de dissipação rápida.
	0,35 até 0,40	Acentuada sedimentação; Alastra-se quase por completo sobre superfícies horizontais; Identificação da fase líquida; Propagação de ondas na superfície.
	0,30 até 0,35	Fluido bifásico, com separação de água na superfície; Propagação de ondas com facilidade; Ocorre a decantação de partículas granulares.
	0,20 até 0,30	Há a ação de ondas na superfície; Superfície do escoamento fluida; Todas as granulometrias de partículas podem decantar.
Escoamento aquoso	< 0,20	Onda no estado líquido com sedimentos suspensos.

Adaptado de O'BRIEN et. al. (1993)

3.2.3.1 Simulação de fluidos hiperconcentrados considerando as propriedades reológicas no *software* HEC-RAS

As metodologias disponíveis para inserção das tensões de cisalhamento no HEC-RAS são descritas por USACE (2020) e Gibson et. al (2020) e são baseadas na DebrisLib (FLOYD et. al, 2020). Elas variam principalmente em função da concentração percentual volumétrica de partículas no fluido e, conseqüentemente, da forma de interação entre as partículas no que diz respeito à dissipação de energia - e de sua respectiva tensão de cisalhamento.

A Equação 6, composta por três parcelas principais, apresenta o equacionamento para modelagem deste tipo de fluido no HEC-RAS.

$$\tau = \tau_y + \mu * \left(\frac{dV_x}{dz}\right) + \rho_m * l_m^2 * \left(\frac{dV_x}{dz}\right)^2 + 0,01\rho_s * \left(\left(\frac{0,615}{C_v}\right)^{1/3} - 1\right)^{-2} * d_s^2 \left(\frac{dV_x}{dz}\right)^2 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

τ é a tensão cisalhante que deve ser aplicada para locomoção do fluido; τ_y é a taxa de tensão de cisalhamento interna; μ é a viscosidade dinâmica; ρ_m é a massa específica da mistura; ρ_s é a massa específica do sólido, d_s é o diâmetro representativo dos grãos; l_m é a velocidade de mistura de Prandtl e C_v é a concentração volumétrica do fluido.

Este equacionamento tem sua aplicação para cada tipo de fluido considerando diferentes parcelas, conforme a Figura 3.3. Assim, para simulação de fluidos hiperconcentrados com comportamento de plásticos de Bingham é aplicada a primeira parcela da equação; para aplicação em casos de *Mudflow*, onde ocorre um aumento da influência da turbulência interna entre as partículas no fluxo do escoamento, é adicionada a segunda parcela na equação, já a consideração também da terceira parcela ocorre para casos de fluxos de detritos, onde há concentração tão grande de partículas que a dissipação interna de energia passa a ser dominante em relação ao atrito. A Tabela 3.5 apresenta um resumo das metodologias conforme descritas por Gibson et. al (2020), USACE

(2020) e FLOYD et. al (2020), além de apresentar maior detalhamento na descrição dos métodos e as concentrações volumétricas para cada faixa simulada.

Figura 3.3 – Equação para modelagem de fluidos não-newtonianos no HEC-RAS separada em parcelas de acordo com a concentração do fluido simulado

$$\tau = \tau_y + \mu * \left(\frac{dV_x}{dz}\right) + \rho_m * l_m^2 * \left(\frac{dV_x}{dz}\right)^2 + 0,01\rho_s * \left(\left(\frac{0,615}{C_v}\right)^{1/3} - 1\right)^{-2} * d_s^2 \left(\frac{dV_x}{dz}\right)^2$$

Plásticos de Bingham

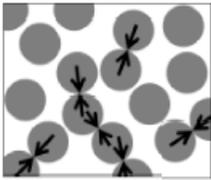
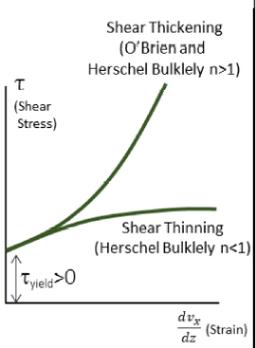
Mudflow

Fluxos de detritos

Fonte: adaptado de USACE (2020).

Tabela 3.5 – Resumo das metodologias de simulação de fluidos hiperconcentrados no HEC-RAS a partir da versão 6.0

Classificação do fluido	Processo	Figura esquemática das características do fluido e interação dominante entre as partículas	Limites	Parcela do equacionamento utilizada na consideração das componentes de cisalhamento no HEC-RAS	Gráfico do modelo reológico*
Transporte de sedimentos	Fluido Newtoniano: relação linear entre a força a ser aplicada no fluido e a tensão de cisalhamento.		$Cv^{**} < 5\%$	-	
Fluidos hiperconcentrados	Plástico de Bingham: a relação entre a força a ser aplicada no fluido e a tensão de cisalhamento segue linear, entretanto o coeficiente angular da relação aumenta em função da viscosidade dinâmica do fluido. Além disso, deve ser vencida a resistência à tensão cisalhante inicial.		$Cv^{**} > 5\%$	Parcela: $\tau_y + \mu * \left(\frac{dV_x}{dz}\right)$	
Mudflow	Há um aumento da influência da turbulência entre partículas sobre o comportamento do fluido			Parcela: $\tau_y + \mu * \left(\frac{dV_x}{dz}\right) + \rho_m * l_m^2 * \left(\frac{dV_x}{dz}\right)^2$	

Classificação do fluido	Processo	Figura esquemática das características do fluido e interação dominante entre as partículas	Limites	Parcela do equacionamento utilizada na consideração das componentes de cisalhamento no HEC-RAS	Gráfico do modelo reológico*
Fluxo de detritos	A colisão entre os grãos governa o comportamento do fluido, com a dissipação de energia por este contato se tornando dominante sobre a perda de energia por atrito.		Nº de Bagnold*** > 40	<p>Parcela:</p> $\tau_y + \mu * \left(\frac{dV_x}{dz}\right) + \rho_m * l_m^2 * \left(\frac{dV_x}{dz}\right)^2 +$ $+ 0,01\rho_s * \left(\left(\frac{0,615}{C_v}\right)^{1/3} - 1\right)^{-2} * d_s^2 \left(\frac{dV_x}{dz}\right)^2$	

*"Shear stress" é a tensão de cisalhamento, enquanto "Strain" é a tensão a ser aplicada, em tradução livre, foi utilizada como a "força a ser aplicada" no restante da tabela.

** C_v é a concentração volumétrica

** O número de Bagnold é um número adimensional utilizado para caracterização reológica do fluido: até certo limite, há predominância da dissipação de energia por atrito, após, a dissipação predominante ocorre por colisões entre as partículas em suspensão (SOTERRONI, 2007).

Fonte: adaptado de Gibson et. al (2020), USACE (2020) e FLOYD et. al (2020).

3.2.3.2 Simulação de fluidos hiperconcentrados considerando escoamento Newtoniano e o aumento do coeficiente de Manning no *software* HEC- RAS

Anteriormente à possibilidade de simulação com a inserção de características reológicas, para a simulação de fluidos não-newtonianos, uma prática comumente adotada era a utilização de elevados coeficientes de Manning, a fim para simular os até então não considerados efeitos da propagação de fluidos não newtonianos e de contração/expansão do fluido. Esta metodologia foi descrita por VENTURA (2011). Técnicas como essa foram aplicadas em estudos como o de MACHADO et. al (2017), baseados na Equação 7. Ressalta-se que esta equação é aplicada para fluidos em regime turbulento.

$$n_{bulked} = \left(\frac{\nu}{\nu_{bulked}} \right)^{1/9} * n \quad \text{Equação 7}$$

Onde: n_{bulked} n é o coeficiente de Manning para o escoamento hiperconcentrado ($s.m^{-1/3}$); ν é a viscosidade cinemática da água (m^2/s) e ν_{bulked} é a viscosidade cinemática do escoamento hiperconcentrado (m^2/s).

A viscosidade cinemática para diferentes fluidos é definida como a razão entre a viscosidade dinâmica e a massa específica (Equação 8).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Equação 8}$$

Onde: ν é a viscosidade cinemática do fluido (m^2/s), μ é a viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s) e ρ é a massa específica (kg/m^3).

Valores típicos para o coeficiente de Manning em diferentes superfícies são apresentados na Tabela 3.6. Assim, considerando que a Equação 7 resulta em um valor multiplicador do coeficiente de Manning original do local, a diferença entre o coeficiente de Manning do local e aquele representativo do escoamento que carrega partículas será função das suas viscosidades dinâmicas.

Tabela 3.6 - Valores típicos para o coeficiente de Manning

Local de escoamento	Descrição	Mínimo (s.m ^{-1/3})	Normal (s.m ^{-1/3})	Máximo (s.m ^{-1/3})
Canais construídos	Concreto, para diversas situações	0,011	0,018	0,027
	Asfalto, para diversas situações	0,013	0,016	0,016
Rios naturais	Limpo, pouco sinuoso e sem grandes obstruções	0,025	0,030	0,033
	Igual ao anterior, com alguns matacões e pedras	0,030	0,035	0,040
	Limpo, sinuoso com alguns bancos de areia	0,033	0,040	0,045
	Igual ao anterior, com obstruções, pedras, zonas inefetivas	0,045	0,050	0,060
	Trechos sinuosos, vagarosos com obstruções e muitas zonas inefetivas	0,050	0,070	0,080
	Trechos sinuoso com muitos obstáculos, vegetação e bancos de areia	0,070	0,100	0,150
Zonas de inundação	Zonas com gramíneas apenas	0,025	0,032	0,050
	Zonas agrícolas	0,020	0,035	0,050
	Vegetação densa de pequeno porte	0,045	0,085	0,160
	Zona limpa com árvores bem espaçadas	0,030	0,040	0,050
	Vegetação não fechada e presença de algumas árvores	0,035	0,055	0,080
	Vegetação média e obstáculos naturais consideráveis para o escoamento	0,080	0,100	0,120
	Vegetação densa em diversos estágios evolutivos. Mata fechada.	0,110	0,150	0,200

Fonte: adaptado de USACE (2016).

3.3 Estudos que aplicaram o *software* HEC-RAS para rompimentos de barragens

O *software* HEC-RAS tem ampla aplicação em estudos de rompimentos de barragens de água, tanto no Brasil, como são os exemplos de estudos de KUHLEKAMP (2016), MARAGNONI (2017), SANTOS (2019) quanto no mundo, como URIZCÃ (2021), BRUNNER (2003), TOPAXI (2021), PILOTTI (2020). Em 2020, com o lançamento da versão 6.0, que permite a simulação de fluidos

não-newtonianos tanto em modelagens 1D quanto 2D (USACE – *Release notes* versão 6.0, 2021), possibilitou também a aplicação do *software* para simulações de rompimentos de barragens de rejeitos.

Por ser uma ferramenta recente, existem poucos estudos que avaliaram os efeitos da possibilidade de simulação de fluidos não-newtonianos no HEC-RAS. Foram encontrados alguns trabalhos que realizaram estudos com estes fluidos no *software* HEC-RAS, conforme listado a seguir. Ressalta-se que a incipiência dos estudos aplicando a ferramenta corrobora com a necessidade da elaboração de trabalhos como o presente estudo.

- a) GIBSON (2022), que realizou simulações considerando fluidos não-newtonianos no HEC-RAS 6.1 para os rompimentos de Santa Barbara e Brumadinho e os comparou com as informações disponíveis sobre os eventos, concluindo que tanto as manchas de inundação quanto tempos de chegada de ondas foram coerentes com os observados nos acidentes reais.
- b) GIBSON (2020), que realizou uma comparação entre resultados experimentais com os simulados no HEC-RAS, com foco na propagação em calha de fluxos de detritos e concluiu que os resultados das velocidades nas simulações considerando fluidos não-newtonianos se aproximaram mais dos casos experimentais, entretanto, ainda divergiram consideravelmente das velocidades atingidas em alguns dos casos observados. No caso de parâmetros como turbulência, o modelo deixou a desejar em análises de mistura e dispersão, mas reproduziu bem os perfis de velocidades atingidos.
- c) BRANDÃO (2019), que realizou modelagens hidrodinâmicas de rompimento da barragem de Fundão em 2016, com os *softwares* HEC-RAS (1D e 2D) e as comparou com os resultados do modelo RiverFlow2D, aplicando tanto fluidos newtonianos quanto não-newtonianos, e concluindo que a utilização de coeficientes de viscosidade reduz o tempo de chegada de onda, mas não alteram significativamente as profundidades atingidas. Ressalta-se que a versão do HEC-RAS neste

trabalho foi a 4.1 e, portanto, a modelagem com fluidos newtonianos foi realizada apenas no RiverFlow2D.

- d) MACHADO (2018) realizou uma comparação entre simulação com o HEC-RAS 5.0.1 com ajuste dos coeficientes de Manning em busca de um aumento na semelhança da simulação de fluidos *newtonianos* com hiperconcentrados HEC-RAS em relação à uma modelagem de fluidos não-newtonianos no *software* FLO-2D PRO. Os resultados apontaram que as áreas inundadas obtidas foram semelhantes, inclusive quando comparados à mancha real do rompimento da barragem de Fundão - entretanto os parâmetros de velocidades, profundidades máximas e tempo de chegada divergiram.

A Tabela 3.7 apresenta uma listagem dos trabalhos citados neste capítulo, com destaque para o fluido simulado. Ressalta-se que todos os trabalhos apresentados na tabela são relacionados com rompimento de barragens. Como pode ser visto na tabela, trabalho seria o terceiro, a partir da pesquisa feita pela autora, que explora a sensibilidade do modelo HEC-RAS para simulações de fluidos não-newtonianos, sendo os demais de autoria de Standford Gibson, responsável pela implementação deste tipo de simulação no *software*.

Tabela 3.7 - Resumo dos trabalhos pesquisados com enfoque no tipo de fluido simulado e no software utilizado em cada um deles

Ano	Nome do autor	Título	Tipo de fluido simulado	Software utilizado
2022	GIBSON	Prototype Scale Evaluation of Non-Newtonian Algorithms in HEC-RAS: Mud and Debris Flow Case Studies of Santa Barbara and Brumadinho	Não-newtoniano	HEC-RAS
2021	URIZCĂ	Using 2D HEC-RAS Modeling and Embankment Dam Break Scenario for Assessing the Flood Control Capacity of a Multi-Reservoir System (NE Romania).	Água	HEC-RAS
2021	TOPAXI	Analysis of Flooding by Dam Breaking Using the 2D HEC-RAS Model: Case Study of the Mulacorral Dam, Tungurahua Province, Ecuador.	Água	HEC-RAS
2020	PILOTTI	Dam-break wave propagation in Alpine valley with HEC-RAS 2D: experimental Cancano test case.	Água	HEC-RAS

Ano	Nome do autor	Título	Tipo de fluido simulado	Software utilizado
2020	GIBSON	Comparing single-phase, non-Newtonian approaches with experimental results: Validating flume-scale mud and debris flow in HEC-RAS	Não-newtoniano	HEC-RAS
2019	SANTOS	Simulação do rompimento hipotético da barragem de Juturnaíba, localizada no estado do Rio de Janeiro	Água	HEC-RAS
2019	BRANDÃO	Modelagem Hidrodinâmica Uni e Bidimensional Aplicada ao Rompimento da Barragem do Fundão em Mariana/MG.	Não-newtoniano	HEC-RAS para simulações newtonianas e <i>Riverflow</i> para fluidos newtonianos
2017	MARAGNONI	A utilização do HEC-RAS determinar cota de inundação na ruptura hipotética de uma barragem - estudo de caso da PCH salto buriti	Água	HEC-RAS
2017	MACHADO	Modelagem Hidráulica 1D e 2D de fluidos hiperconcentrados no HEC-RAS - estudo de caso da ruptura da barragem do Fundão.	Não-newtoniano	HEC-RAS para simulações newtonianas e FLO-2D PRO para fluidos newtonianos
2016	KUHLKAMP	Análise do efeito em cascata da propagação da onda de cheia gerada pelo rompimento hipotético de uma das barragens existentes no rio Irani-SC	Água	HEC-RAS
2003	BRUNNER	Dam and levee breaching with HEC-RAS. In: World Water & Environmental Resources Congress 2003.	Água	HEC-RAS

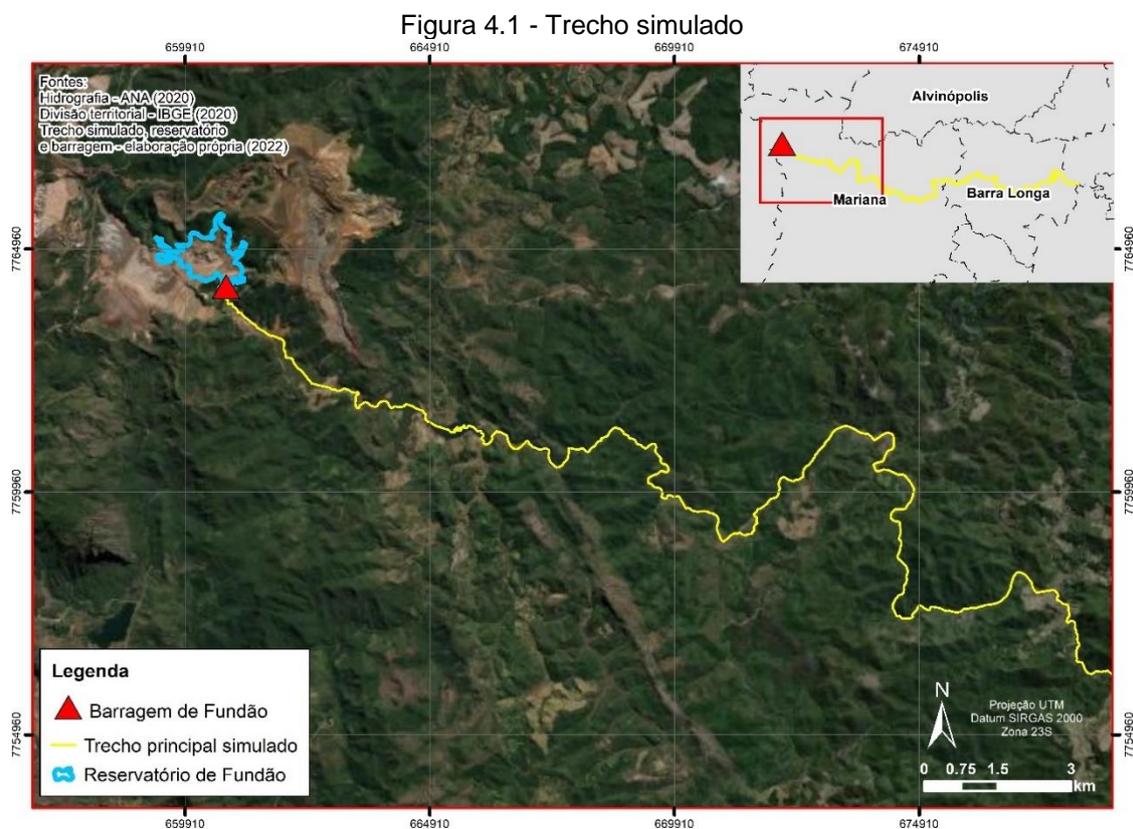
Fonte: elaboração própria, 2022.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo trata-se de um cenário de local fictício com dimensões baseadas na barragem de Fundão, que rompeu em 2015. Esta área foi selecionada a fim de que o modelo se mantivesse com dimensões físicas de uma barragem de rejeitos, entretanto, como o objetivo do estudo não é simular e acertar o evento de rompimento, mas sim avaliar o desempenho do modelo hidrodinâmico em si, a simulação não foi realizada de forma que possa responder perguntas sobre este evento em específico.

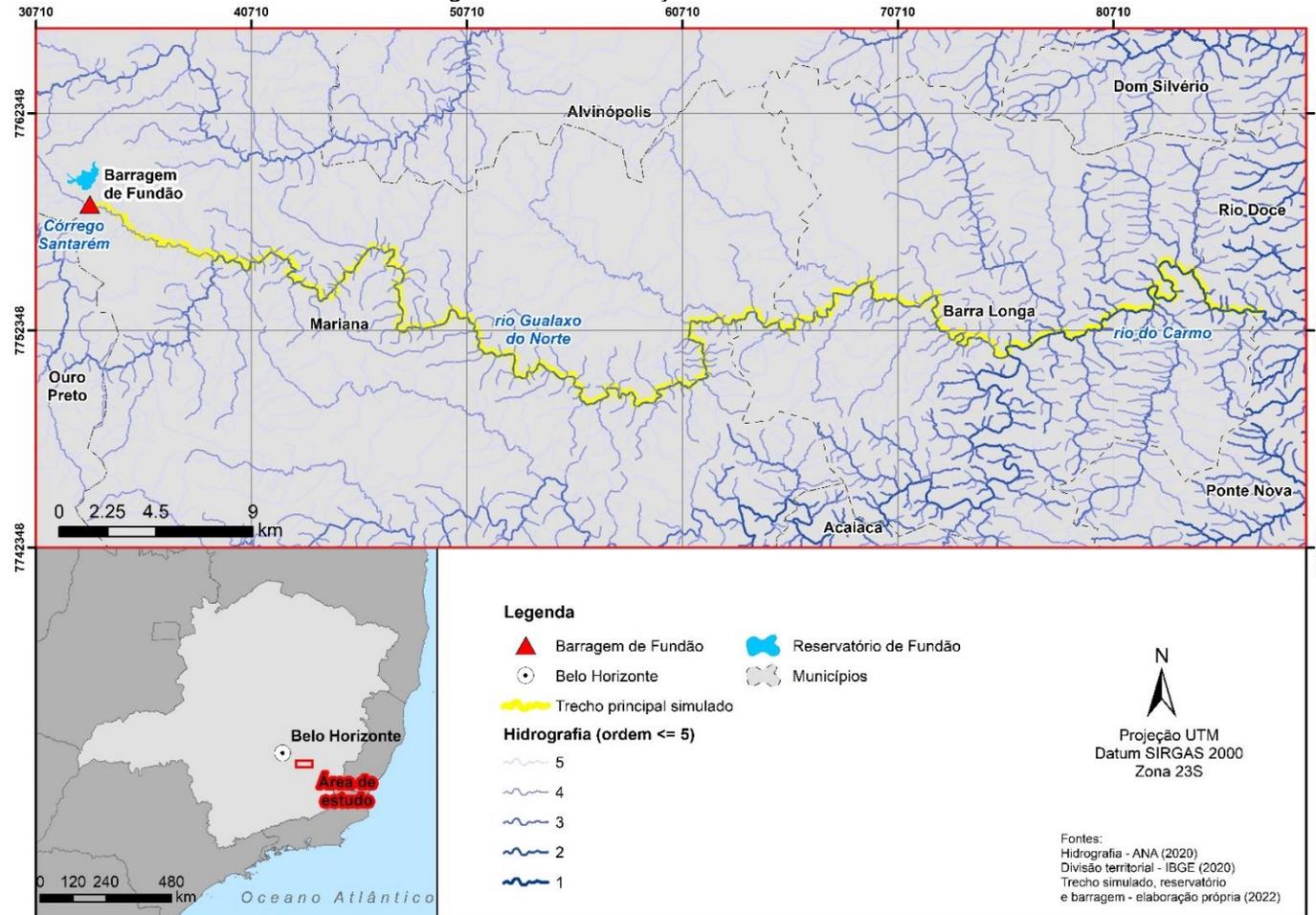
A barragem de Fundão faz parte do complexo da Mina do Germano, localizado entre os municípios de Ouro Preto e Mariana, na região central do Estado de Minas Gerais. Entretanto, em função do objetivo do trabalho, não foram simuladas as demais barragens e diques presentes a montante e a jusante no sistema.

A Figura 4.2 apresenta a área de estudo. O barramento de Fundão está localizado em um afluente do córrego Santarém, que deságua no rio Gualaxo do Norte, onde percorre 87 km até o rio do Carmo, que por sua vez desemboca no rio Doce. O seu reservatório possuía uma área inundada de aproximadamente 0,95 km², situada no município de Mariana. O trecho simulado corresponde aos 100 km a jusante da barragem de Fundão, antes de chegar no rio do Carmo, passando os municípios de Mariana e Barra Longa. As características de uso do solo na região próxima ao barramento podem ser melhor visualizadas na Figura 4.1.



Fonte: elaboração própria, 2022.

Figura 4.2 - Localização da área de estudo

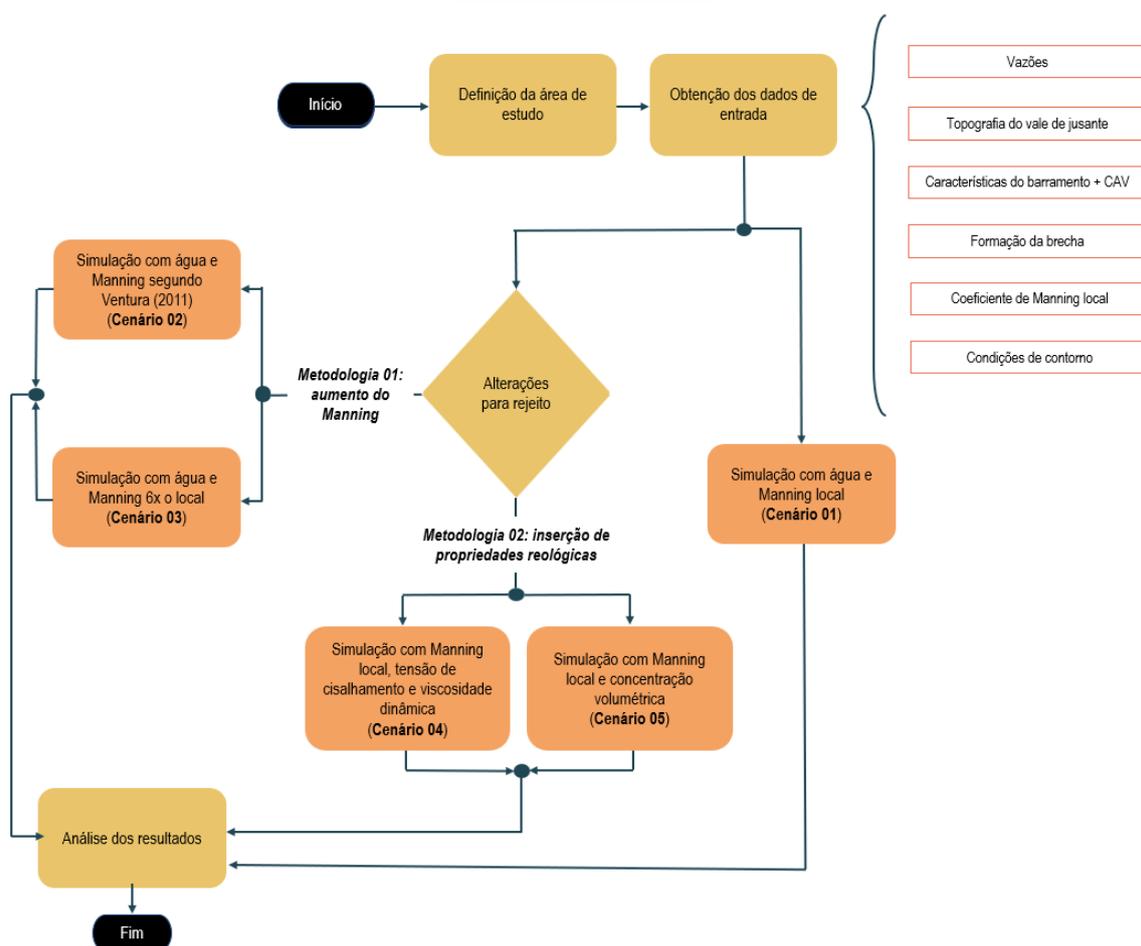


Fonte: elaboração própria, 2022.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as etapas utilizadas para o desenvolvimento do estudo, que foi baseado em diferentes simulações realizadas com o *software* HEC-RAS em sua versão 6.2. A Figura 5.1 apresenta um fluxograma geral das etapas de realização do trabalho.

Figura 5.1 - Fluxograma geral das etapas de realização do trabalho



Fonte: elaboração própria, 2022.

Para a avaliação das diferenças entre as metodologias disponíveis, foram simulados cinco cenários, conforme:

- Cenário 1 (C1) – simulação considerando o Manning estabelecido para o local e o fluido propagado água. Esta simulação foi realizada como parâmetro de controle das demais;
- Cenário 2 (C2) – simulação considerando a metodologia de aumento de Manning descrita por VENTURA (2011) – item 3.2.3.2 - e água;
- Cenário 3 (C3) – simulação considerando a metodologia de aumento de Manning mais extremo, maior do que 5x o coeficiente de Manning utilizado para a simulação com a água. Nesta simulação, foi aumentado 6x o Manning local estabelecido para as demais simulações;
- Cenário 4 (C4) – simulação para a metodologia de fluido não-newtoniano, descrita no item 3.2.3, considerando as propriedades do fluido (plástico de Bingham) e o Manning estabelecido para o local;
- Cenário 5 (C5) – simulação para a metodologia de fluido não-newtoniano, descrita no item 3.2.3, considerando como dado prévio apenas a concentração volumétrica (plástico de Bingham) e o Manning estabelecido para o local;

Este capítulo foi subdividido em: (i) parâmetros de entrada, que apresenta uma breve descrição das variáveis utilizadas no modelo e suas metodologias de obtenção; (ii) topologia do modelo, que apresenta as condições de contorno e demais parâmetros utilizados, bem como os cenários estudados; (iii) pontos notáveis e áreas de interesse, que apresenta os locais de extração de resultados e (iv) experimentos realizados - cenários, que apresenta os dados de entrada de cada um dos cenários simulados.

5.1 Parâmetros de entrada

5.1.1 Vazões

A simulação foi realizada considerando o rompimento da barragem em *SunnyDay* e, portanto, sem a ocorrência de chuvas e vazões extremas. Assim, a simulação foi realizada considerando a Q_{mit} (vazão média de longo período) do Plano de Bacia Hidrográfica do rio Doce (Consórcio Ecoplan-Lume, 2010) para

Tabela 5.1 - Vazões específicas para a sub-bacia do rio do Carmo e vazões nas bacias simuladas

Sub-bacia	Área de drenagem	Vazão específica (L/s)			Vazão (m³/s)		
		Q _{mit}	Q ₉₅	Q _{7,10}	Q _{mit}	Q ₉₅	Q _{7,10}
Rio do Carmo	2265	22,2	11,2	9,38	50,3	25,4	32
Bacia da barragem de Fundão	12,99*				0,29**	0,15**	0,12**
Bacia do rio Gualaxo do Norte	560*				12,43**	6,27**	5,25**

*Áreas das bacias obtidas através de geoprocessamento com base no SRTM;

**Vazões para as bacias obtidas pela multiplicação da vazão específica pela respectiva área.

Fonte: adaptado de Consórcio Ecoplan-Lume, 2010

A vazão de entrada considerada no modelo foi considerada constante, com um valor de 12m³/s, correspondendo à vazão da bacia do rio Gualaxo do Norte.

5.1.2 Topografia do vale de jusante

Neste estudo, a topografia utilizada para o vale de jusante e, portanto, para a análise da propagação das vazões e dispersões dos rejeitos foi baseada no Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (FARR et al., 2007), disponibilizado com resolução horizontal de 30m pela USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos).

Devido à característica de obtenção do MDE do SRTM – aerofotogrametria de interferometria SAR - ele não representa corretamente as calhas dos cursos hídricos, por não ser capaz de ultrapassar a superfície da água. Portanto, foi realizada uma adequação no MDE, por meio de geoprocessamento no *software* ArcGIS versão 10.7, a fim de que este represente informações batimétricas fictícias. Este processo é conhecido como *stream burning*. Ressalta-se aqui que em estudos cuja vazão simulada ultrapassa muitas vezes o volume cuja calha do rio é capaz de transportar, a correta representação da calha passa a ter menor relevância relativa. Sendo este o caso de simulações de rompimentos de barragens, entende-se que esta é uma incerteza menor no contexto da pesquisa realizada.

Para a construção da calha foi realizada a delimitação vetorial do curso principal, conversão do arquivo de formato em matriz com a profundidade de 3m



determinada e redução desta profundidade no MDE do SRTM. A vetorização do curso principal foi realizada com base em imagens de satélite do *Google Earth*. E, por fim, realizou-se a subtração da calha no modelo de elevação, considerando uma calha retangular e homogênea em toda a extensão do curso principal simulado. A opção pelo formato retangular de calha ocorre para que esta represente uma seção de controle adequada para visualização dos resultados, sem interferências acentuadas de diferentes profundidades no curso hídrico.

A Figura 5.3 apresenta o MDE utilizado no estudo, com as modificações de calha realizadas e a Figura 5.4 apresenta uma aproximação da calha na região logo a jusante da barragem.

Figura 5.3 - Topografia do vale de jusante: MDE com inserção da calha

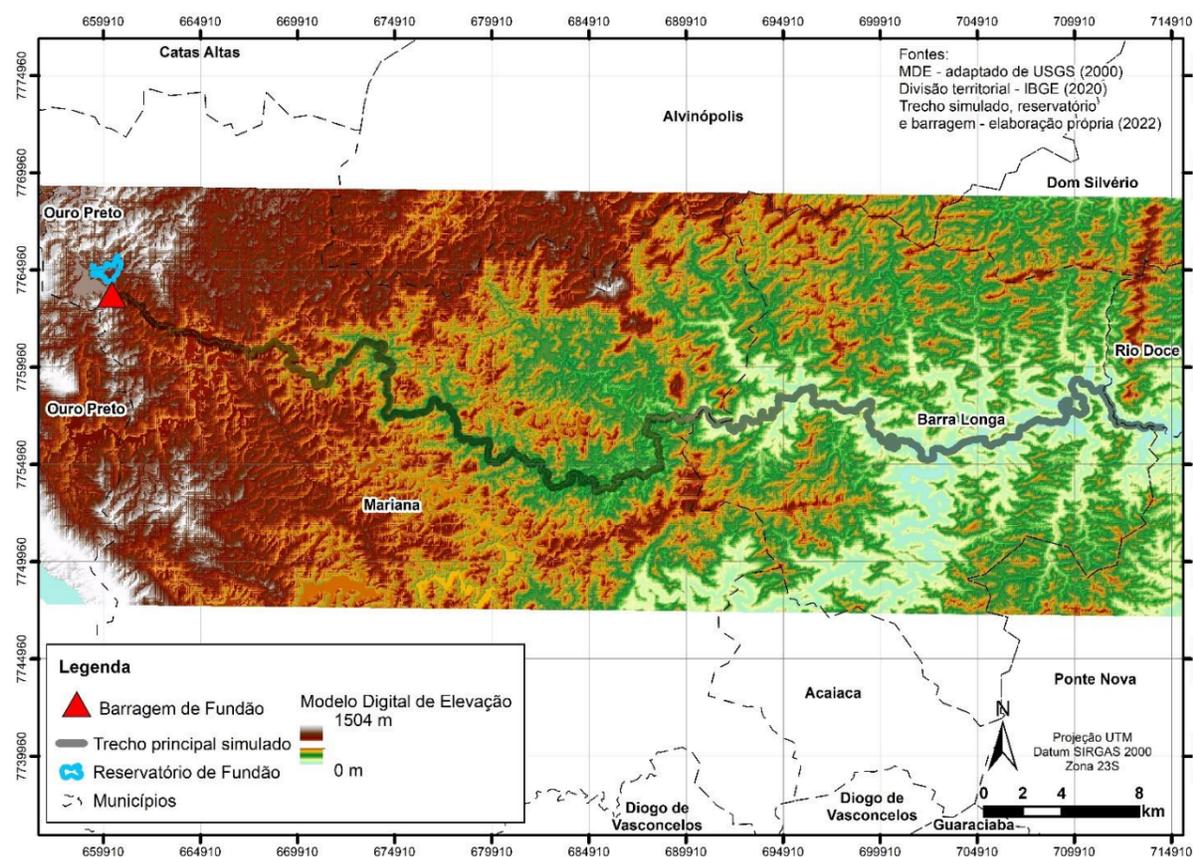
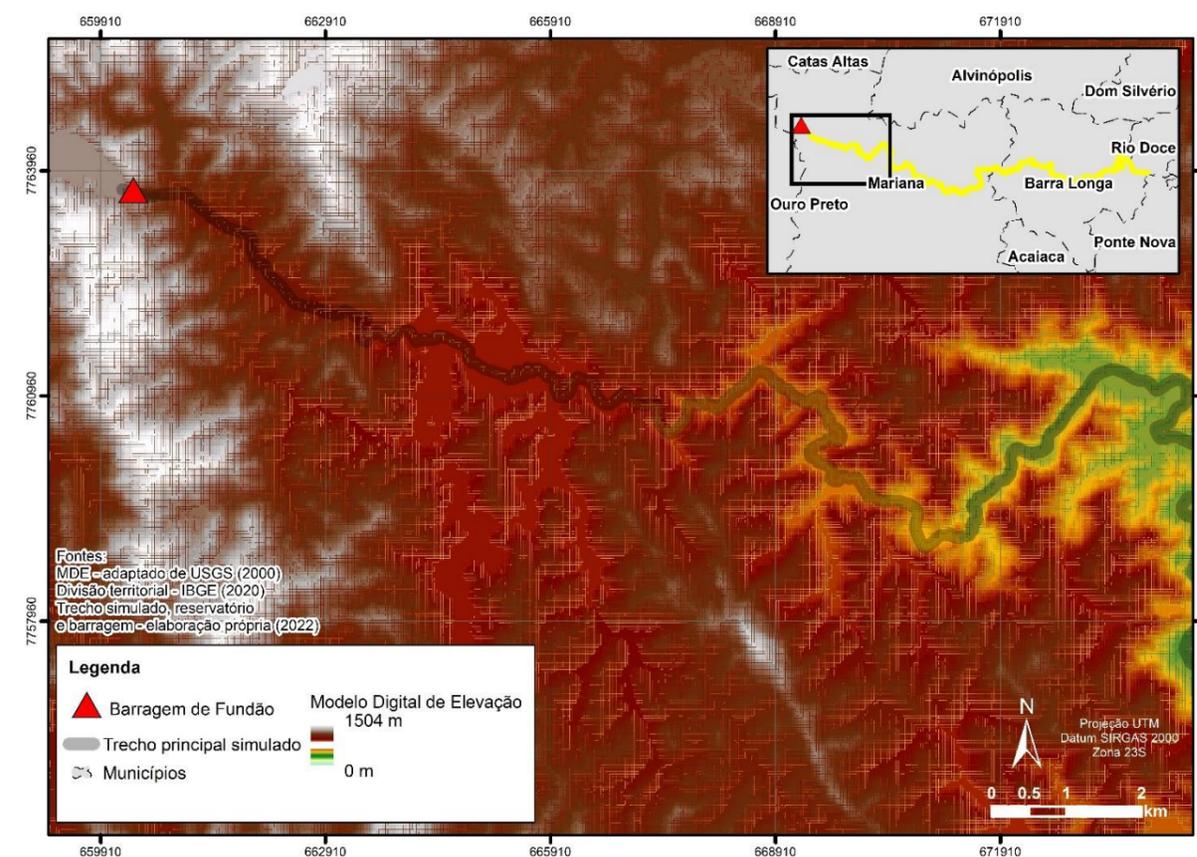


Figura 5.4 - Topografia do vale de jusante: zoom no MDE com inserção da calha na região logo a jusante do barramento



Fonte: elaboração própria, 2022.



5.1.3 Características do barramento e curva cota-área-volume

A Tabela 5.2 apresenta as principais características do reservatório de Fundão, conforme BRANDÃO (2019) e SANDRONI, S; GUIDO, G (2021), no qual as dimensões foram baseadas em relação às características do reservatório simulado (barragem análoga simulada). Já a Tabela 5.3 apresenta a curva cota-volume do reservatório de Fundão, que foi utilizada na íntegra para a simulação. Ressalta-se aqui que a simulação considerou que todo o volume do reservatório foi mobilizado no rompimento, conforme a diretriz da Defesa Civil do Estado de Minas Gerais, através do Ofício Circular 02-2019 GMG/CEDEC (CEDEC, 2019).

Tabela 5.2 – Características da barragem simulada

Parâmetro	Barragem de Fundão	Barragem análoga	Observações
Tipo de barramento	Barragem de terra para contenção de rejeitos	Barragem de terra	Configuração indisponível no modelo.
Método construtivo	A montante	-	Configuração indisponível no modelo.
Cota da crista do barramento	900 m	900 m	
Altura do barramento	110 m	90 m	Corresponde à diferença entre a cota de fundo do MDE utilizado para a calha e a altura do barramento.
Cota do fundo do vale	790 m	810 m	Corresponde à cota de fundo do MDE utilizado para a calha correspondente.
Comprimento da barragem	700 m	400 m	Esta diferença ocorre em função do valor de 700m corresponder à cota mais elevada construída. Entretanto, no MDE utilizado, as informações de calha não estão disponíveis para esta cota, visto que a calha está preenchida de água. Assim, para a simulação foi utilizado o primeiro vale encaixado encontrado a jusante do barramento.
Largura do barramento no dique de partida	150 m	150 m	
Largura total do barramento considerando os alteamentos a montante	375 m	130 m	Foi adotada uma largura de 130 m porque o modelo não permite a simulação dos alteamentos a montante. Assim, adotou-se a largura em contato com o solo.

Fonte: adaptado de BRANDÃO (2019) e SANDRONI, S; GUIDO, G (2021).

Tabela 5.3 - Curva cota - volume do reservatório

Elevação (m)	Volume (hm ³)
790	0,00
795	0,14
800	0,42
805	0,83
810	1,49
815	2,34
820	3,46
825	4,85
830	6,57
835	8,61
840	11,02
845	13,88
850	17,24
855	21,08
860	25,39
865	30,26
870	35,71
875	41,83
880	48,12
885	54,42
890	61,37
895	68,87
900	76,69

Fonte: adaptado de MACHADO, 2017.

5.1.4 Formação de brecha

Dois parâmetros relevantes para a simulação de rompimentos de barragens e que agregam grande incerteza aos estudos são relativos à formação da brecha a ser considerada, sendo eles: o tempo de formação da brecha e seu respectivo formato. Praticamente não são encontrados em bibliografia estudos e

diretrizes referentes aos parâmetros para formação da brecha, especialmente para o caso de barragens de rejeitos rompidas por liquefação. Uma alternativa para este caso é o uso de dados não-sistêmicos de evidência documental (Vanelli et al., 2020), tal como imagens e vídeos existentes, de forma a estimar os parâmetros de formação da brecha.

Assim, considerando que o rompimento da barragem de Fundão ocorreu por liquefação, o tempo de formação de brecha utilizado foi de 1 minuto. Esta condição foi embasada na observação de vídeos de rompimentos de barragens de rejeito, como o disponibilizado na plataforma *YouTube* por CASSIO, E. I., em 29 de novembro de 2015, referente ao rompimento de Fundão, que possibilitam a observação de que o intervalo decorrido entre o início dos escorregamentos e o início da mobilização do material leva aproximadamente este tempo para ocorrer. Ressalta-se aqui, como outro *benchmark*, que o rompimento da barragem do córrego do Feijão, em Brumadinho, também rompeu por liquefação e que o tempo de rompimento foi de cerca de 5 segundos - vídeo disponibilizado na plataforma *YouTube* por FORNI, J. J., em 21 de novembro de 2020.

Seguindo a mesma lógica de análise dos vídeos dos eventos ocorridos, observa-se que o maciço foi completamente mobilizado em ambos os eventos. Além disso, conforme citado no item 5.1.3 em falhas por liquefação, a Defesa Civil de Minas Gerais indica que todo o maciço deve ser mobilizado (CEDEC, 2019). A Figura 5.5 apresenta o formato da considerado para o rompimento, enquanto os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 5.4. Ressalta-se que a brecha computacional não corresponde a todo o maciço apenas por limitações impostas tanto pelo HEC-RAS quanto pelo MDE utilizado, que apresenta células com divergências de cotas para a seção do barramento. Ainda, a Figura 5.5 aparenta que o terreno é a linha cinza, com cota de fundo em cerca de 880 m, entretanto, esta é uma falha de visualização do software e a cota de fundo considerada para a brecha foi de 820 m.

Figura 5.5 - Formato da brecha

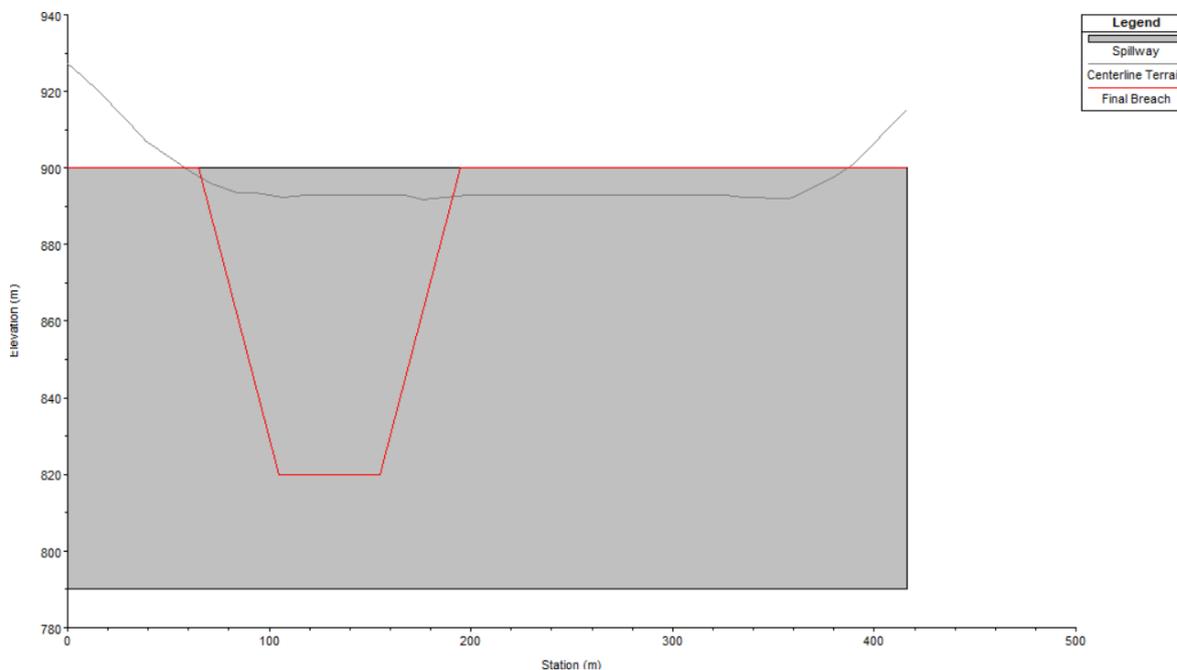


Tabela 5.4 - Dados de entrada para a brecha simulada

Parâmetro	Valor utilizado
Estação central (<i>Center station</i>)	130 m
Largura do fundo (<i>Final botton width</i>)	50 m
Elevação final do fundo (<i>Final botton elevation</i>)	820 m
Declividade do talude esquerdo (<i>Left side slope</i>)	0,5
Declividade do talude direito (<i>Right side slope</i>)	0,5
Coefficiente de formação de brecha (<i>Breach weir coefficient</i>)	Valor padrão
Tempo de formação da brecha (<i>Breach formation time</i>)	0,01 h
Modo de falha (<i>Failure mode</i>)	Galgamento
Gatilho de falha em tempo setado (<i>Trigger failure – set time</i>)	Data de falha setada para 5 dias após o início da simulação, a fim de que as vazões de base já estivessem estabelecidas.

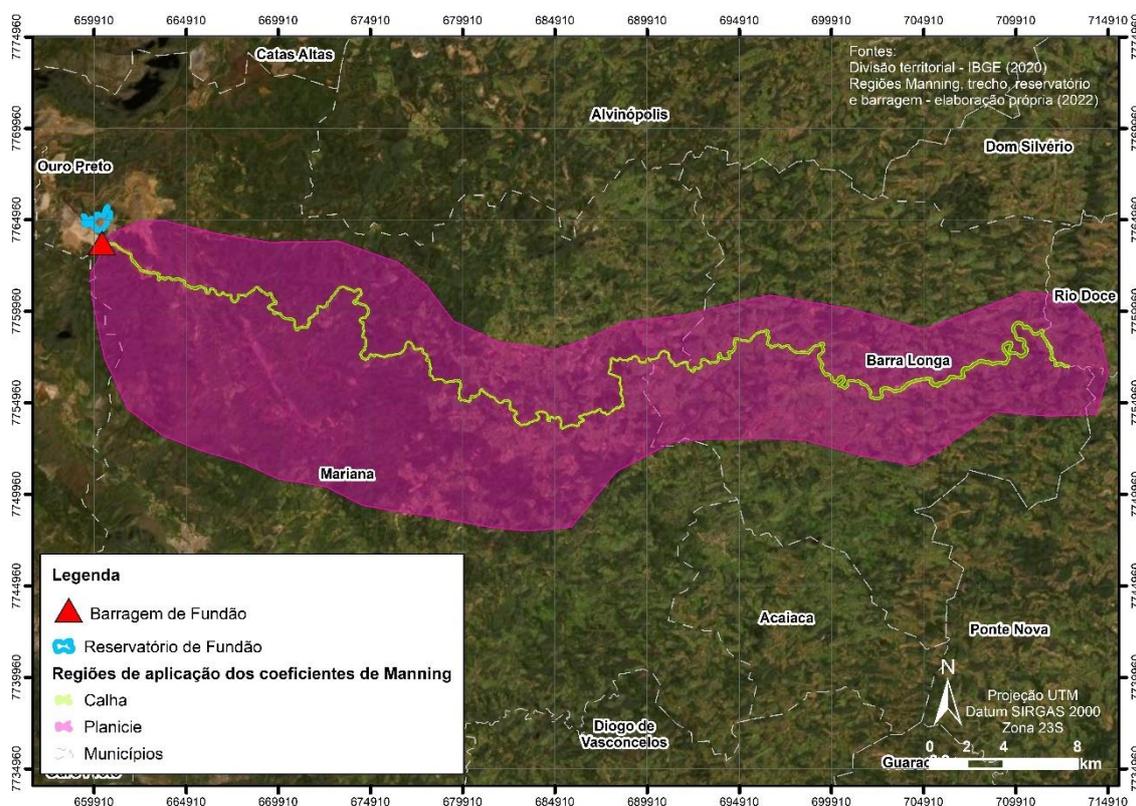
Fonte: elaboração própria, 2022.

5.1.5 Rugosidade: Coeficiente de Manning

O coeficiente de Manning é utilizado no HEC-RAS para representar a resistência ao escoamento devido à rugosidade das superfícies. O item 3.2.3.2 apresenta uma tabela com os valores típicos aplicados deste coeficiente em diferentes superfícies. Para as simulações realizadas estabeleceu-se um coeficiente para o canal e outro para a planície de inundação, cujos polígonos correspondentes podem ser visualizados na Figura 5.6.

Como em alguns dos cenários simulados foi alterado o valor do coeficiente, adotou-se o coeficiente de Manning da planície como sendo sempre o dobro do coeficiente de Manning do canal. Assim, para a simulação considerando o cenário padrão do local, adotou-se um coeficiente de Manning para o canal de $0,03 \text{ (s.m}^{-1/3}\text{)}$ e para a planície de $0,06 \text{ (s.m}^{-1/3}\text{)}$ – sendo estes valores alterados nos respectivos cenários, conforme descrito no item 5.4

Figura 5.6 -Poligonais utilizadas para o coeficiente de Manning



Fonte: elaboração própria, 2022.

5.1.6 Reologia do fluido

Foram realizadas duas simulações para plástico de Bingham considerando a reologia do fluido de formas diferentes, sendo elas: (1) com base nas características reológicas analisadas por BRANDÃO (2019), que compilou as análises de FERREIRA (2016), MORGENSTERN et al. (2016) e MACHADO (2017) para a barragem do Fundão, cujas características são apresentadas na Tabela 5.5 e (2) considerando como dado de entrada disponível apenas a concentração volumétrica (Cv).

Tabela 5.5 – Características reológicas do fluido simulado no cenário baseado em características experimentais da suspensão mineral

Propriedade	Símbolo	Valor
Massa específica ponderada (kg/m ³)	ρ	1599,42
Concentração volumétrica ponderada (%)	Cv	23
Tensão de escoamento (Pa)	τ_y	20,94
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	μ	0,16

Fonte: adaptado de BRANDÃO (2019).

Para a primeira simulação foi utilizada a inserção das componentes de cisalhamento (tensão de cisalhamento e viscosidade dinâmica).

Já para a segunda simulação, foi utilizada a inserção de razão de viscosidade, cujos dados de entrada são a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação viscosa. Para isto, considerando que o único dado de entrada era a concentração volumétrica, buscou-se em bibliografia análises realizadas em minério de ferro para encontrar as características reológicas destas suspensões. Especificamente para minério de ferro, foram encontrados os estudos de (i) DIAS (2017), que avaliou diferentes concentrações de minérios provenientes de minas de ferro no Brasil, entretanto, a faixa de concentração do estava fora do intervalo dos estudos, e (ii) COELHO (1982), que avaliou as propriedades reológicas de suspensões minerais de diferentes concentrações em diversas temperaturas. Assim, com base nos estudos de Coelho (1982), considerando uma concentração volumétrica de 23%, que correspondeu a uma concentração

percentual em peso de 45%, foram encontradas as características apresentadas na Tabela 5.6

Tabela 5.6 – Características reológicas do fluido simulado no cenário baseado na concentração volumétrica

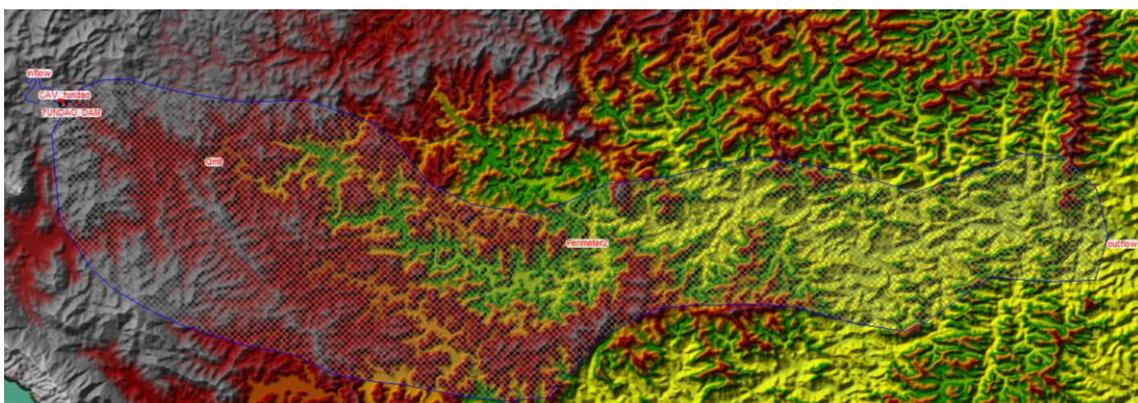
Propriedade	Símbolo	Valor
Concentração volumétrica ponderada (%)	Cv	23
Concentração percentual em peso (%)	Cw	45
Tensão de escoamento (Pa)	τ_y	50
Taxa de deformação viscosa (1/s)	r	0,9

Fonte: adaptado de COELHO (1982).

5.2 Topologia do modelo

O modelo simulado foi o HEC-RAS, na versão 6.2. Ele foi montado a partir da inserção uma área de armazenamento (*storage area*), correspondente à CAV do reservatório (apresentada no item 5.1.3) e de uma poligonal de correspondente ao perímetro de simulação (apresentada no item 5.2.1), ambas conectadas pelo reservatório simulado. Além disso, foram inseridas as três condições de contorno (também apresentadas no item 5.2.1). A Figura 5.7 apresenta uma figura esquemática do modelo

Figura 5.7 - Topologia do modelo simulado



Fonte: elaboração própria, 2022.

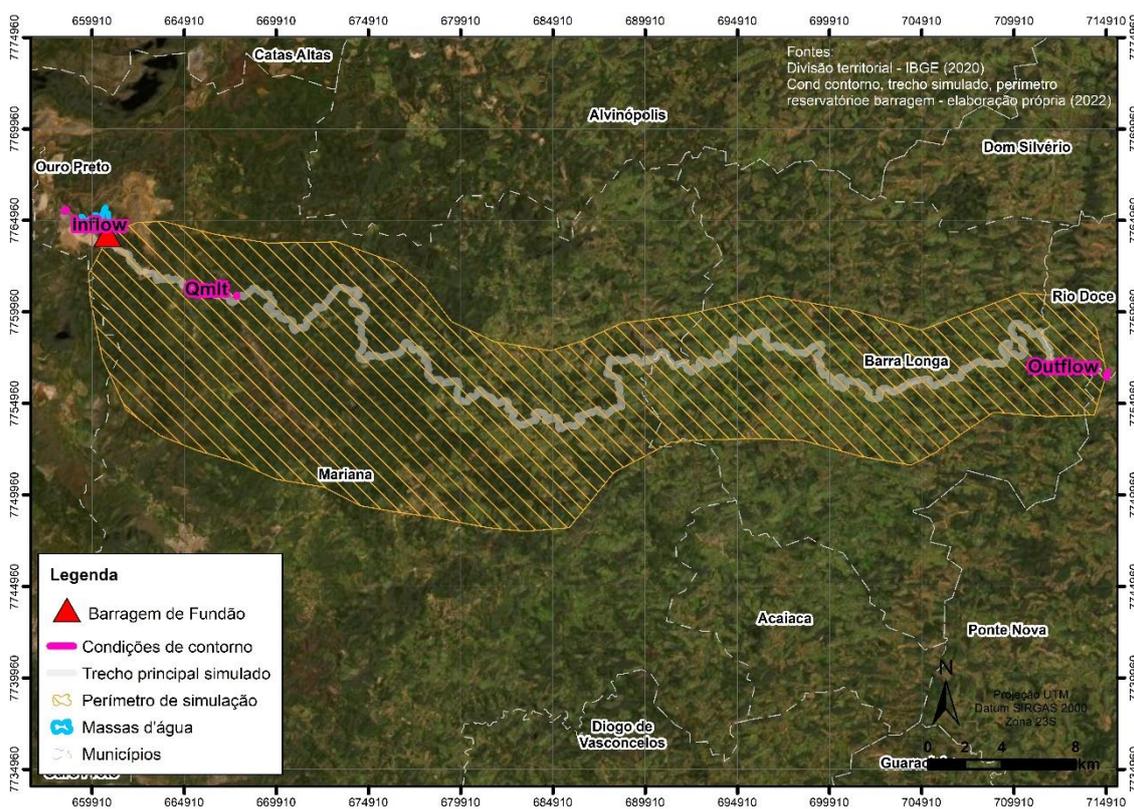
5.2.1 Condições de contorno e extensão da simulação

A Figura 5.8 apresenta o perímetro da simulação, constituído de células de 80 m, obtidas através de um processo iterativo de simulação, a fim de

estabilizar o modelo, bem como o trecho do curso hídrico simulado, que corresponde a 70 km a jusante da barragem. Além disso, são apresentadas as condições de contorno simuladas, conforme:

- *Inflow* – condição de contorno externa de montante, posicionada a montante do reservatório, com vazão de entrada igual à zero;
- Q_{mlp} – condição de contorno interna, onde foram inseridas as vazões médias de longo período do plano;
- *Outflow* – condição de contorno externa de jusante, baseada na declividade do local (0,0004 m/m – dado obtido a partir do MDE com base em geoprocessamento).

Figura 5.8 – Região simulada, extensão da simulação e condições de contorno do modelo



Fonte: elaboração própria, 2022.

5.2.2 Parâmetros de simulação

Para as simulações foi utilizado um aquecimento de 8 dias, correspondente ao necessário para que a condição de contorno interna, correspondente à Q_{mlt} chegasse ao final do trecho simulado. O método de resolução das equações foi o da onda difusa (*Diffusion Wave*) e os intervalos simulados foram:

- i. Intervalo computacional: 5 s;
- ii. Intervalo para obtenção dos resultados: 5 min;
- iii. Intervalo de obtenção dos hidrogramas de resultados: 5 min; e
- iv. Intervalo detalhado de resultados: 5 min.

Destaca-se que o intervalo computacional simulado foi obtido a partir de uma iteração a fim de que os resultados gerassem as menores instabilidades possíveis. O parâmetro theta utilizado foi de 1, tanto para o aquecimento quanto para a simulação. A tolerância superficial de água foi de 0,003 m e a de volume de 0,003 m. O número máximo de iterações foi de 30.

Além disso, a declividade do curso hídrico em todas as condições de contorno com vazões foi de 0,0004 m/m, obtida por processamento do MDE.

5.2.3 Características computacionais

Para as simulações foi utilizado com computador i7 de décima segunda geração (12.700H), 32 GB de memória RAM, 136 GB de memória SSD e 2 TB de memória HD. Neste dispositivo, a simulação do cenário 1, com água, levou cerca de 4 h. Já as simulações com aumento do coeficiente de Manning levaram pouco mais de 4 h, também, enquanto os cenários com inserção das propriedades não-newtonianas levaram cerca de 6,5 h para completar a simulação.

5.3 Seções de interesse para extração de resultados

As seções de interesse são entendidas como os locais onde os resultados obtidos pelas simulações são mais bem explorados. A Tabela 5.7 apresenta as seções, bem como uma breve descrição das suas características e a distância

a partir da barragem simulada. Já a Figura 5.9 apresenta a localização espacial das respectivas seções.

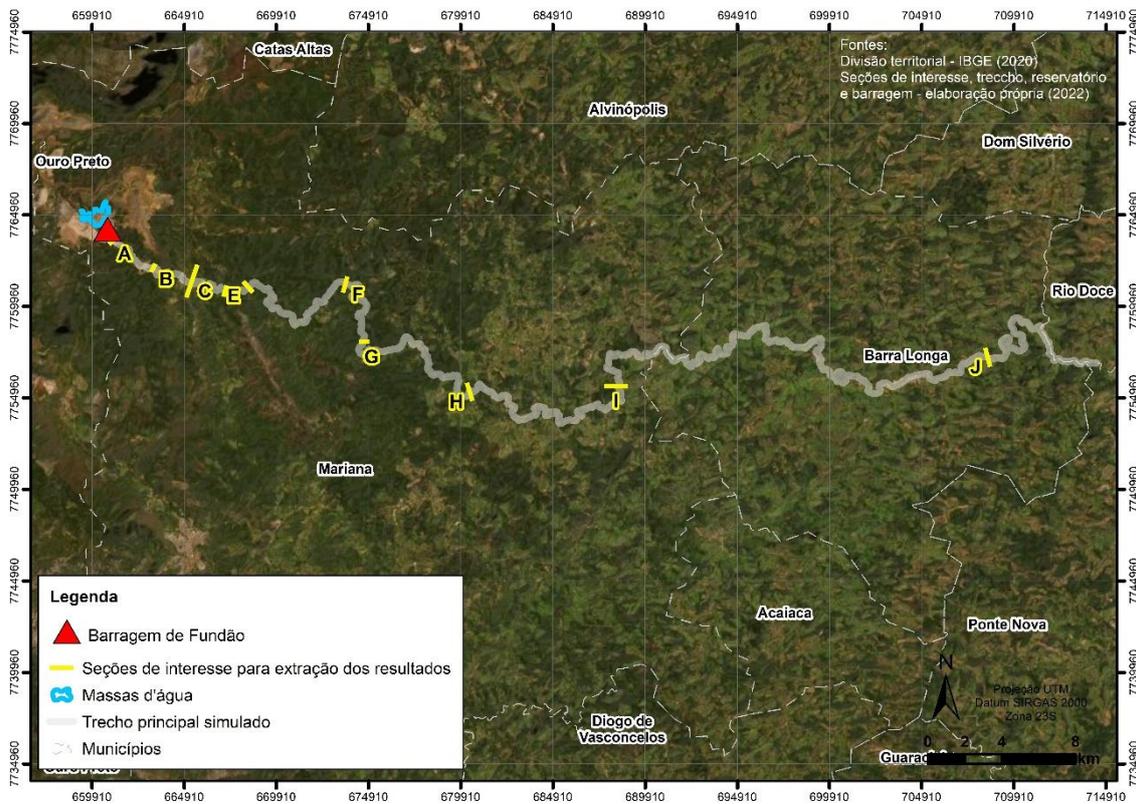
Ressalta-se que as seções logo a jusante do reservatório foram selecionadas em locais que não correspondem ao posicionamento dos reservatórios existentes. Além disso, buscou-se utilizar seções com diferentes perfis transversais – algumas com vales mais encaixados e outras com seções mais abertas. Outro parâmetro que influenciou na seleção foi a inserção das seções em locais que não estivessem sobre corredeiras, com vistas à apresentar a estabilidade dos resultados.

Tabela 5.7 - Características das seções de interesse para extração dos resultados

Seção	Distância a partir da barragem de Fundão (km)
A	1,5
B	6,1
C	10,7
D	20,3
E	25,5
F	35,6
G	50,0
H	60,6

Fonte: elaboração própria, 2022.

Figura 5.9 – Localização das seções de interesse para extração dos resultados



Fonte: elaboração própria, 2022.

5.4 Experimentos realizados - cenários

Uma breve descrição dos cenários simulados é apresentada no início deste capítulo e a Tabela 5.8 apresenta as principais informações, conforme:

Tabela 5.8 – Características dos cenários de experimentos realizados

Cenário	Descrição	Resumo das metodologias	Manning (s.m. ^{-1/3})		Reologia			
			Canal	Planície	Cv (%)	Ty (Pa)	μ (Pa.s)	r (1/s)
C1	Cenário considerando a simulação de água, realizado para comparação dos resultados.	- Manning determinado para o local; - Reologia de fluido newtoniano;	0,03	0,06	-	-	-	-
C2	Simulação apenas com aumento do coeficiente de Manning para representação do fluido hiperconcentrado, conforme metodologia de VENTURA (2011).	- Manning para fluido “hiperconcentrado”; - Reologia de fluido newtoniano;	0,06	0,12	-	-	-	-
C3	Simulação apenas com aumento do coeficiente de Manning de forma mais extrema para representação do fluido hiperconcentrado. O coeficiente de Manning foi aumentado 6x.	- Manning aumentado; - Reologia de fluido newtoniano;	0,18	0,36	-	-	-	-
C4	Simulação para fluido não-newtoniano (plástico de Bingham), considerando como dado prévio a tensão de cisalhamento, a concentração volumétrica e a viscosidade	- Manning determinado para o local; - Reologia para fluido hiperconcentrado - Simulação para plástico de Bingham;	0,03	0,06	23	20,94	0,16	-



Cenário	Descrição	Resumo das metodologias	Manning (s.m. ^{-1/3})		Reologia			
			Canal	Planície	Cv (%)	Ty (Pa)	μ (Pa.s)	r (1/s)
	dinâmica. O coeficiente de Manning considerado foi o estabelecido para o local;							
C5	Simulação para fluido não-newtoniano (plástico de Bingham), considerando como dado prévio apenas a concentração volumétrica do fluido e o Manning estabelecido para o local;	<ul style="list-style-type: none">- Manning determinado para o local;- Reologia para fluido hiperconcentrado considerando apenas o percentual de sólidos dissolvidos para a obtenção das demais características conforme COELHO (1982);- Simulação para plástico de Bingham.	0,03	0,06	23	58,7	-	0,9

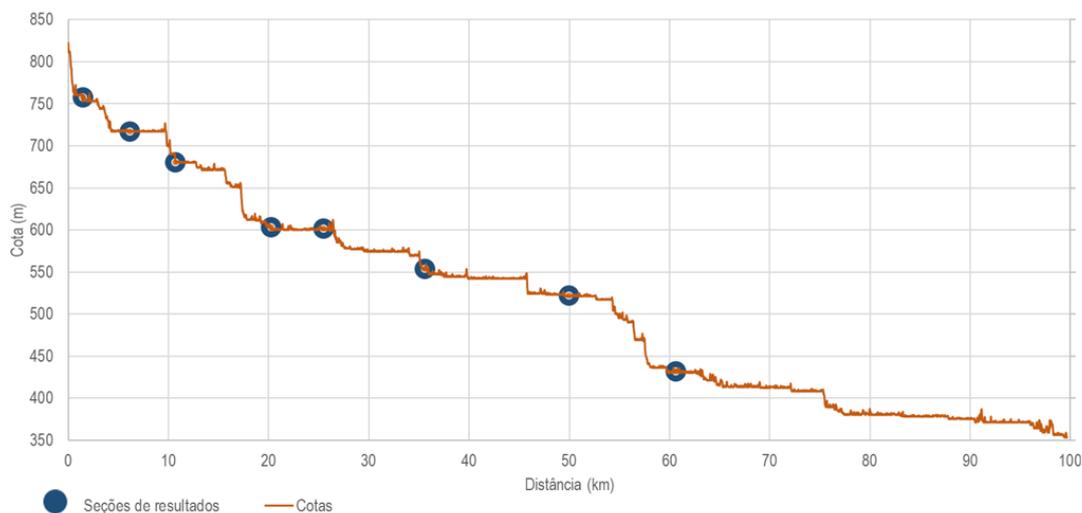
Fonte: elaboração própria, 2022.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é dividido em três seções, conforme: manchas de inundação, velocidades máximas do escoamento e tempos de chegada e profundidades máximas. Em cada uma das seções são analisados e comparados os resultados para os cinco cenários simulados.

Para a melhor compreensão dos resultados, faz-se necessário avaliar as diferenças de cotas ao longo do trecho simulado, conforme disposto na Figura 6.1. O trecho simulado trata-se da região de cabeceira da bacia e, portanto, apresenta elevadas altitudes e desníveis consideráveis, variando de 822 m até 353 m.

Figura 6.1 -Elevação do terreno ao longo do trecho principal simulado e locação relativa das seções para extração dos resultados



Fonte: elaboração própria, 2022.

6.1 Manchas de inundação

A Figura 6.2 apresenta as manchas de inundação para os cenários simulados. Por ser uma região grande, optou-se pela inserção de articulações – mapas com aproximação das regiões destacadas na Figura 6.2. Assim, a Figura 6.3 apresenta a aproximação para a Região 01, a Figura 6.4 para a Região 02 e a Figura 6.5 e Figura 6.6 para as Regiões 03 e 04, respectivamente.

É possível observar, na Figura 6.3, que a região logo a jusante do reservatório apresenta diferenças significativas nas manchas de inundação, e o Cenário 3, correspondente ao número de Manning aumentado, o maior dentre eles. Isto ocorre porque o aumento do atrito da água com a superfície acaba gerando uma redução da velocidade de escoamento e, conseqüentemente, um espalhamento superficial maior. Além disso, em casos de rugosidades altas, há tendência de acumulação de maiores lâminas d'água, gerando maiores profundidades, também pela redução da velocidade. Esta figura também permite observar que há praticamente uma sobreposição das duas manchas de cenários não-newtonianos entre si (C4 e C5) e que, nesta região, o Cenário 2, com Manning aumentado segundo a metodologia de Ventura (2011), está o mais próximo ao resultado obtido com água (C1).

A partir da seção C, onde há uma região de planícies geradas pelos reservatórios existentes no local e, portanto, geração de grande dispersão da mancha, observa-se que as áreas passam a ficar mais próximas entre si, apresentando poucas diferenças concentradas em suas extremidades. Observa-se também, na Figura 6.3 e na Figura 6.4, que o Cenário 2 passa a ser maior nas extremidades e, a partir da seção F passa a coincidir com a mancha do cenário 3.

Ao final da extensão de simulação as manchas praticamente coincidem entre si.

A Tabela 6.1 apresenta as áreas de manchas de inundação para os cenários avaliados. Como esperado, é possível notar que nos cenários com alteração dos coeficientes de Manning as manchas são maiores que as demais, justamente pelo efeito de atrito exercido pelo solo sobre o escoamento. Entretanto, comparando-se os cenários com inserção de propriedades não-newtonianas (C4 e C5) com a água não são observadas diferenças consideráveis nas áreas inundadas.

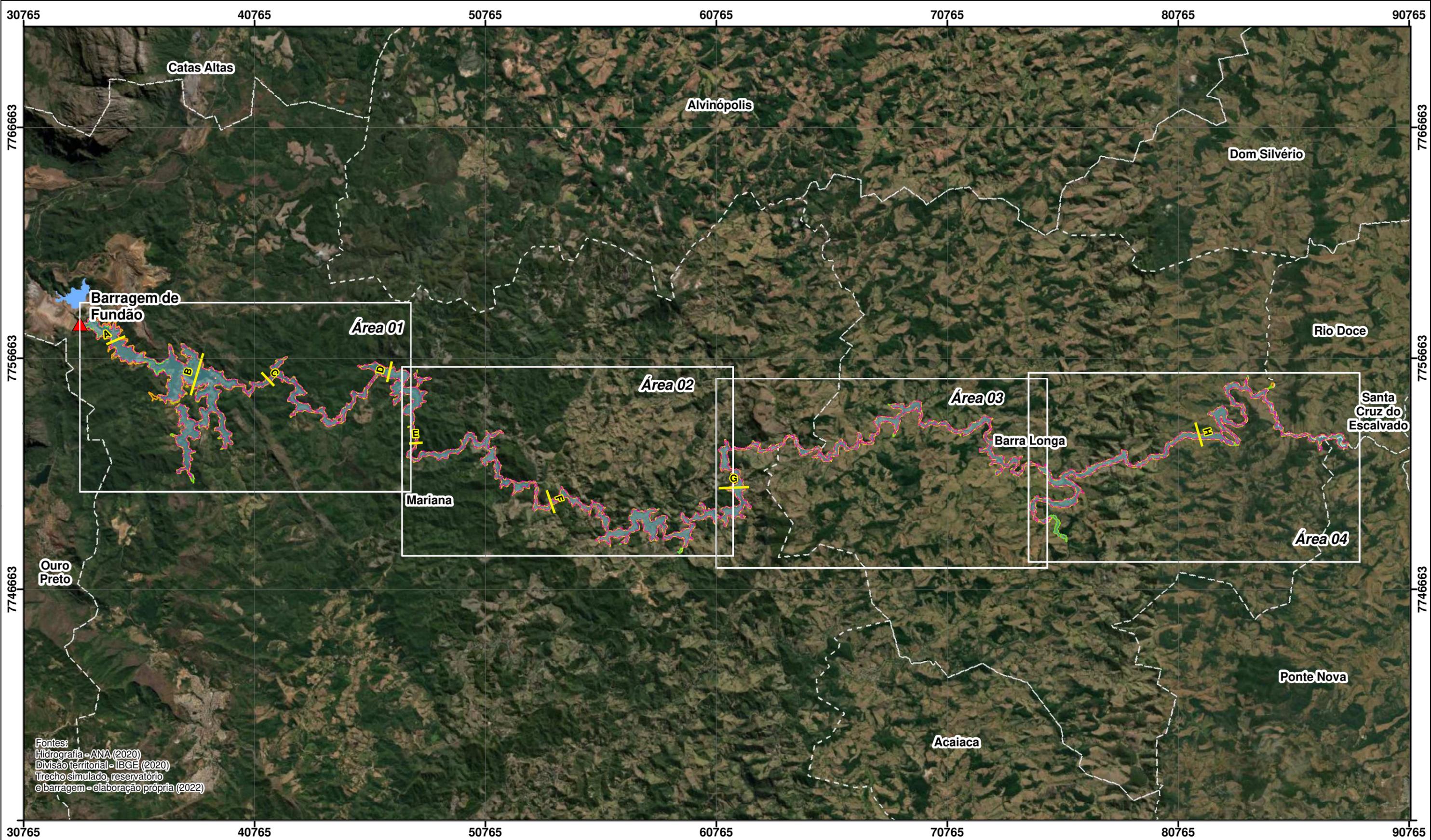
Tabela 6.1 – Áreas das manchas de inundação para os cinco cenários simulados

Cenário	Descrição	Área (km ²)
C1	Manning local + água	26,9



Cenário	Descrição	Área (km²)
C2	Manning Ventura (2011) + água	27,6
C3	Manning aumentado + água	28,5
C4	Manning local + tensão e viscosidade	26,9
C5	Manning local + conc. volumétrica	26,6

Fonte: elaboração própria, 2022.



Fontes:
 Hidrografia - ANA (2020)
 Divisão territorial - IBGE (2020)
 Trecho simulado, reservatório
 e barragem - elaboração própria (2022)

Legenda

	Seções de interesse para extração dos resultados		C1 - Manning local + água
	Barragem de Fundão		C2 - Manning Ventura (2011) + água
	Reservatório de Fundão		C3 - Manning aumentado + água
	Municípios		C4 - Manning local + tensão e viscosidade
			C5 - Manning local + conc. volumétrica

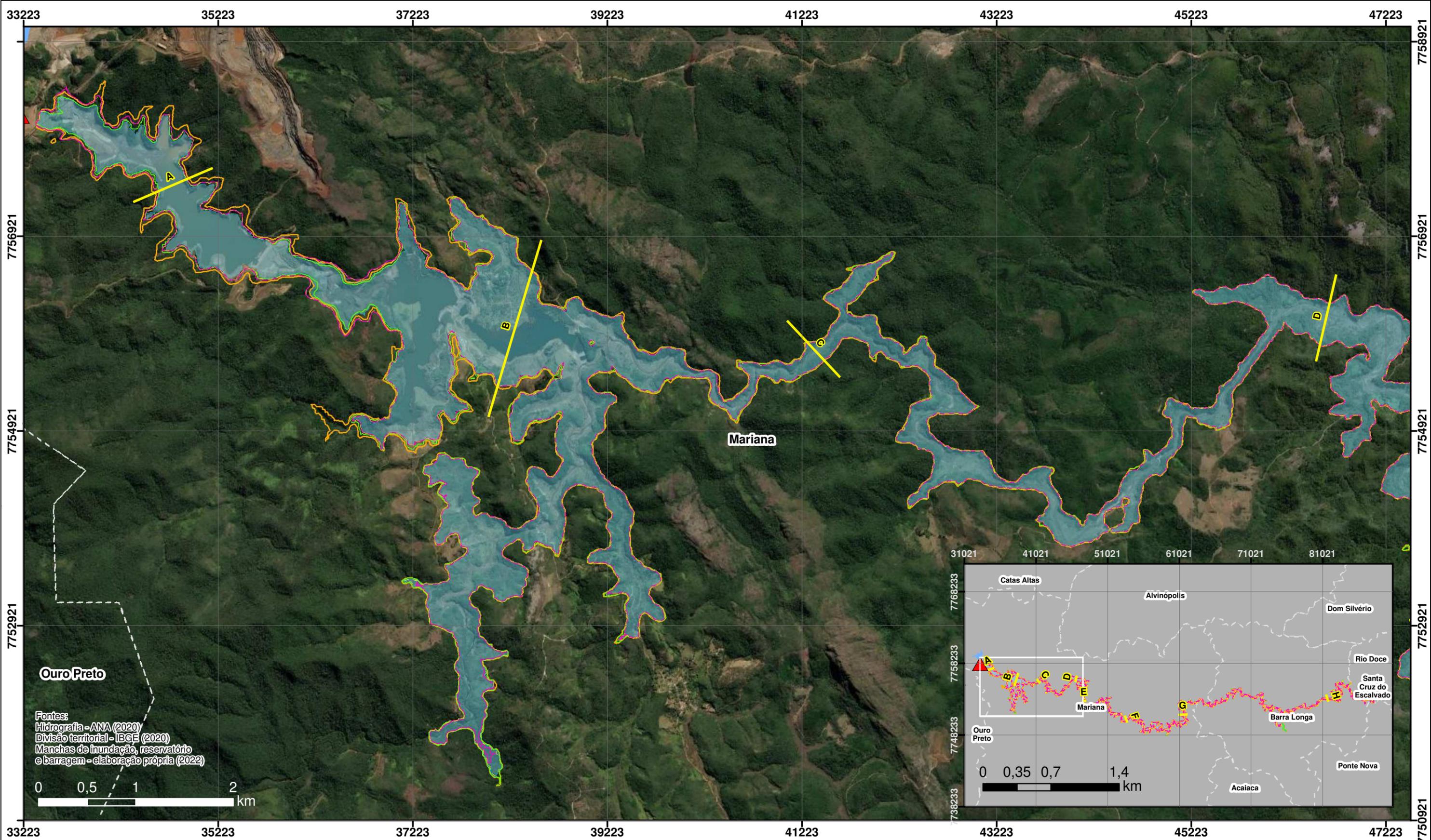
N

 Projeção UTM
 Datum SIRGAS 2000
 Zona 23S

0 1,5 3 6

 km

Figura 6.2 - Resultados das manchas de inundação para os cenários simulados e áreas de articulações para aproximação



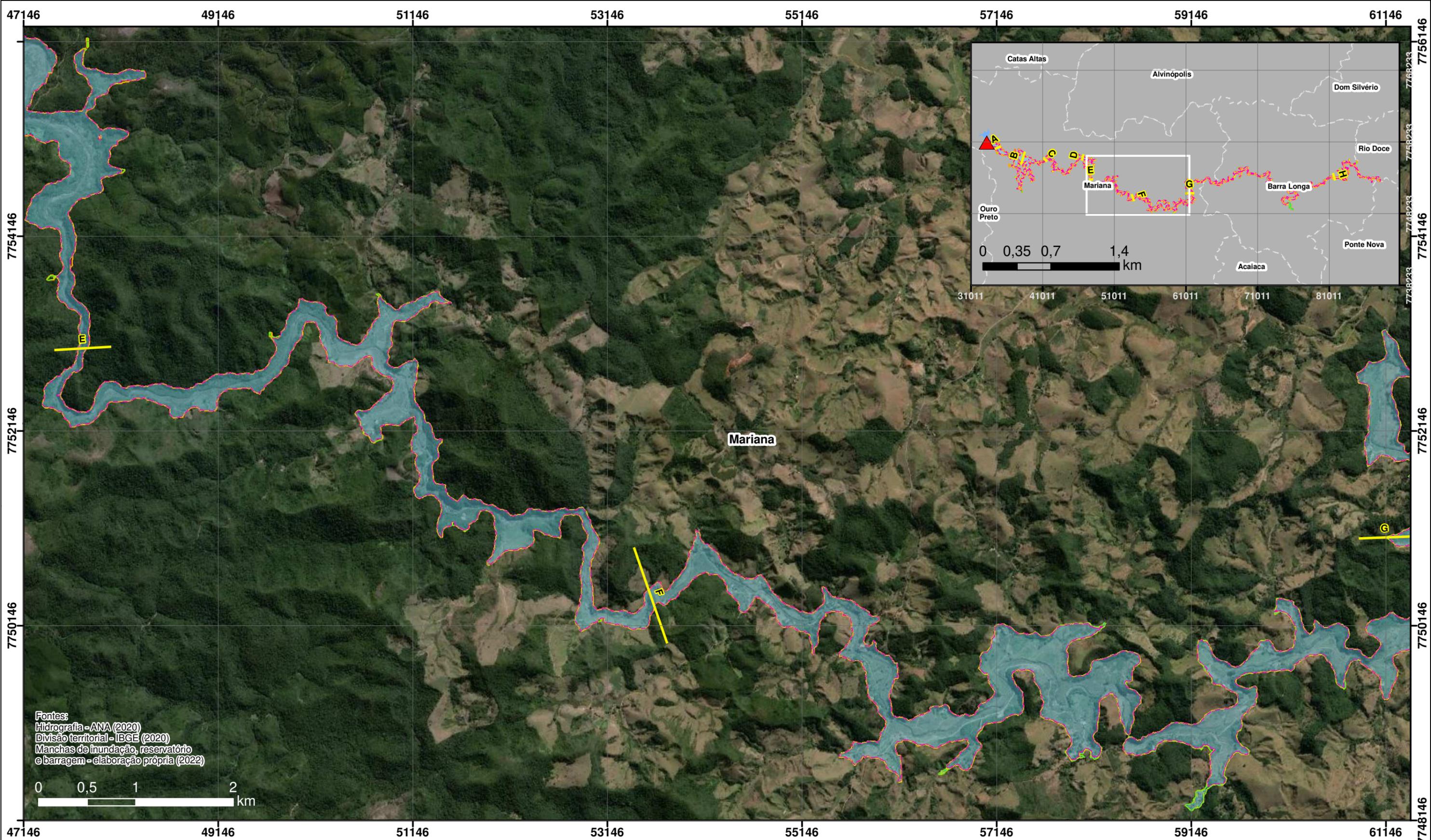
Fontes:
 Hidrografia - ANA (2020)
 Divisão territorial - IBGE (2020)
 Manchas de inundação, reservatório
 e barragem - elaboração própria (2022)

- Legenda**
- Seções de interesse para extração dos resultados
 - Barragem de Fundão
 - Reservatório de Fundão
 - Municípios
 - C1 - Manning local + água
 - C2 - Manning Ventura (2011) + água
 - C3 - Manning aumentado + água
 - C4 - Manning local + tensão e viscosidade
 - C5 - Manning local + conc. volumétrica

N
 Projeção UTM
 Datum SIRGAS 2000
 Zona 23S

Figura 6.3 - Resultados das manchas de inundação para os cenários simulados - aproximação da região 01





Fontes:
 Hidrografia - ANA (2020)
 Divisão territorial - IBGE (2020)
 Manchas de inundação, reservatório
 e barragem - elaboração própria (2022)

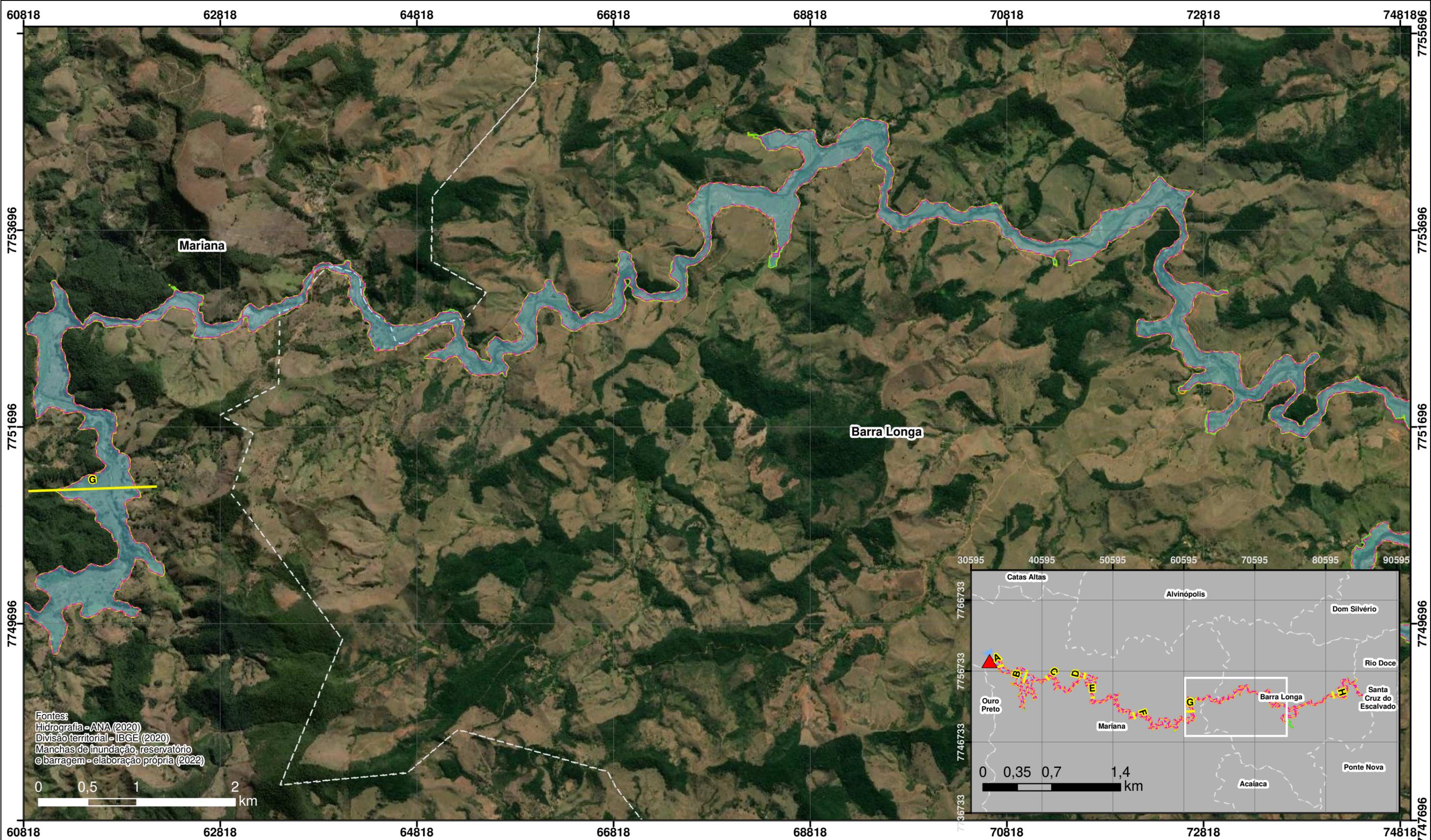


- Legenda**
- Seções de interesse para extração dos resultados
 - Barragem de Fundão
 - Reservatório de Fundão
 - Municípios
 - C1 - Manning local + água
 - C2 - Manning Ventura (2011) + água
 - C3 - Manning aumentado + água
 - C4 - Manning local + tensão e viscosidade
 - C5 - Manning local + conc. volumétrica

N
 Projeção UTM
 Datum SIRGAS 2000
 Zona 23S

Figura 6.4 - Resultados das manchas de inundação para os cenários simulados - aproximação da região 02





Fontes:
 Hidrografia - ANA (2020)
 Divisão territorial - IBGE (2020)
 Manchas de inundação, reservatório e barragem - elaboração própria (2022)

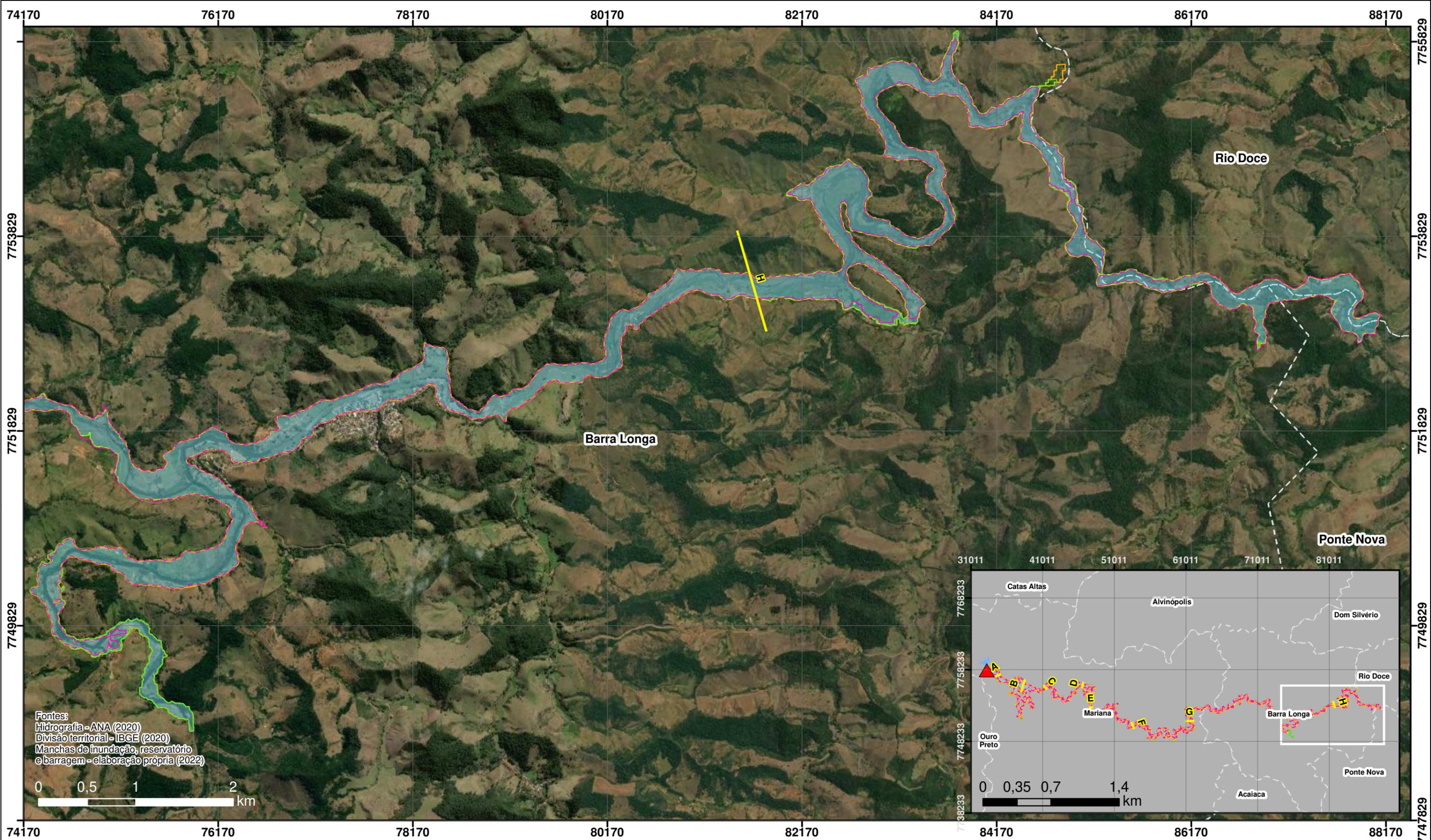
Legenda

- Seções de interesse para extração dos resultados
- Barragem de Fundão
- Reservatório de Fundão
- Municípios
- C1 - Manning local + água
- C2 - Manning Ventura (2011) + água
- C3 - Manning aumentado + água
- C4 - Manning local + tensão e viscosidade
- C5 - Manning local + conc. volumétrica

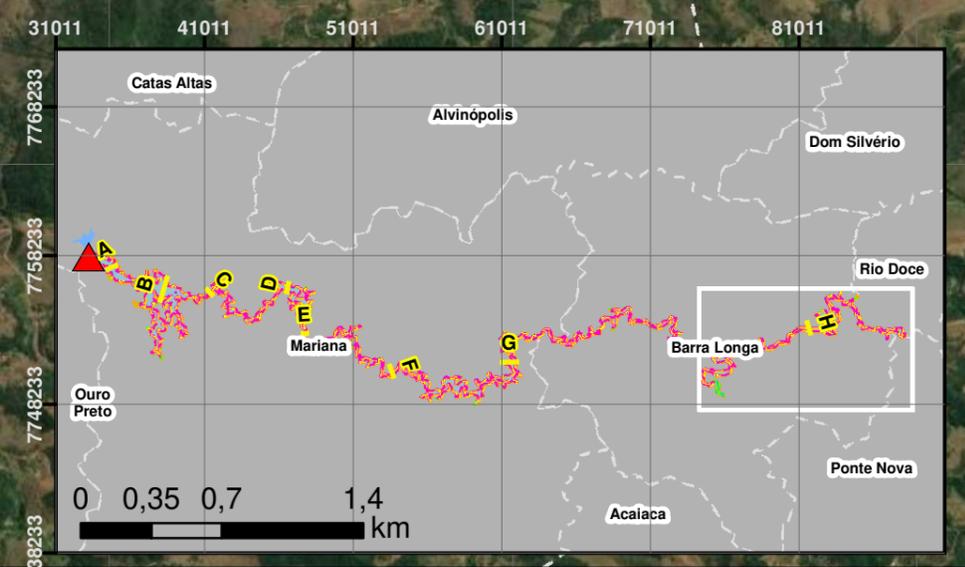
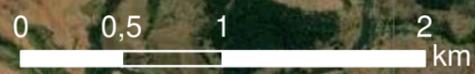
Projeção UTM
 Datum SIRGAS 2000
 Zona 23S

Figura 6.5 - Resultados das manchas de inundação para os cenários simulados - aproximação da região 03





Fontes:
 Hidrografia - ANA (2020)
 Divisão territorial - IBGE (2020)
 Manchas de inundação, reservatório
 e barragem - elaboração própria (2022)



Legenda

- Seções de interesse para extração dos resultados
- Barragem de Fundão
- Reservatório de Fundão
- Municípios
- C1 - Manning local + água
- C2 - Manning Ventura (2011) + água
- C3 - Manning aumentado + água
- C4 - Manning local + tensão e viscosidade
- C5 - Manning local + conc. volumétrica

Projeção UTM
 Datum SIRGAS 2000
 Zona 23S

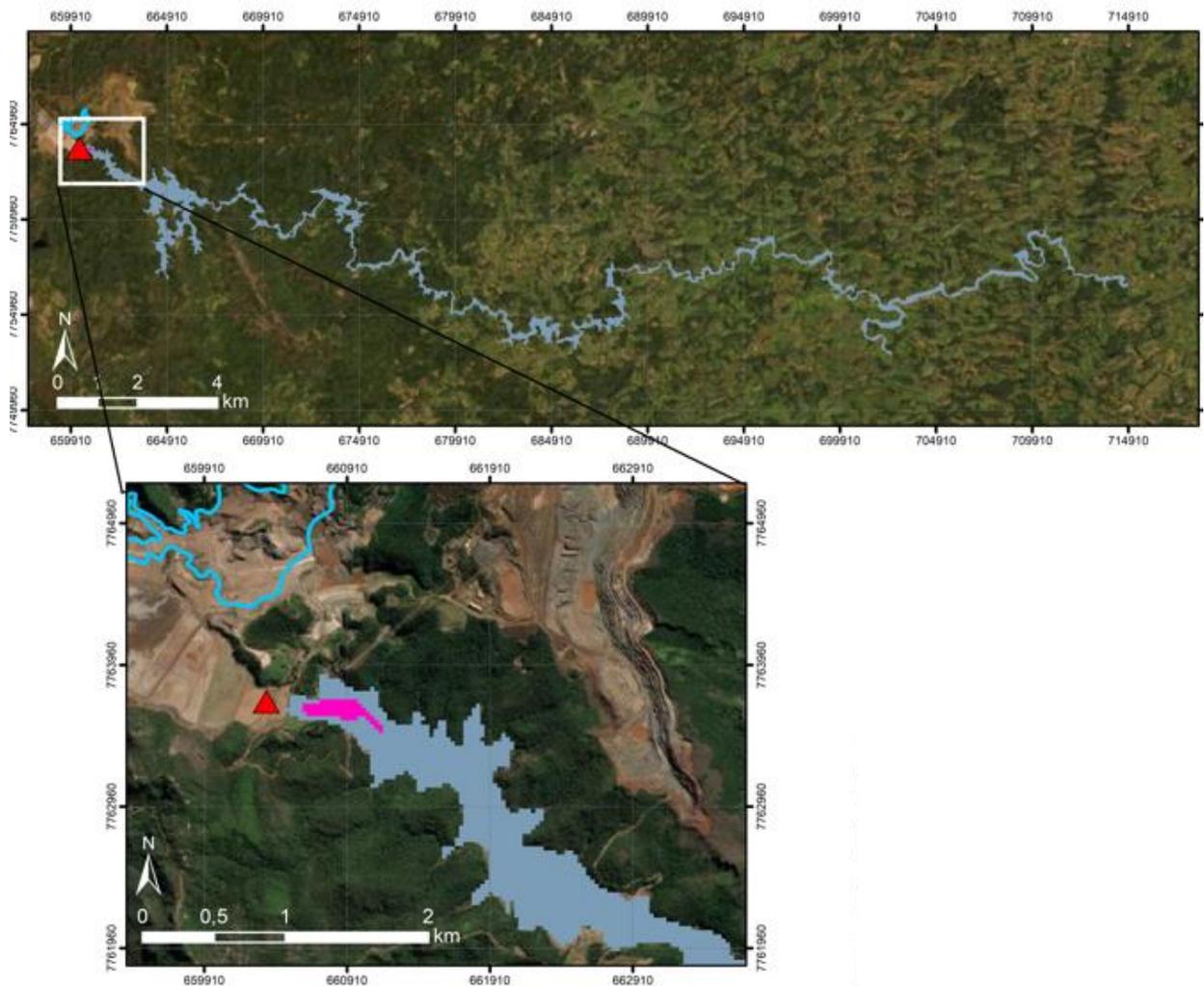
Figura 6.6 - Resultados das manchas de inundação para os cenários simulados - aproximação da região 04



6.2 Velocidades do escoamento e tempos de chegada

A Figura 6.10 apresenta as velocidades máximas a jusante do barramento simulado, até a seção G (distância 50 km) para cada um dos cenários simulados. Ressalta-se que estas velocidades foram truncadas em até 20 m/s, porque houve instabilidade no modelo logo a jusante o reservatório, na região apresentada na Figura 6.7, gerando velocidades da ordem de 170 m/s na região destacada, para todos os cenários. As fontes de instabilidades podem ser diversas, sendo geradas provavelmente devido ao rompimento imediato do reservatório, sem aumento gradativo das vazões (como pode ser observado na Figura 6.8 que apresenta o hidrograma de rompimento para a seção A), que insere um pulso de vazões muito elevado no modelo em um curto período e às grandes diferenças de cotas entre o reservatório e a região, que varia cerca de 100 m em menos de 1,5 km. Outra possível fonte de instabilidade é o MDE utilizado, cuja resolução é de 30 m. O valor de 20 m/s foi selecionado para o truncamento porque, ao excluir-se as células destacadas na figura, esta era a velocidade máxima atingida pela mancha simulada, para todos os cenários.

Figura 6.7 - Região com instabilidades na simulação de velocidades



Legenda

 Barragem de Fundão

 Células onde ocorreu instabilidade

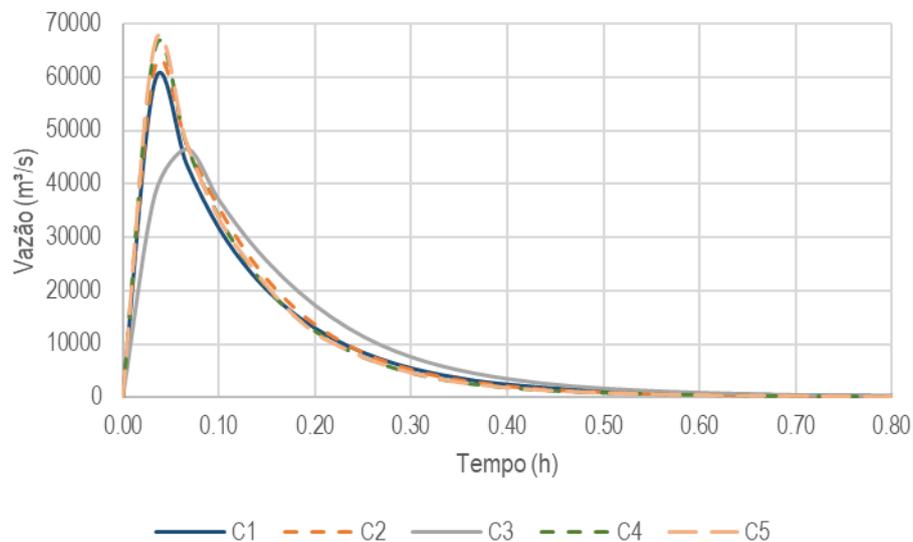
Velocidades

C1 (m/s)
 195,2
0,02

 Reservatório de Fundão

Fonte: elaboração própria, 2022.

Figura 6.8 - Hidrograma de ruptura para a seção A



Fonte: elaboração própria, 2022.

Uma avaliação da Figura 6.10 permite visualizar que o cenário com menores velocidades é o Cenário 3, que corresponde ao Manning aumentado. Observa-se também que as velocidades máximas obtidas para as simulações com fluidos não-newtonianos (C4 e C5) são as maiores, especialmente no trecho logo a jusante do reservatório, apesar de muito próximas às velocidades máximas obtidas na simulação com água e Manning local (C1). Este padrão de semelhança entre os cenários C1 (água), C4 e C5 prossegue durante praticamente toda a extensão da simulação, com os cenários não-newtonianos atingindo velocidades ligeiramente mais altas na porção inicial da região simulada – até a seção C.

Após esta seção, as velocidades dos cenários C4 e C5 se tornam, em geral, menores do que as da água. Com os resultados aqui obtidos e a extensão das análises realizada, não foi possível determinar as causas para esta inversão de resultados, que podem estar sendo influenciados tanto pela topografia quanto pelas instabilidades locais do modelo e outros fatores, como as características reológicas inseridas nos cenários 4 e 5.

A Tabela 6.2 apresenta das velocidades máximas atingias nas seções de resultados e permite a avaliação numérica dos resultados visuais da Figura 6.10.

Tabela 6.2 – Velocidades máximas nas seções para os cinco cenários simulados

Seção	Velocidade máxima (m/s) para cada cenário				
	C1	C2	C3	C4	C5
A	23,2	18,3	8,9	24,9	24,8
B	9,3	5,6	2,6	10,9	10,9
C	6,0	3,8	1,5	6,2	6,0
D	3,9	2,3	0,8	3,7	3,5
E	16,0	8,4	2,9	16,2	15,7
F	6,8	3,5	1,2	7,1	6,7
G	1,4	0,7	0,2	1,3	1,2
H	2,6	1,3	0,4	2,0	1,0

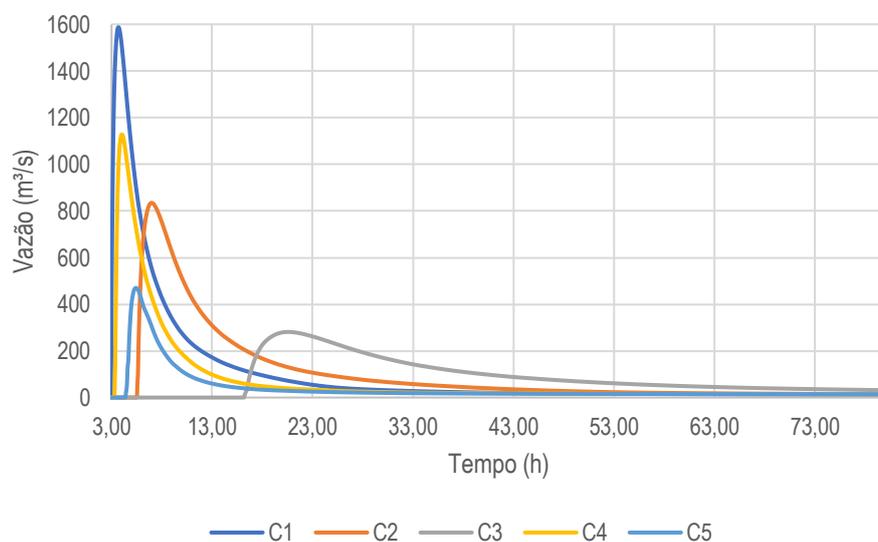
Fonte: elaboração própria, 2022.

Relacionado com as velocidades máximas, está o tempo de chegada do escoamento nas seções. A Figura 6.11 apresenta os tempos de chegadas e as velocidades para as seções avaliadas, bem como a Tabela 6.3 apresenta os respectivos valores de tempos de chegada. Como já é possível inferir pela avaliação das velocidades, o tempo total de chegada do Cenário 1, correspondente à água, é o mais rápido dentre os cenários avaliados. Destaca-se que o Cenário 3, com elevação do Manning, foi extremamente superior aos demais – justamente pela dispersão de energia deste cenário.

A Figura 6.9 apresenta o hidrograma obtido na seção H e permite avaliar, especialmente em relação ao hidrograma da Figura 6.9, referente à seção A, o impacto das diferentes dispersões de energia e quantidade de fluido ao longo da simulação: o Cenário 1 (água) praticamente não dispersou volume e foi o mais rápido; o Cenário 2 (coeficiente de Manning segundo Ventura 2011) dispersou volume, gerando profundidades mais elevadas a montante (isto será discutido no item 6.3) e, por isso, escoou mais devagar, chegando na seção H depois de 7h do rompimento; o Cenário 3 (coeficiente de Manning aumentado) atingiu a seção H apenas depois de mais de 20 h do rompimento, pelos mesmos motivos do cenário 2; o Cenário 4, cujas tensões de cisalhamento simuladas são

menores do que o Cenário 5, também conservou boa quantidade de volume, levando 4 h para percorrer a distância simulada, enquanto o cenário 5 levou 5h e 25 min, perdendo cerca de metade do seu volume ao gerar a mancha. Comparativamente, os cenários que consideram fluidos não-newtonianos (C4 e C5) e mantém o Manning do local acabam por dissipar menos volume, mantendo um comportamento mais próximo ao da água, e escoando mais rápido do que os cenários com aumento do Manning (C2 e C3).

Figura 6.9 - Hidrograma propagado na seção H



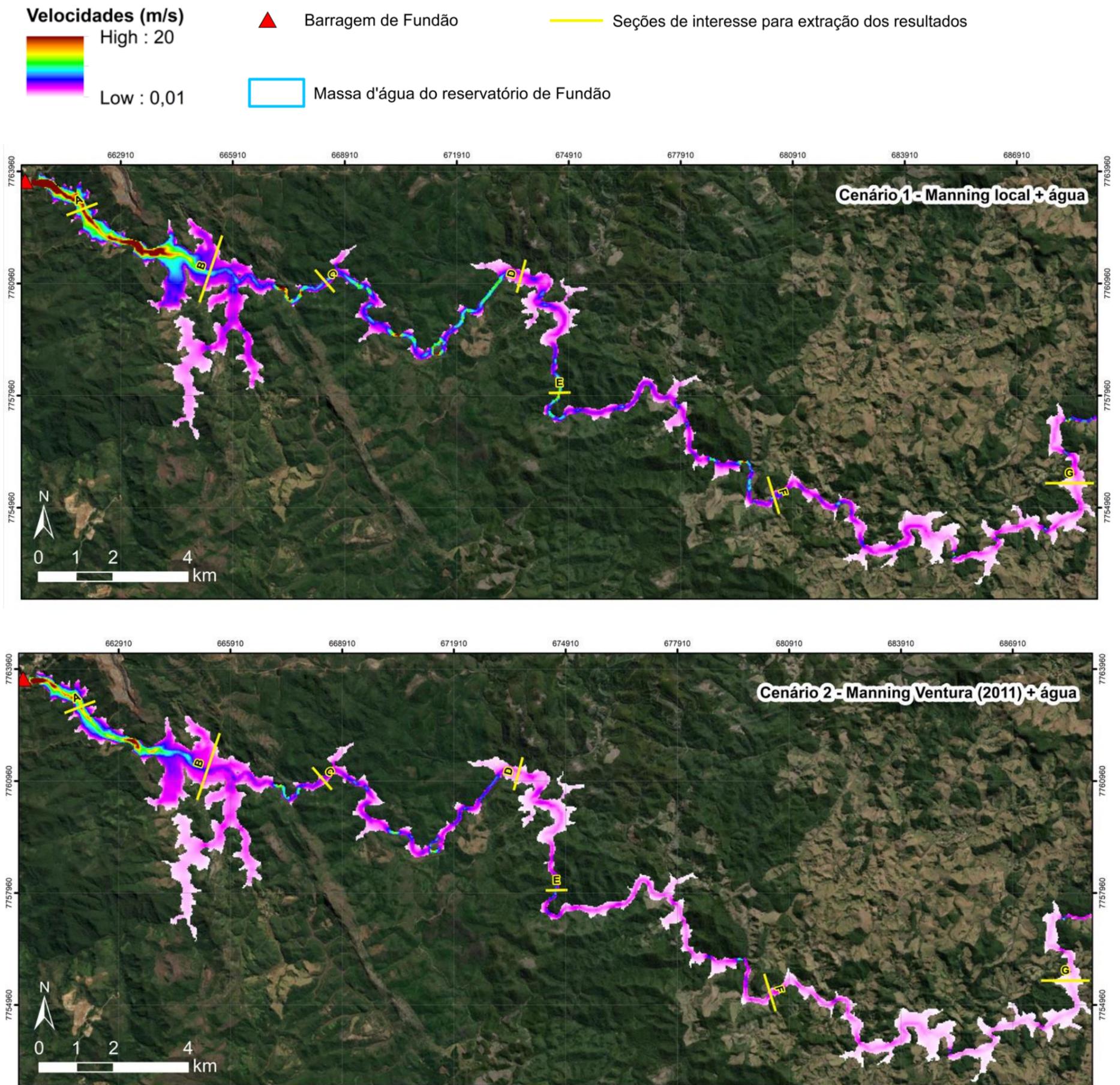
Fonte: elaboração própria, 2022.

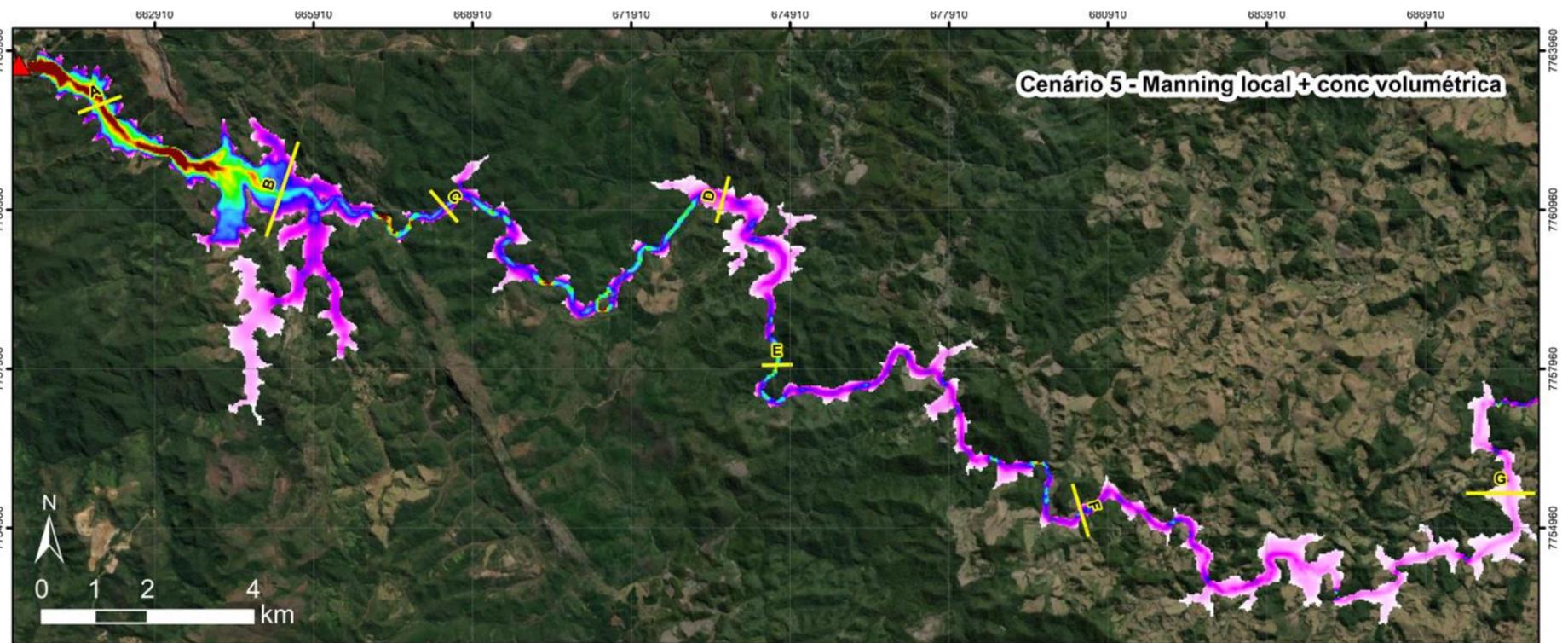
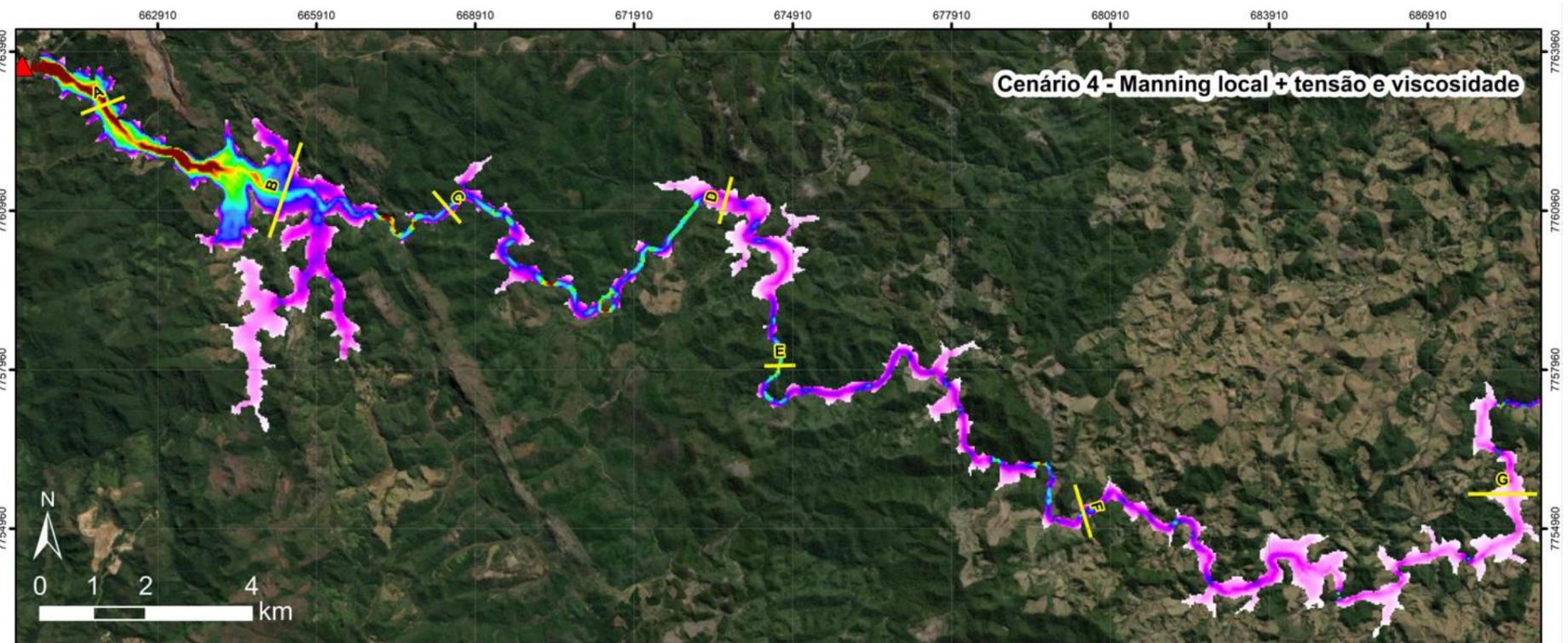
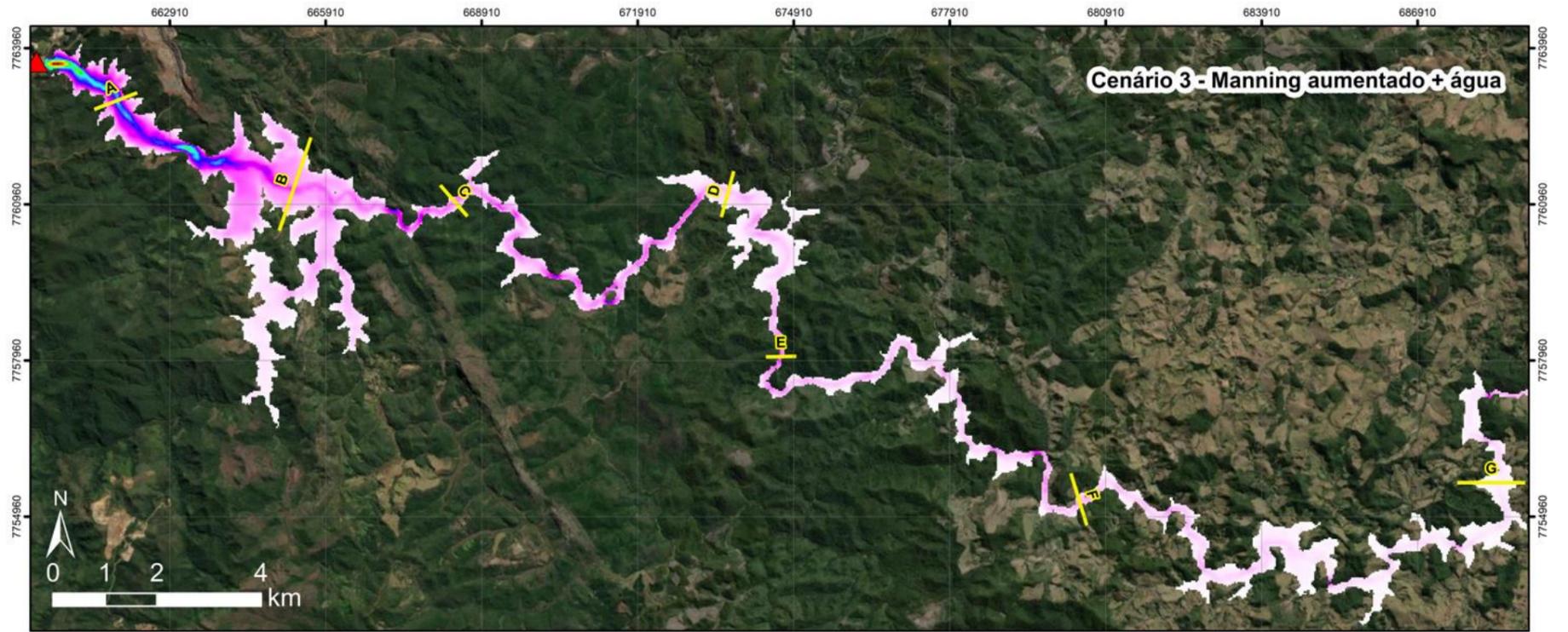
Tabela 6.3 – Tempos de chegada nas seções para os cinco cenários simulados

Seção	Tempo de chegada para cada cenário				
	C1	C2	C3	C4	C5
A	2 min	4 min	8 min	4 min	4 min
B	6 min	10 min	18 min	6 min	4 min
C	12 min	16 min	34 min	12 min	12 min
D	22 min	34 min	1h 25min	22 min	22 min
E	38 min	1 h 2 min	2 h 40 min	36 min	36 min
F	58 min	1 h 40 min	4 h 30 min	56 min	56 min
G	1h 58 min	3 h 40 min	10 h 36 min	2 h 36 min	2 h 18 min
H	3 h 42 min	7 h	20 h 36 min	4 h 2 min	5 h 25 min

Fonte: elaboração própria, 2022.

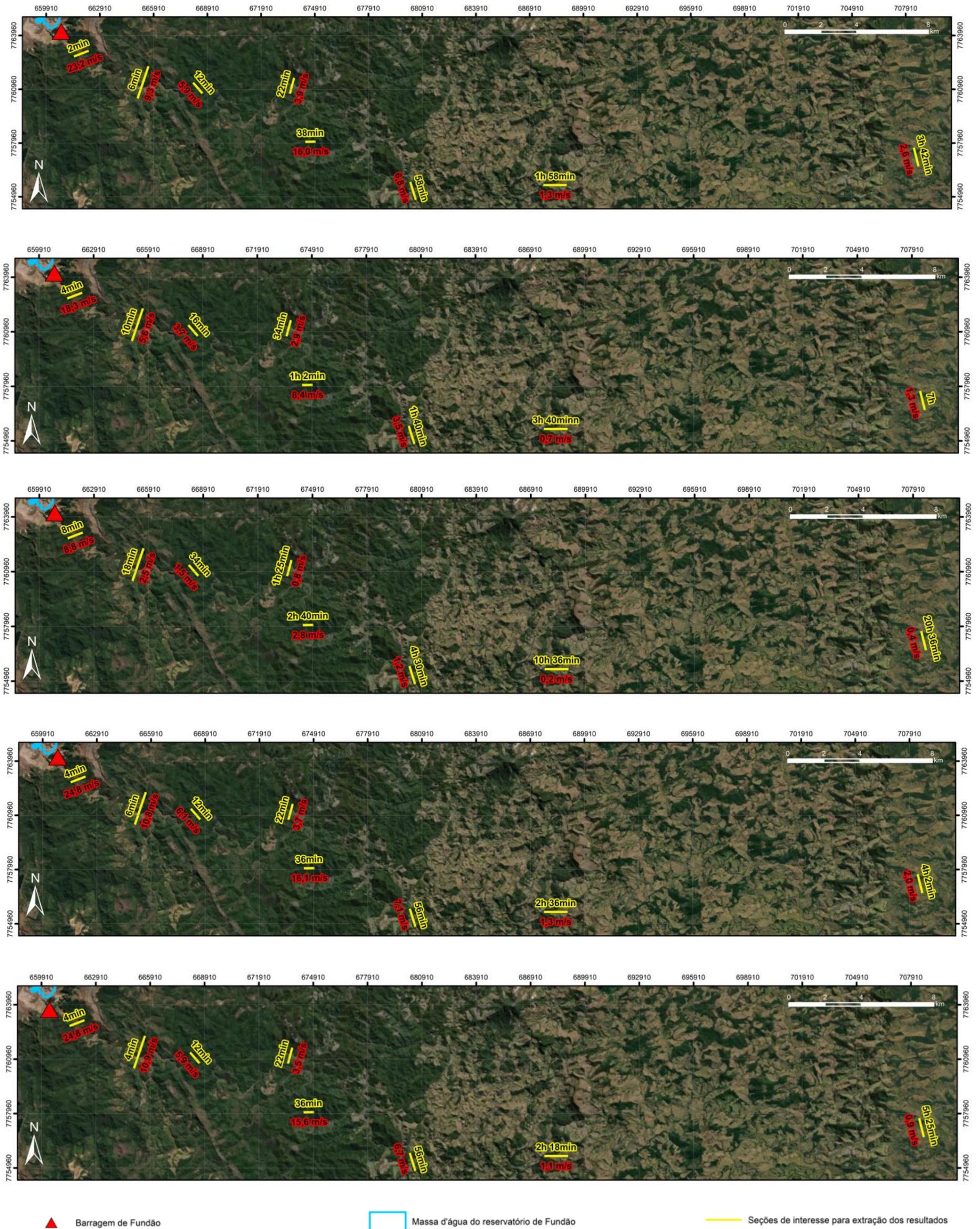
Figura 6.10 – Velocidades máximas para os cenários avaliados – valores truncados em um máximo de 20 m/s para possibilitar a avaliação das diferenças entre os cenários





Fonte: elaboração própria, 2022.

Figura 6.11 – Tempos de chegada (amarelo) e velocidades máximas (vermelho) nas seções de extração de resultados



▲ Barragem de Fundão

□ Massa d'água do reservatório de Fundão

— Seções de interesse para extração dos resultados

Fonte: elaboração própria, 2022.

6.3 Profundidades máximas

A Figura 6.12 apresenta as profundidades máximas simuladas, enquanto a Tabela 6.4 apresenta seus respectivos valores nas seções de extração de resultados. Destaca-se que esta figura também está com sua escala truncada, até 35 m. Entretanto, neste caso, isto foi realizado apenas para permitir a comparação entre os cenários, visto que eles possuem intervalos diferentes. Assim, as profundidades variam conforme:

- Cenário 1 – de 0,002 até 38,6 m;
- Cenário 2 – de 0,001 até 49,1 m;
- Cenário 3 – de 0,001 até 50,3 m;
- Cenário 4 – de 0,001 até 50,7 m;
- Cenário 5 – de 0,001 até 54,1 m.

A comparação entre as profundidades listadas acima permite observar que as profundidades máximas para os cenários não-newtonianos são maiores do que as demais, devido à acumulação do volume destes fluidos ao receber o esforço inicial até que vençam a tensão de cisalhamento - entretanto, ao avaliar-se a Tabela 6.4, que apresenta resultados mais a jusante do barramento e, portanto, mais estabilizados numericamente, as profundidades destes cenários passam a ser menores do que nos cenários com aumento do Manning.

Já a diferença entre as profundidades dos cenários com aumento de Manning (C2 e C3) e o cenário 1 (água) são esperadas e ocasionadas pelos maiores efeitos de dispersão de energia e consequente redução das velocidades, gerando uma maior acumulação da lâmina d'água devido à sua dificuldade de escoar.

Tabela 6.4 – Profundidades máximas nas seções para os cinco cenários simulados

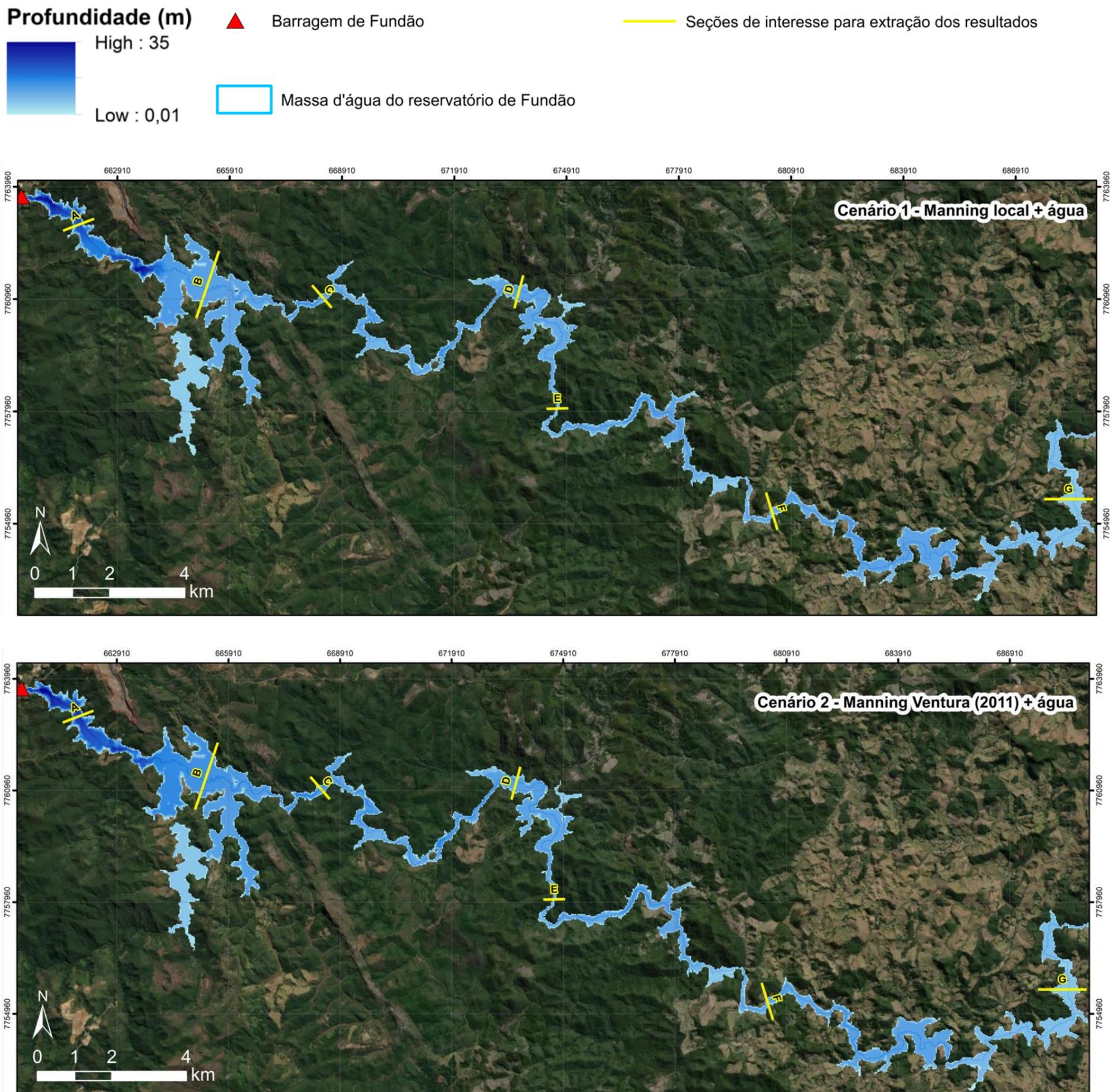
Seção	Profundidades máximas (m)				
	C1	C2	C3	C4	C5
A	28,1	31,0	41,7	32,5	33,3
B	14,9	17,4	19,7	15,6	15,8
C	14,0	16,1	17,4	14,6	14,6

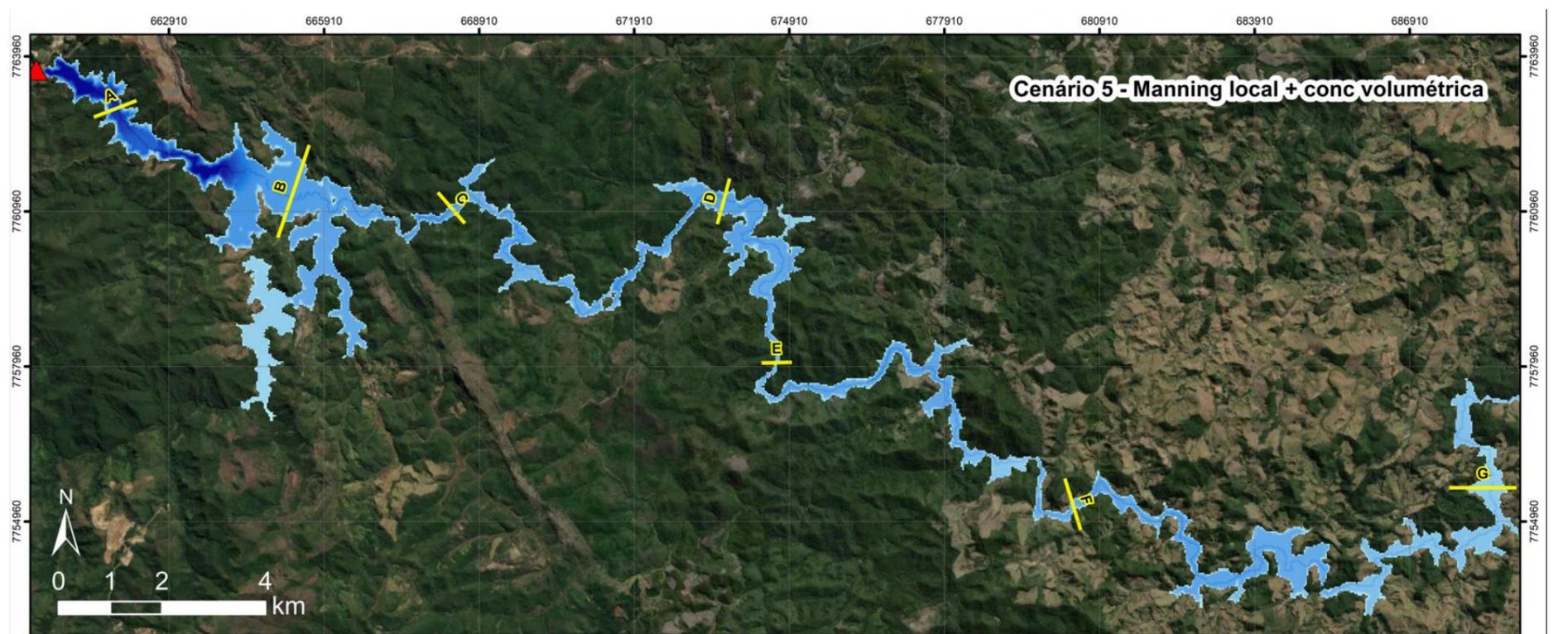
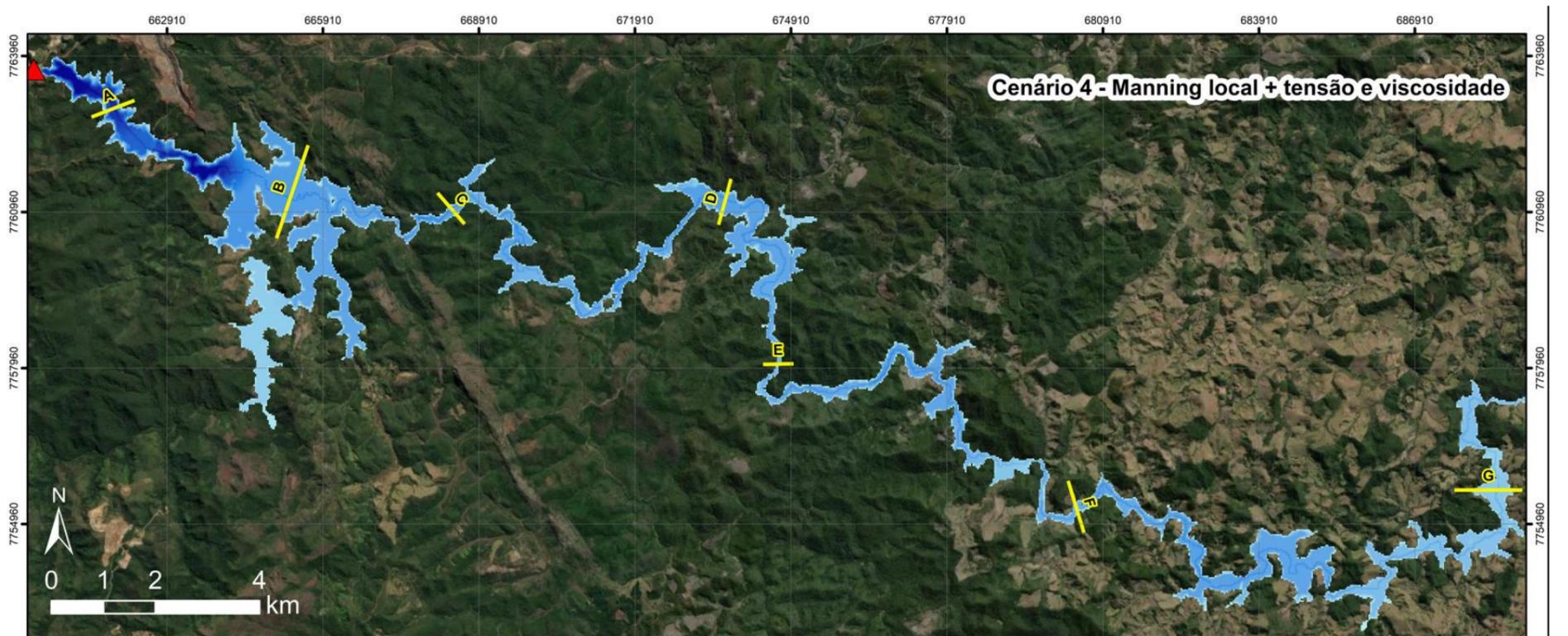
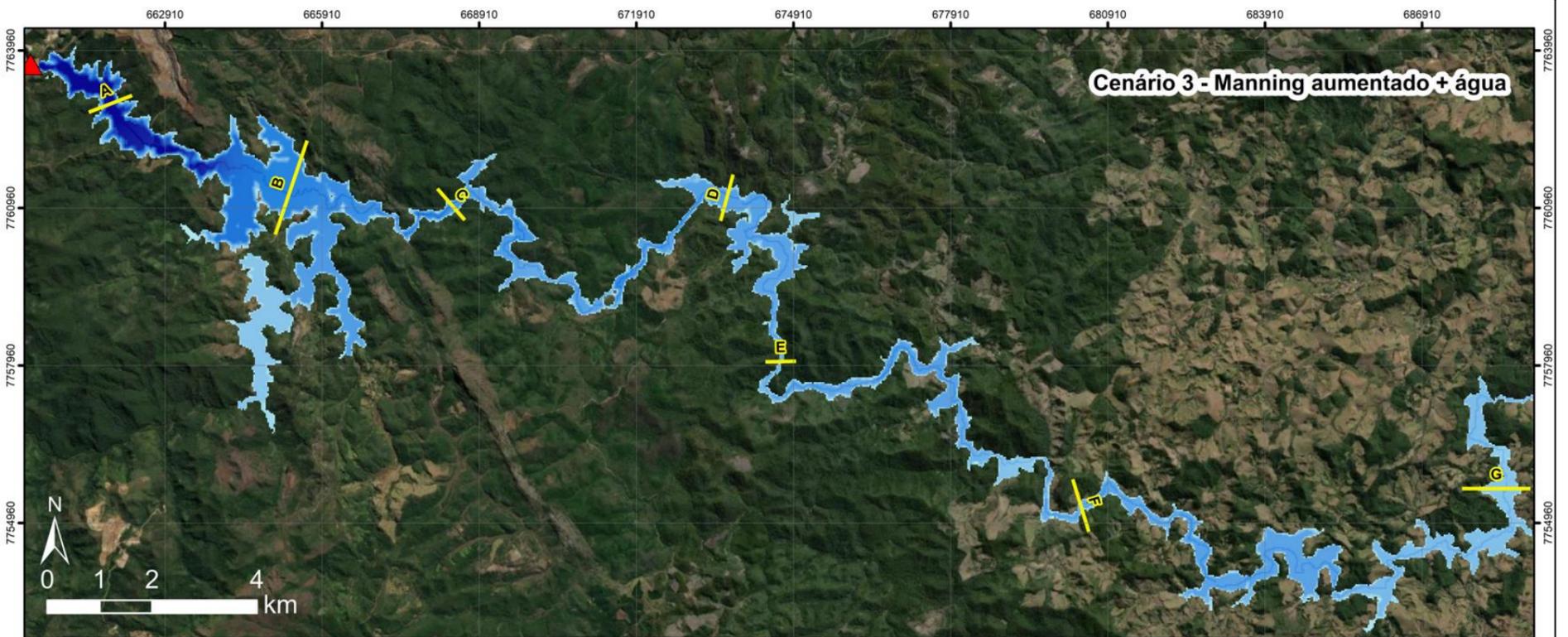
Seção	Profundidades máximas (m)				
	C1	C2	C3	C4	C5
D	14,3	15,0	15,4	15,0	15,4
E	7,0	7,5	7,7	7,2	7,0
F	11,1	11,6	11,8	11,4	11,4
G	8,8	9,0	9,0	8,6	8,1
H	6,3	6,4	6,5	6,1	5,7

Fonte: elaboração própria, 2022.

A observação da distribuição espacial das profundidades máximas, através da Figura 6.12, permite avaliar que nos cenários 2 e 3 (Manning elevado) há acumulação de fluido na região logo a jusante do reservatório, com grande elevação dos níveis nas planícies. Os cenários 4 e 5, correspondentes aos fluidos não-newtonianos, também apresentam profundidades maiores do que as da simulação com água (cenário 1) – isto ocorre porque há interação entre as partículas em suspensão, dificultando o escoamento do fluido e aumentando sua retenção em um local, elevando os níveis d'água.

Figura 6.12 – Profundidades máximas logo a jusante do barramento simulado – valores truncados em um máximo de 35 m para possibilitar a avaliação das diferenças entre os cenários





Fonte: elaboração própria, 2022.

6.4 Resumo dos resultados obtidos

A Tabela 6.5 apresenta um breve resumo dos principais resultados obtidos. A partir dos resultados deste estudo, foram elaboradas algumas conclusões prévias, descritas a seguir, que podem servir como bases/hipóteses para estudos futuros e mais aprofundados. Ressalta-se que os resultados obtidos para esta região de estudo podem variar conforme as características do local, dados de entrada/condições de contorno utilizados e até abstrações realizadas pelos autores.

Tabela 6.5 – Resumo dos principais resultados obtidos

Manchas de inundação	Velocidades do escoamento e tempos de chegada	Profundidades máximas
Os resultados foram muito semelhantes para todos os cenários simulados. Os cenários com as maiores manchas de inundação foram os com aumento nos coeficientes de Manning – C2 e C3.	As velocidades de escoamento foram muito próximas entre si nos cenários 1 (água), 4 e 5 (inserção das propriedades reológicas). Entretanto os cenários com aumento do coeficiente de Manning apresentaram velocidades de escoamento bem menores, gerando tempos de chegada muito maiores.	As profundidades máximas no cenário 1 (água) foram as menores, seguidas pelos cenários 2 e 3. Em geral, as maiores profundidades ocorrem na região próxima ao barramento, por ser uma região com topografia de vale encaixado.

Fonte: elaboração própria, 2022.

A primeira conclusão, obtida a partir da observação da Figura 6.8 (hidrogramas de ruptura para a seção A) é que não há grande alteração nos hidrogramas de ruptura entre o cenário que considera água (C1) e os cenários com fluido hiperconcentrado com inserção da reologia (C4 e C5). Ao avaliar-se a Figura 6.9, referente aos hidrogramas propagados até a seção H, observa-se que os comportamentos dos hidrogramas C4 e C5 são muito semelhantes ao da água, em termos de tempos de deslocamento, mas há dispersão significativa dos volumes propagados.

A segunda conclusão obtida é que o aumento dos coeficientes de Manning (C2 e C3) impactam não somente as vazões de pico, mas também nos tempos de propagações, em valores consideravelmente maiores do que nas simulações de fluidos hiperconcentrado (C4 e C5). Esta observação incute que



estudos de rupturas de barragens baseados apenas na metodologia de aumento dos coeficientes de Manning podem gerar inexatidões muito relevantes no tempo de chegada de onda de cheia.

Por fim, uma observação relevante sobre a área de estudo é que neste local diferenças grandes de profundidades máximas dentre os cenários não impactaram muito na área da mancha de inundação, devido à característica de vale encaixado da região. Possivelmente, caso a região de estudo fosse um vale mais aberto, a diferença entre os resultados para os cenários em termos de área superficial inundada seria maior, devido aos impactos das diferentes de profundidades máximas em um local com baixas diferenças de altitudes.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

O presente trabalho avaliou diferentes metodologias para a simulação de rompimento de barragens de rejeitos considerando fluidos hiperconcentrados no *software* HEC-RAS 6.2. O estudo de caso consistiu em propagar um rompimento hipotético de uma barragem análoga à de Fundão (Mariana – MG). Para isto, foram analisados cinco cenários: rompimento considerando o fluido como água (C1); rompimento com elevação do coeficiente de Manning da calha e da planície de jusante conforme a metodologia proposta por Ventura (2011) (C2); rompimento com elevação do Manning da calha e da planície de jusante em 6x o valor inicial estabelecido para o local (C3); fluido não-newtoniano considerando o conhecimento prévio das suas propriedades (C4) e, por fim, fluido não-newtoniano conhecendo apenas a concentração volumétrica do fluido (C5).

De forma geral, pode-se identificar que os cenários 1, 4 e 5 apresentaram maior semelhança entre si, devido à menor dispersão de energia pelos Mannings mais baixos, em relação aos cenários 2 e 3.

A análise das manchas de inundação resultou em maiores áreas inundadas nos cenários com alteração do Manning, sendo estas as abordagens mais conservadoras em relação ao tamanho da mancha, devido à maior acumulação de volumes a montante. Esta análise é complementada pela avaliação das profundidades máximas nas seções de resultados, que também são mais elevadas nestes cenários. Além disso, estes cenários apresentaram menores velocidades máximas de escoamento em toda a extensão da simulação. Todas estas observações sobre o comportamento do fluido estão relacionadas à perda de energia do escoamento devido ao atrito com a superfície por onde ele escoava – este atrito gera um acúmulo de volumes a montante.

Quanto aos tempos de chegada da onda de cheia, os cenários mais conservadores em relação à segurança – ou seja: cujo deslocamento da onda cheia é mais rápido – são, primeiro, o cenário que propaga somente água, seguido pelos cenários que consideram fluidos não-newtonianos: o cenário 2, com tempos menores gerados pela menor tensão de cisalhamento inserida no

modelo, seguido pelo cenário 3, para o qual foram consideradas tensões de cisalhamento mais elevadas.

No que diz respeito às profundidades, como já citado, os cenários com alteração nos valores de Manning atingiram as maiores profundidades. Considerando os cenários com inserção das características de fluidos não-newtonianos, quando comparados com a simulação de água, também geraram profundidades maiores, resultando em cenários mais conservadores com relação aos níveis d'água atingidos.

Assim, uma das principais considerações deste estudo é que a metodologia de aumento do Manning, apesar de aumentar as áreas inundadas, gera resultados de velocidades de escoamento mais lentas, mesmo no cenário conforme Ventura (2011). Isto pode ser não tão desejável em estudos aplicados ao mapeamento das zonas de risco, em especial das Zona de Auto-Salvamento (ZAS) – que, segundo a Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei 14.066 de 2020), é definida como aquela região a jusante da barragem em que não há tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em caso de acidente. Deve-se considerar que os estudos integrantes de PAEBM que foram elaborados com base nesta metodologia podem estar potencialmente equivocados com relação aos seus tempos de chegadas e às suas ZAS. Sendo este o caso, estariam colocando em risco a vida da população residente à jusante destas estruturas. Ressalta-se que há necessidade de mais estudos comparativos para que esta conclusão seja verificada.

Assim, torna-se uma prática que preza mais pela segurança que as simulações de propagação de ondas de cheias de rompimentos de barragens de rejeitos sejam realizadas considerando as velocidades de propagação das outras metodologias aqui expostas, dos cenários 4 e 5.

Como perspectivas futuras, propõe-se que sejam realizados estudos no sentido de:

- i. Realizar análises de sensibilidade no modelo às diferentes variáveis de entrada, a fim de obter uma quantificação da influência dos parâmetros nos resultados obtidos;

-
- ii. Avaliar os efeitos destas diferentes abordagens metodológicas em relação às manchas observadas na realidade, após acidentes, com comparação dos resultados obtidos para verificação da melhor metodologia para um caso concreto;
 - iii. Analisar outras metodologias disponíveis no modelo para simulação de fluidos não- newtonianos, bem como diferentes concentrações de fluidos hiperconcentrados. Nesse sentido, uma pergunta que segue não respondida pelo presente estudo, mas é pode ser caso de estudo é: *qual dos dois cenários (C4 ou C5) que consideram a reologia do fluido melhor representa a realidade?*
 - iv. Avaliar a possibilidade de inserir a incorporação de material ao longo da propagação da onda de cheia, uma vez que ocorre o arrasto de materiais pela onda de cheia, aumentando a massa específica relativa da onda propagada;
 - v. Avaliar a simulação com as mesmas condições e diferentes concentrações volumétricas, ou mesmo alterando as demais propriedades reológicas, como o a massa específica relativa, a taxa de deformação viscosa e as viscosidades dinâmicas;

Ainda, sugere-se que a metodologia aqui utilizada seja reaplicada para áreas de estudos diferentes, especialmente no que diz respeito à topografia, com ênfase em vales não-encaixados, de modo a verificar se o comportamento aqui observado se mantém em locais com características geomorfológicas distintas como, por exemplo, cursos d'água de larguras mais expressivas.

Por fim, salienta-se que este estudo não teve como objetivo determinar com fidelidade os resultados da hipotética ruptura da barragem de Fundão, mas sim de utilizar o local como uma base real na definição de dimensões para estudo de caso. Portanto, as manchas de inundação geradas estão atreladas às considerações, simplificações e decisões tomadas neste estudo e não refletem a realidade do local.



8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - Agência Nacional de Águas. Manual de Políticas e Práticas de Segurança de Barragens - Manual para Entidades Fiscalizadoras, Relatório Final. Brasília - DF. Nov. de 2014.

BARREIRA, Gustavo Sales. Modelagem e simulação hidráulica no diagnóstico e resolução de problema em rede no Guajiru, Caucaia. 2017. 96 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

BRANDÃO, Mariana Ribeiro de Lima. Modelagem Hidrodinâmica Uni e Bidimensional Aplicada ao Rompimento da Barragem do Fundão em Mariana/MG. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas. Coordenação técnica de Marina Dalla Costa. – Brasília: ANM, 2020.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração - SIGBM. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/Sigbm/publico>. Acesso em 15 de jul. de 2022.

BRASIL. Lei Federal nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art.4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da União. 2010.

BRASIL. Lei Federal nº 14.066 de 20 de setembro de 2020, que altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Diário Oficial da União. 2020

BRASIL. Lei Federal nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, que Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art.21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União. 1997.

BRASIL. Resolução ANA nº 236 de 30 de janeiro de 2016, que estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis



técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Diário Oficial da União. 2017.

BRASIL. Resolução ANAnº132 de 25 de outubro de 2016, que estabelece critérios complementares de classificação de barragens reguladas pela Agência Nacional de Águas–ANA, quanto ao Dano Potencial Associado-DPA, com fundamento no art. 5º, §3º, da Resolução CNRH nº 143, de 2012, e art. 7º da Lei nº12.334, de 2010.Diário Oficial da União. 2016

BRASIL. Resolução ANA nº121 de 09 de maio de 2022, que altera a Resolução ANA nº236 de janeiro de 2017.Diário Oficial da União. 2016

BRASIL. Resolução CNRH nº143 de 10 de julho de 2012, que estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art.7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.Diário Oficial da União. 2012

BRASIL. Resolução CNRH nº144 de 10 de julho 2012, que estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, em atendimento ao art. 20 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que alterou o art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.Diário Oficial da União. 2012.

BRASIL. Resolução da Agência Nacional de Mineração, que consolida os atos normativos que dispõe sobre segurança de barragens de mineração. 07 de fev. de 2022. Diário Oficial da União. 2022.

BRUNNER, Gary W. Dam and levee breaching with HEC-RAS. In: **World Water & Environmental Resources Congress 2003**. 2003. p. 1-9.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO A. C. MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO – UMA REVISÃO. Holos, ano 32, vol. 08 ISSN 1807-1600. DOI: 10.15628/holos.2016.5367. dez. de 2016.

CASSIO, E. I. MOMENTO EXATO DA BARRAGEM DO FUNDÃO SE ROMPENDO. Disponível em: <
<https://www.youtube.com/watch?v=NgVB190kemY>. > Acesso em 30/07/2022.

CMB - Comissão Mundial de Barragens. Barragens e desenvolvimento: um novo modelo para tomada de decisões - um sumário. Relatório da Comissão Mundial de Barragens. Nov. de 2000.



Consórcio Ecoplan-Lume. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Doce - Relatório final, volume I. IGAM - Contrato 043/2008. Jun. 2010.

COORDENADORIA ESTADUAL DE DEFESA CIVIL - CEDEC. Ofício Circular 02- 2019 GMG/CEDEC. Assunto: Solicitação de informações complementares ao PAEBM, preenchimento do questionário de pesquisa e encaminhamento de 161 Termo de Referência para elaboração dos estudos de cenários de ruptura hipotética de barragens. 2019

DIAS, Neemias Almeida, 1990- Determinação de propriedades reológicas de rejeito de mineração por meio de reômetro rotacional / Neemias Almeida Dias. – 2017. 90 f. : il.

EVANGELISTA, T. M. S.; SANTOS, I. C. P. Segurança de barragens: uma revisão sistemática acerca das possíveis causas de rupturas em barragens e suas possíveis consequências. UNIV- Universidade de Rio Verde. Rio Verde - GO. 2020.

FAN F. M., BUARQUE D. C., PONTES, P.R.M., COLLISCHONN W. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Novembro de 2015, Brasília-DF.

FAN F. M., COLLISCHONN W.,. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 19 n.1 –Jan/Mar 2014, pág. 243- 254.

FARR, T.G., ROSEN, P.A., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., KOBRICK, M., PALLER, M., RODRIGUEZ, E., ROTH, L., SEAL, D., SCHAFFER, S., SHIMADA, J., UMLAND, J., WERNER, M., OSKIN, M., BURBANK, D., & ALSDORF, D., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. Review of Geophysics, 45:RG2004.

FERREIRA, D. S. *Análise do comportamento de aterro experimental executado sobre um depósito de rejeitos finos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Núcleo de Geotecnia. 145pg, 2016.

FLEISCHMANN, A. et al. Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi- arid wetlands. ELSEVIER - Journal of Hydrology vol. 561 2018 p. 943 – 959

FORNI, J. J. Rompimento da Barragem da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, da Mineradora Vale. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=pTJCqOWTUqY>>. Acesso em 15 de set. de 2022.

GIBSON, S. FLOYD, I; HEATH, R. Comparing single-phase, non-Newtonian approaches with experimental results: Validating flume-scale mud and debris



flow in HEC-RAS. *Earth Surf Process Landforms* WILEY. 2021;46:540–553. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/esp.5044>>

GIBSON, S; MOURA, L. Z; ACKERMAN, C; ORTMAN, N; AMORIM, R; FLOYD, I; EOM, M; CREECH, C; SÁNCHEZ, A. Prototype Scale Evaluation of Non-Newtonian Algorithms in HEC-RAS: Mud and Debris Flow Case Studies of Santa Barbara and Brumadinho. *Geosciences* 2022, 12, 134. <https://doi.org/10.3390/geosciences12030134>

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. *Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração*; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016. 128 p. ISBN: 978-85-61993-10-8

INOVAGRI - Instituto de Pesquisa e Inovação na Agricultura Irrigada. *Agricultura Irrigada - desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável*. EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Brasília, DF. 2017.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *World Register – General Synthesis*. Disponível em <https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp>. Acesso em 15 jul. 2022.

KUHLKAMP, Jonas Freitas. *Análise do Efeito em Cascata da Propagação da Onda de Cheia Gerada pelo Rompimento Hipotético de uma das Barragens Existentes no Rio Irani-SC*. 2016. TCC (Graduação). Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/171380>>. Acesso em 15 fev. 2022.

LOPES, V. A. R. L., FAN F. M., et al. A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes. *Elsevier – Journal of Hydrology* 2018 p. 177 – 196

MACHADO, N. C.; SALIBA, A. P.; BAPTISTA, M. B. *Modelagem Hidráulica 1D e 2D de fluidos hiperconcentrados no HEC-RAS - estudo de caso da ruptura da barragem do Fundão*. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis, SC. 2017.

MACHADO, Nathália Couto. *Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação*. 2017.

MARAGNONI, T. T; JÚNIOR, M. A. S; OLIVEIRA, J. N. *A utilização do hec-ras determinar cota de inundação na ruptura hipotética de uma barragem - estudo de caso da PCH Salto Buriti*. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis, 2017.

MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. *Fundão Tailings Dam Review Panel. Report on the Immediate Causes of the Failure of*



the Fundão Dam. 2016. 88 p. Disponível em: <<http://fundaoinvestigation.com/>>. Acesso em: 22 de out de 2022.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y.; FULLERTON, W. T. *Two –dimensional water flood and mudflow simulation*. Journal of hydraulic engineering, v. 119, n. 2, p. 244-261, 1993.

PAIVA, R. C. Simulação numérica de escoamento à superfície livre: equações de Saint Venant [Apresentação de apoio à disciplina de Hidráulica Computacional, lecionada no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. Ago., 2021.

PILOTTI, M., MILANESI, L., BACCHI, V., TOMIROTTI, M., & MARANZONI, A. Dam-break wave propagation in Alpine valley with HEC-RAS 2D: experimental Cancano test case. Journal of Hydraulic Engineering, 146(6), 05020003. 2020

POPESCU, I. Computational Hydraulics – numerical methods and modelling. IWA Publishing. Londres, 2014.

SANDRONI, S; GUIDO, G. Barragens de Terra e Enrocamento. São Paulo: Oficina dos textos. 2021

SANTOS, L. F; CHARGEL, L. T; HORA, M. A. G. M. Simulação do rompimento hipotético da barragem de Juturnaíba, localizada no estado do Rio de Janeiro. Anuário do instituto de geociências da Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro - RJ. 2019.

SANTOS, R. C. V. CONTRIBUIÇÃO DO SETOR MINERAL NO PRODUTO INTERNO BRUTO BRASILEIRO. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/radar65art6>. Abr, 2021.

SOTERRONI, A. C. Simulação e análise da dinâmica de fluidos - São José dos Campos: INPE, 2007. 130 p. ; (INPE-14808 -TDI/1251)

TOAPAXI ALVAREZ, Jorge; ACERO QUILUMBAQUIN, Andrés. Analysis of Flooding by Dam Breaking Using the 2D HEC-RAS Model: Case Study of the Mulacorral Dam, Tungurahua Province, Ecuador. Revista Politécnica, v. 48, n. 1, p. 51-64, 2021.

TSCHIEDEL, A. D. F., Jardim, P. F., Possa, T. M., Fan, F. M., & Paiva, R. C. D. D. (2021). Impacto do novo esquema de solução numérica estabelecido no HEC-RAS 6.0 em estudos de rompimento de barragens. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (24.: 2021: Belo Horizonte). Anais [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRHidro, 2021.

TSCHIEDEL, A. F. Abordagem de grande escala para simulações de cheias geradas por rompimentos de barragens de armazenamento de água / Arthur da Fontoura Tschiedel. 2022. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-



Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

TSCHIEDEL, Arthur da Fontoura et al. Barragens e Rompimentos: Compilação Histórica Nacional e Internacional. In: XXIII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, PR. Foz do Iguaçu, PR. 2019

URIZCĂ, A. et al. Using 2D HEC-RAS Modeling and Embankment Dam Break Scenario for Assessing the Flood Control Capacity of a Multi-Reservoir System (NE Romania). *Water*, v. 13, n. 1, p. 57, 2021.

US Army Corps of Engineers (USACE) – Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual versão 6.0. maio, 2021

USACE. HEC-RAS Release Notes - HEC-RAS 6.0 New Features List. 2022. Disponível em: <
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasrn/hec-ras-6-0-new-features-list>> Acesso em Ago. de 2022.

VANELLI, F. M. ; FAN, F. M. ; KOBİYAMA, M. . Panorama geral sobre dados hidrológicos com ênfase em eventos hidrológicos extremos. *REGA - REVISTA DE GESTÃO DE ÁGUA DA AMÉRICA LATINA*, v. 17, p. 24-0, 2020.

VENTURA. (2011) – “*Sediment/Debris Bulking Factors and Post-fire Hydrology for Ventura-County*”. Relatório final. 184 p. WEST Consultains, inc Ventura County Watershed Protection District.