

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Bruna Moraes Vicente

**Comparação entre Estimativas de Mancha de Inundação devido a Ruptura Hipotética
de Barragem utilizando diferentes Bases Topográficas**

Florianópolis

2022

Bruna Moraes Vicente

**Comparação entre Estimativas de Mancha de Inundação devido a Ruptura Hipotética
de Barragem utilizando diferentes Bases Topográficas**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro
Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Sanitária e Ambiental
Orientador: Prof. Davide Franco, Dr.
Co-orientador: Matheus Willinghoefer

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vicente, Bruna Moraes

Comparação entre Estimativas de Mancha de Inundação devido a Ruptura Hipotética de Barragem utilizando diferentes Bases Topográficas / Bruna Moraes Vicente ; orientador, Davide Franco, coorientador, Matheus Willinghoefer, 2022.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Engenharia Sanitária e Ambiental. 3. Ruptura de barragem. 4. Modelos hidrodinâmicos bidimensionais. 5. Bases topográficas. I. Franco, Davide. II. Willinghoefer, Matheus. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Bruna Moraes Vicente

Comparação entre Estimativas de Mancha de Inundação devido a Ruptura Hipotética de Barragem utilizando diferentes Bases Topográficas

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Local, 22 de abril de 2022.

Profa. Maria Elisa Magri, Dra.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Davide Franco, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Eng^a. Priscilla Kern, MSc.
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Eng. Ailton João Gonçalves Moreira, MSc.
Avaliador
Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A.

Este trabalho é dedicado à minha avó, mãe e irmã, mulheres da minha vida. Aquelas que, com orgulho, representam a força feminina e me incentivam a ser muito mais de mim.

AGRADECIMENTOS

Estes agradecimentos foram escritos com lágrimas que representam, neste momento, a minha sorte em ser rodeada de pessoas extraordinárias. Agradeço à minha mãe e o meu pai, Denise e Wildson, que como base e primeira instituição, me deram todo o suporte e me propiciaram boas condições para que eu pudesse conquistar meus sonhos e me dedicar a minha formação. Vocês vibram com cada pequena conquista minha, desde pequena.

Agradeço a minha vó Alzira por todo o amor e por dedicar boa parte da sua vida, à minha. Obrigada por ter plantado em mim a semente da curiosidade e da responsabilidade, transmitindo a importância do ensino e da educação. À minha irmã Bárbara, bárbara até no nome. Obrigada pelo apoio incondicional, pelos beijinhos e “eu te amo” intrometidos entre um projeto e outro, entre um choro e outro, entre as longas horas de produção e estudo, me tranquilizando e me lembrando constantemente que eu sou capaz. És meu eterno presente de Natal, minha alegria e meu orgulho, somos nós duas contra o mundo.

À minha primeira amiga da graduação, Isadora, pelas ricas trocas e pelos estímulos durante toda esta trajetória. Obrigada pela sintonia, cumplicidade e por acreditar em mim mais do que eu mesma. Eu te admiro, mulher.

Aos meus queridos amigos, que entre cafés, empatia e boas risadas, fizeram os estudos mais leves. Aline, Alisson, Amanda, Ivana, Jamily e Luiza, sou grata pelo partilhar de experiências e de vida ao longo desses anos.

Agradeço as instituições que tive o privilégio de estagiar e a todos os excelentes profissionais que auxiliaram na minha formação. Ênfase à Nova Engevix Engenharia e Projetos e os profissionais (e amigos) pelas contribuições para meu crescimento nesta reta final da graduação: Karol, Anax, Alana e ao Matheus, também meu co-orientador, pela disponibilidade e orientações assertivas para o desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço ao Fernando, que além de grande amigo, me incentiva a conquistar meu próprio espaço. À CERB pela disponibilização dos dados.

Agradeço todas as professoras e professores que passaram pela minha vida. Destaque ao professor Davide pela gentileza e orientações na execução deste trabalho.

Por fim, agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina, instituição de educação pública, gratuita e de qualidade, pela excelência em ensino, pesquisa e extensão. Tenho orgulho em ser UFSC e serei resistência em defesa da Educação.

RESUMO

As barragens são estruturas que são associadas a riscos e a danos potenciais para a população, meio ambiente e pontos vulneráveis localizados no vale de jusante do empreendimento. Com o estabelecimento da Política Nacional de Segurança de Barragens, torna obrigatório a elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE) para barragens classificadas como médio e alto dano potencial. No PAE, dentre os temas contemplados, é apresentada a definição da região a jusante da barragem atingida por meio de modelagem hidrodinâmica. A topografia da planície de inundação é um dos dados de entrada utilizados nos modelos hidrodinâmicos. Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs), como são conhecidos, podem ser obtidos por vias distintas, em resoluções espaciais e custos diversos. A proposta de estudo fundamenta-se na comparação das bases topográficas SRTM em resolução espacial de 30 m, ALOS PALSAR em resolução espacial de 12,5 m e MDT gerado a partir de levantamento aerofotogramétrico em resolução espacial de 1 m, identificando as principais diferenças para composição da topografia do modelo hidrodinâmico de ruptura hipotética de barragem associada a um cenário de cheia mais provável. A área em estudo é a barragem de Pindobaçu, localizada no município de Pindobaçu, no estado da Bahia e as bases topográficas escolhidas contemplam a área do vale de jusante do barramento, com extensão de 22 km. Das três bases topográficas, o MDE ALOS PALSAR apresentou diferenças altimétricas quando comparado ao MDT referência. As curvas hipsométricas e curvas cota x volume também apresentaram discrepância do MDE ALOS PALSAR em relação ao MDT e MDE SRTM. Desta forma, a base topográfica ALOS PALSAR é incongruente e apresentará resultado destoantes da realidade local, em uma modelagem hidrodinâmica e desta forma, sua utilização foi descartada como topografia do modelo. Duas simulações foram desenvolvidas em modelo bidimensional no *software* HEC-RAS 6.1. Na Simulação 01 foi utilizado o MDE derivado de dados SRTM em resolução espacial de 1 m e na Simulação 02 foi utilizado dados obtidos por meio de levantamento aerofotogramétrico, em resolução espacial de 1 m. Como resultado, constatou-se pouca variação entre os resultados das simulações e uma diferença de área de três hectares, correspondendo a 0,23% em área. Foram identificadas também diferenças entre as infraestruturas atingidas: 90 residências e 02 locais de aglomeração foram mapeados na Simulação 01 e 80 residências e 02 locais de aglomeração mapeados na Simulação 02.

Palavras-chave: Ruptura de barragem. Modelos hidrodinâmicos bidimensionais. Modelos Digitais de Terreno. Resolução Espacial. Mancha de Inundação.

ABSTRACT

Dams are structures that imply risks and potential damage to people, the environment and vulnerable areas in the downstream valley. Along with the establishment of the Brazilian national Dam Safety Policy (Política Nacional de Segurança de Barragem in Portuguese), it turned mandatory to elaborate an Emergency Action Plan (Plano de Ação de Emergência in Portuguese), focused on dams classified with medium or high potential damage. In this document, among the themes considered, it is defined the downstream region impacted by the hypothetical dam failure, which is based on hydrodynamic simulations. The topography of the flood plain figures as one of the input data of the hydrodynamic model. The DEMs (Digital Elevation Models), may be obtained through various means, which imply variations in spatial resolutions and executive costs. This study focused on comparing the topographic bases: SRTM with a spatial resolution of 30 m, ALOS PALSAR with a spatial resolution of 12,5 m and a DEM generated through aerial photogrammetric survey with 01 m spatial resolution, identifying the main differences between them, focused on what concerns the elevation model composition in the hydrodynamic simulation for the hypothetical failure of a dam considering a most provable flood scenario. The area under study is the Pindobaçu dam, located in the municipality of Pindobaçu, in the state of Bahia and the topographic bases chosen contemplate the area of the valley of the bus, with an extension of 22 km. Between the three basis analyzed, the ALOS PALSAR DEM has shown height differences compared with the reference surveyed DEM. The hypsometric curves and reservoir volume curve have also shown discrepancies among ALOS PALSAR, the surveyed DTM and SRTM DEM. As a result, the ALOS PALSAR has shown bigger differences when it comes to the representation of the real terrain in the context of a hydrological simulation and its use was discarded as topography of the model. Both simulations were developed through bidimensional modelling in the software HEC-RAS 6.1. The simulation 01 was carried with the DEM derived from SRTM data with a spatial resolution of 1 meter, in the other hand, the Simulation 2 was based on the DEM data derived from the aerial photogrammetric survey, with 01 meter spatial resolution. As a result, it was discovered that there was a variation of 3 hectares among the areas, corresponding to 0,23% difference in area. It was identified discrepancies between the affected infrastructures: 90 residences and 2 gathering spots were mapped on Simulation 1; 80 residences and 02 gathering spots on Simulation 2.

Keywords: Dam failure. 2D hydrodynamic models. Digital terrain models. Spatial resolution. Flooded area.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desastre no vale de jusante causado após rompimento da barragem do Fundão, em Mariana (MG) no ano de 2015.	18
Figura 2 - Inundação no vale de jusante após rompimento da barragem próxima ao município de Jussiapé (BA).	19
Figura 3 - Discretização da planície em um modelo de inundação do tipo células de armazenamento.	26
Figura 4 - Diferença entre MDS e MDT	28
Figura 5 - Localização da barragem de Pindobaçu.	33
Figura 6 - Curva Cota x Volume do Reservatório de Pindobaçu.	33
Figura 7 - Vista Aérea da Estrutura Extravasora da Barragem de Pindobaçu.	34
Figura 8 - Curva de Descarga do Vertedor da Barragem de Pindobaçu.	35
Figura 9 - Levantamento Topográfico Cadastral - Ponte 01.	35
Figura 10 - Levantamento Topográfico Cadastral - Ponte 02.	35
Figura 11 - Precipitações mensais mínimas, médias e máximas.	37
Figura 12 - Hidrograma de Projeto para o Tempo de Recorrência de 100 anos.	38
Figura 13 - Obtenção das imagens SRTM no banco de dados do USGS.	39
Figura 14 - Comparação entre MDE_SRTM_30m e MDE_SRTM_1m.	40
Figura 15 - Obtenção das imagens do ALOS PALSAR.	41
Figura 16 - Comparação entre MDE_ALOS_12m e MDE_ALOS_1m.	41
Figura 17 - Localização das seções de estudo.	43
Figura 18 - Localização dos pontos de análise.	43
Figura 19 - Geometria da barragem de Pindobaçu.	46
Figura 20 - Geometria da brecha de ruptura – base topográfica MDT_1m.	47
Figura 21 - Seção transversal da Seção 01 para diversos MDTs.	52
Figura 22 - Seção transversal da Seção 02 para diversos MDTs.	52
Figura 23 - Seção transversal da Seção 03 (Ponte 01) para diversos MDTs.	52
Figura 24 - Seção transversal da Seção 04 para diversos MDTs.	53
Figura 25 - Seção transversal da Seção 05 para diversos MDTs.	53
Figura 26 - Seção transversal da Seção 06 para diversos MDTs.	53
Figura 27 - Seção transversal da Seção 07 para diversos MDTs.	54

Figura 28 - Seção transversal da Seção 08 (Ponte 02) para diversos MDTs.....	54
Figura 29 - Seção transversal da Seção 09 para diversos MDTs.....	54
Figura 30 – Recortes dos Mapas de erros altimétricos.....	55
Figura 31 - Comparação entre as curvas hipsométricas das bases topográficas de resolução espacial de 1 metro.	58
Figura 32 - Comparação entre as curvas Cota x Volume das bases topográficas de resolução espacial de 1 metro.	58
Figura 33 - Hidrogramas de rupturas - Base topográfica MDT_1m (Simulação 01).....	60
Figura 34 - Hidrogramas de rupturas - Base topográfica MDE_SRTM_1m (Simulação 02)..	61
Figura 35 - Comparação entre os hidrogramas de ruptura nas seções 03 (Ponto 01) e 08 (Ponte 02) para as duas simulações em estudo.	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre metodologias de levantamento topográfico para estudos de ruptura.....	27
Quadro 2 - Coordenadas das estruturas levantadas.	36
Quadro 3 - Estações Pluviométricas utilizadas na atualização dos estudos.	36
Quadro 4 - Valores característicos adotados para definição da brecha de ruptura.....	47
Quadro 5 - Valores Manning atribuídos ao Rio Principal e Área de Inundação.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modos de falhas típicos em barragens.	21
Tabela 2 – Nomenclaturas utilizadas para as bases topográficas.	44
Tabela 3 - Comparação entre as altimetrias das bases topográficas em pontos específicos de análise.	51
Tabela 4 - Comparação entre as bases topográficas com resolução espacial de 1 metro.	56
Tabela 5 - Comparação entre as bases topográficas em resolução espacial original.	57
Tabela 6 - Características da cheia de ruptura nas seções de referência - Base topográfica MDT_1m (Simulação 01).....	59
Tabela 7 - Características da cheia de ruptura nas seções de referência - Base topográfica MDE_SRTM_1m (Simulação 02).....	60
Tabela 8 - Diferença resultante entre as simulações de ruptura de barragem.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ASF	Alaska Satellite Facility
CERB	Companhia de Energia Hídrica e de Saneamento da Bahia
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CN	Curve Number
CRI	Categoria de Risco
DPA	Dano Potencial Associado
FEMA	Federal Emergency Management Agency
GDS	Ground Sample Distance
InSAR	Interferometria de Radar de Abertura Sintética
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JAROS	Japan Resources Observation System Organization
LiDAR	Light Detection And Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PAE	Plano de Ação de Emergência
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragem
RAS	<i>River Analysis System</i>
RPSB	Revisão Periódica de Segurança de Barragens
SCS	Soil Conservation Service
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UHE	Usina Hidrelétrica
USACE U.S.	Army Corps of Engineers
USGS	Serviço Geológico dos Estados Unidos
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Rompimento de barragens.....	18
2.2	Política Nacional de Segurança de Barragens.....	21
2.3	Modelagem Hidráulica.....	22
2.3.1	Modelo Hidrodinâmico HEC-RAS	24
2.4	Bases Topográficas.....	26
2.4.1	Sensoriamento Remoto	28
2.4.1.1	<i>SRTM</i>	29
2.4.1.2	<i>ALOS PALSAR</i>	29
2.4.2	Levantamento Topográfico por Aerofotogrametria	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	Caracterização da Área de Estudo.....	32
3.2	Estudo Hidrológico.....	36
3.3	Bases Topográficas.....	38
3.3.1	Modelo Digital de Elevação: SRTM	38
3.3.2	Modelo Digital de Elevação: ALOS PALSAR	40
3.3.3	Modelo Digital de Terreno: Levantamento Aerofotogramétrico.....	41
3.3.4	Comparação entre as Bases Topográficas em Estudo	42
3.4	Construção do modelo.....	45
3.4.1	Geometria do Modelo.....	45
3.4.2	Cenário a Simular	48

3.4.3	Extensão do Cálculo	48
3.5	Aplicação do Modelo Hidrodinâmico HEC-RAS	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	Comparação entre as bases topográficas	51
4.1.1	Bases Topográficas Utilizadas.....	51
4.1.2	Bases Topográficas de mesma Resolução Espacial	56
4.1.3	Bases Topográficas em Resolução Espacial Original.....	57
4.1.4	Curvas Hipsométricas e Curvas Cota x Volume	57
4.2	Simulação da Ruptura Hipotética de Barragem	59
4.2.1	Resultados das Manchas de Inundação.....	63
5	CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS		66
APÊNDICE A – Mapas de erros altimétricos – ALOS 12,5m / ALOS 1m		71
APÊNDICE B – Mapas de erros altimétricos – SRTM 30m / SRTM 1m		72
APÊNDICE C – Mapas de erros altimétricos – MDT 1m / ALOS 12,5m.....		73
APÊNDICE D – Mapas de erros altimétricos – MDT 1m / SRTM 30m		74
APÊNDICE E – Diferença entre as áreas das manchas de inundação para o cenário de ruptura mais provável.....		75
APÊNDICE F – Pontos vulneráveis mapeados na mancha de inundação – Simulação 0176		
APÊNDICE G – Pontos vulneráveis mapeados na mancha de inundação – Simulação 0277		

1 INTRODUÇÃO

As barragens, constituídas do barramento e das estruturas associadas, tratam-se de estruturas construídas com a finalidade de conter ou acumular água e outras substâncias líquidas ou misturas entre líquidos e sólidos (BRASIL, 2020). A estas são associados riscos e, de acordo com ANA (2016), danos potenciais para as populações e os bens materiais e ambientais existentes no vale de jusante decorrentes de diversos aspectos, sendo um deles o rompimento do barramento.

De modo a garantir as condições de controle e de segurança para as barragens, a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, alterada pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, estabeleceu um marco legal para segurança de barragens no Brasil por meio da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Como instrumentos da PNSB destaca-se o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), o Plano de Segurança da Barragem (PSB) e o sistema de classificação de barragens por categoria de risco (CRI) e por dano potencial associado (DPA).

De acordo com a Lei nº 14.066 (BRASIL, 2020) os empreendedores são os responsáveis legais pela segurança do empreendimento e, conseqüentemente, pelos danos e reparações decorrentes do rompimento. Para atender o instrumento da lei, os empreendedores devem desenvolver o PSB, e nos casos de barragens classificadas como médio e alto dano potencial associado, a elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE) é obrigatória.

O PAE é um documento que contém as ações a serem executadas em caso de emergência, como a ruptura da barragem, fator em estudo no presente trabalho. Este documento deve contemplar a identificação das possíveis situações de emergência, os procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados nessas situações, a definição da região a jusante da barragem atingida em uma situação de emergência e as estratégias de alerta da população potencialmente afetada (ANA, 2016).

Para identificar a região a jusante susceptível à inundação pelo rompimento do empreendimento, bem como definir a população e infraestruturas atingidas, estudos devem ser desenvolvidos utilizando modelagem computacional. Os modelos hidrodinâmicos são comumente utilizados para simular o rompimento de barragem e a propagação da onda de inundação, sendo o *software* gratuito HEC-RAS popularmente conhecido na área.

Os dados de entrada do modelo hidrodinâmico são constituídos, frequentemente, dos seguintes parâmetros, conforme apresentado por Tschiedel (2017): seções topobatimétricas,

volume do reservatório, topografia da planície de inundação, coeficientes de rugosidade do leito e brecha de ruptura da barragem. A topografia da planície de inundação, parâmetro de estudo do presente trabalho, pode ser obtida por levantamento topográfico realizado em campo ou via informações de satélites.

Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs), a depender da forma de obtenção, apresentam resoluções espaciais variando entre menor ou igual a 1 metro a 90 metros, como de diferenças significativas relativas a custos na obtenção destes dados (TSCHIEDEL, 2017). Bases topográficas obtidas via satélite podem ser encontradas gratuitamente, com precisão baixa ou média, ao passo que levantamentos topográficos possuem altos custos do serviço prestado, mas que resultam em bases de alta resolução.

A área em estudo se trata da barragem de Pindobaçu, localizada no município de Pindobaçu, no estado da Bahia e as bases topográficas escolhidas contemplam a área do vale de jusante do barramento, com extensão de 22 km. São utilizadas para comparação três bases topográficas distintas: Modelo Digital de Elevação SRTM, Modelo Digital de Elevação ALOS PALSAR e MDT gerado a partir de levantamento aerofotogramétrico.

As duas primeiras foram escolhidas devido a facilidade de obtenção sem custos associados e disponibilidade de pesquisas bibliográficas sobre o tema e a última, devido aos dados disponibilizados pela Companhia de Energia Hídrica e de Saneamento da Bahia provenientes da execução do serviço de campo de levantamento aerofotogramétrico à nível de Revisão Periódica de Segurança da barragem de Pindobaçu.

A proposta de estudo se fundamenta na utilização de bases topográficas obtidas por vias distintas, a serem inseridas como dado de entrada do modelo hidrodinâmico de simulação de ruptura hipotética de barragem associada a uma cheia de ruptura mais provável. Dois cenários foram simulados, definidos a partir da seleção das topografias mais aderentes entre si. Um cenário utilizando o MDT derivado de dados SRTM, enquanto o outro cenário, dados obtidos por meio de aerolevantamento da região a jusante do empreendimento.

Com isto, foi analisado o nível de detalhamento das manchas de inundação geradas na simulação, a fim de identificar a influência da resolução espacial da topografia da planície de inundação no resultado da modelagem hidráulica. O presente trabalho fornecerá informações de modo a auxiliar na escolha da base topográfica que propicie resultados adequados e satisfatórios de forma econômica, a nível de desenvolvimento do PAE.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Comparar os resultados de simulações associadas à ruptura hipotética da barragem geradas a partir de bases topográficas distintas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar as principais diferenças altimétricas relativas as bases topográficas em estudo para composição da topografia do modelo hidrodinâmico;
- Simular a ruptura hipotética de barragem, considerando as bases topográficas selecionadas, em cenário de ruptura mais provável;
- Determinar as principais diferenças nas características das cheias de ruptura obtidas utilizando bases topográficas distintas;
- Comparar as manchas de inundação geradas a partir da utilização de diferentes bases topográficas como dado de entrada das simulações de ruptura de barragem;
- Quantificar os pontos vulneráveis mapeados nas manchas de inundação resultantes das simulações em estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ROMPIMENTO DE BARRAGENS

Barragens são estruturas hidráulicas que têm associado a si riscos e podem envolver danos potenciais à perda de vidas humanas, bens materiais e ambientais na área de influência direta (ANA, 2016). Lara (2016) aponta que estes prejuízos financeiros e humanos possuem histórico relacionado a rompimento de barragens no mundo. No Brasil, especificamente, o rompimento das barragens de rejeito em Mariana/MG (Figura 1), no ano de 2015, e Brumadinho/MG, no ano de 2019, foram grandes desastres social, econômico e ambiental, que acarretaram perdas de centenas de vidas e danos que ainda podem ser observados e/ou desconhecidos.

Figura 1 - Desastre no vale de jusante causado após rompimento da barragem do Fundão, em Mariana (MG) no ano de 2015.



Fonte: Brasil (2020).

Ainda no Brasil, há registros de rompimento de barragens de acumulação de água, como o rompimento da barragem de Camará, no ano de 2004, que causou a morte de cinco pessoas e cerca de 3 mil desabrigadas em quatro cidades do estado do Pernambuco e a estrutura da UHE de Santo Antônio, no Amapá, que cedeu no ano de 2014 e causou a morte

de quatro operários (REDAÇÃO O SUL, 2019). Regionalmente, devido às fortes chuvas no Sul e Sudeste do Estado da Bahia no final do ano de 2021 e início de 2022, duas barragens de acumulação de água romperam: a barragem do Iguá, em Vitória da Conquista, e uma segunda, próxima ao município de Jussiape (O GLOBO, 2021).

Figura 2 - Inundação no vale de jusante após rompimento da barragem próxima ao município de Jussiape (BA).



Fonte: O Globo (2021).

Durante o evento de ruptura, o volume armazenado pelo barramento escoar para jusante e a gravidade das consequências na região atingida é dada pela quantidade e velocidade com que as infraestruturas são atingidas (FREAD, 1988 apud LOPES JUNIOR, 2020).

São dois os principais modos de acidentes associados a ruptura de barragem: ocorrendo por meio de *piping* (conhecido também como erosão regressiva) ou por galgamento. De acordo com ANA (2016), uma ruptura por *piping* dá-se por mecanismos estruturais ou por percolação (erosão interna da barragem, por exemplo), sem influência da precipitação, conhecido como cenário de ruptura em dia de sol e, uma ruptura por galgamento ocorre por mecanismo hidráulico. Em complementação, Mascarenhas (1990, apud WILLINGHOEFER, 2015) aponta que o rompimento por *piping* é resultante de falhas humanas, como erros nos procedimentos de operação e manutenção, enquanto o rompimento por galgamento é resultado de causas materiais.

A depender do tipo de material construtivo, estes apresentam vantagens e desvantagens no contexto da situação de rompimento, principalmente com relação a formação da brecha de ruptura. Uma brecha de ruptura é caracterizada, de acordo com ANA (2016), pela sua geometria, as suas dimensões e o tempo de ruptura. Estes parâmetros influenciam diretamente no hidrograma de ruptura da barragem. Segundo SINGH (20183, apud FREITAS, 2018) barragens de terra suportam esforços substanciais, porém com baixa resistência a cheias, levando ao recalque da estrutura e, conseqüentemente, favorecendo o fluxo interno. Ainda segundo o mesmo autor, as barragens em concreto, situação da barragem em estudo, suportam um evento de galgamento na condição de a fundação suportar o choque inicial.

Observa-se pela literatura que os rompimentos de barragem são acidentes complexos que acarretam perdas muitas vezes não mensuráveis financeiramente e que há inúmeras causas para que falhas ocorram. Blight (2010, apud ROCHA, 2015) aponta a instabilidade de taludes como a principal causa de ruptura de barragens, bem como falhas na fundação, falha estrutural, erosão, recalque, galgamento, dentre outras. Adicionalmente, a *Federal Emergency Management Agency – FEMA* (2013) aponta demais modos de falha de rupturas, conforme apresentado na Tabela 1.

Desta forma, o desenvolvimento de estudos voltados a análise de riscos de rompimento de barragens, estudos de rompimento de barragens, bem como estabelecimento de políticas e critérios de projeto, manutenção, operação e monitoramento destas estruturas são relevantes para fomentar a prevenção, as boas práticas de engenharia e minimizar a ocorrência de acidentes devido a falhas.

Tabela 1 - Modos de falhas típicos em barragens.

Modo de Falha	Exemplos de Falha
Hidrológica	Galgamento causado por: <ul style="list-style-type: none"> • Vertedor com capacidade inadequada de descarga; • Vertedor obstruído; • Perda de borda livre devido ao assentamento ou erosão do aterro; • Tensão estrutural dos componentes da barragem.
	Erosão na superfície causada por: <ul style="list-style-type: none"> • Alta velocidade do escoamento; • Ação de ondas.
Geológica	<i>Piping</i> e erosão interna causada por: <ul style="list-style-type: none"> • Rachaduras internas, fratura hidráulica ou assentamento diferencial; • Filtros inadequados; • Falha na tubulação de saída; • Entubamento através do aterro formado por raízes ou tocas de animais/insetos.
	Instabilidade de taludes e fraturamento hidráulico: <ul style="list-style-type: none"> • Carga excede a resistência ao deslizamento na base ou nas juntas da estrutura.
Estrutural	Barragem de concreto: falha de componentes estruturais críticos Barragem de aterro: ruptura da face de montante ou jusante
Sísmica	Terremotos/movimento do solo; também fundações liquefeitas ou materiais de aterro
Causas influenciadas pelo fator humano	Falha de operação: <ul style="list-style-type: none"> • Aumento repentino do nível do reservatório causando fluxo através de rachaduras transversais no aterro; • Incidentes incluindo falhas em comportas, interrupção de energia etc.
	Sabotagem: <ul style="list-style-type: none"> • Falha de operação proposital; • Impacto de objeto que remove parte da crista da barragem

Fonte: Adaptado de FEMA (2013).

2.2 POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

A legislação brasileira que objetiva garantir a observância dos padrões de segurança de barragens foi estabelecida pela Lei 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais (BRASIL, 2010), sendo alterada em 30 de setembro de 2020 pela Lei 14.066.

A PNSB, de acordo com Brasil (2010) é aplicada para barragens que possuem as seguintes características:

I – altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros; II – capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos; III – reservatório que

contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; IV – categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 7º desta lei; V – categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no art. 7º desta lei.

De modo a cumprir com seus objetivos voltados a prevenção de acidades ou desastre e regulamentação de ações de segurança, a Lei 12.334/2010 definiu como principais instrumentos o sistema de classificação por categoria de risco (CRI) e dano potencial associado (DPA), o Plano de Segurança de Barragem (PSB) que inclui o Plano de Ação de Emergência (PAE) e o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) (BRASIL, 2010).

O PAE, como o próprio nome sugere, é um documento de elaboração obrigatória para todas as barragens classificadas como de médio e alto dano potencial associado ou de alto risco e que deve apresentar um conteúdo mínimo, estabelecendo as ações a serem adotadas em situação de emergência e procedimentos como de identificação, notificação, correção e prevenção, conforme destaca Brasil (2010). Dentre os conteúdos apresentados, há a delimitação da Zona de Autossalvamento (ZAS) e da Zona de Segurança Secundária (ZSS), definidas a partir da mancha de inundação geradas por meio de modelagem hidráulica.

2.3 MODELAGEM HIDRÁULICA

Em consonância com o atendimento da legislação e visando as boas práticas de engenharia, de modo a minimizar a ocorrência de acidades devido a falhas, Cunge, Holly e Verwey (1980, apud VEROL, MIGUEZ e MASCARENHAS, 2012) apontam que os modelos matemáticos se tornam ferramentas de planejamento, pois permitem a simulação de uma ruptura hipotética de barragem e, conseqüentemente, a propagação da onda gerada. Tucci (2005, apud NEVES, 2019) ainda cita que os modelos matemáticos, também chamados de digitais, buscam representar a natureza do sistema por meio de equações matemáticas.

Voltado aos estudos de escoamento em rios, os modelos comumente utilizados são os modelos hidráulicos, que utilizam as equações de Saint-Venant na forma completa (modelos hidrodinâmicos) ou simplificada (modelo de difusão) (COUTINHO, 2015). O autor ainda aponta que dentre estes dois tipos de modelagem, o hidrodinâmico possui vantagens com relação ao de difusão, apresentando maior precisão e melhor representação física do escoamento, por possibilitar modificações no sistema em estudo.

Em uma modelagem hidrodinâmica, o objetivo é simular o movimento da onda de cheia ao longo do vale a jusante da barragem, de modo a se obter informações fundamentais em qualquer ponto de interesse da área de inundação, como: tempo de chegada da onda de ruptura, profundidade e velocidade da onda, dentre outras (MORRIS, 2000 apud LAURIANO, 2009).

Para isso, as simulações podem ser realizadas em escoamento permanente ou não permanente (transitório). Enquanto no escoamento permanente as variações de vazão, área da seção transversal e declividade tendem a ser desprezíveis ao longo do tempo, o escoamento não permanente leva em conta a variação no tempo e no espaço das principais variáveis presentes no escoamento de um rio (NASCIMENTO, 2017). Tem-se o escoamento não permanente como o mais comumente encontrado nos escoamentos em rios e canais, conforme cita o mesmo autor.

Ao simular escoamento de rios em planícies de inundação, os modelos hidrodinâmicos podem ser classificados como unidimensionais (1D) e bidimensionais (2D) ou mesmo modelos que integram 1D/2D.

Tratando-se de empregabilidade, os modelos 1D são mais comumente empregados. De acordo com Coutinho (2015), na modelagem 1D a planície de inundação é considerada como áreas de armazenamento, em que não há fluxo nessa região e para que a planície seja representada, seções transversais são incluídas no modelo, de modo a realizar interpolação linear para definição da profundidade.

Os modelos hidráulicos 2D, ainda segundo o autor, são empregados em estudos de ruptura de barragens e projetos de estruturas hidráulicas em que há emprego de diferentes tipos de escoamento, variações bruscas de velocidade e profundidade e mudanças na direção de fluxo, por exemplo. Complementarmente, Morris e Galland (2000, apud LAURIANO, 2009) sugere que este tipo de modelo deve ser aplicado para pequenas áreas de interesse, por requerer uma melhor representação da topografia local, aumentando desta forma, o tempo computacional e a capacidade de memória para as simulações.

Segundo Lauriano (2009), inúmeros são os modelos disponíveis para rupturas de barragens, desde modelos gratuitos até modelos que exigem aquisição de licença. Atualmente, conforme aponta o mesmo autor, o HEC-RAS vem sendo largamente empregado em casos práticos por ser um *software* livre, por permitir a simulação e modelagem em escoamento permanente ou não permanente e por considerar, em sua base teórica, a resolução pelas equações de Saint-Venant.

2.3.1 Modelo Hidrodinâmico HEC-RAS

O HEC-RAS se trata de um sistema de análise de rios (*River Analysis System - RAS*) desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center (HEC)*, divisão do *Institute for Water Resources* do *U.S. Army Corps of Engineers*.

De acordo com USACE (2021), o *software* livre permite que sejam realizadas simulações hidráulicas do rio de fluxo constante unidimensional, simulações hidráulicas de rios de fluxo instável uni ou bidimensional, modelagem de transporte de sedimentos de fluxo *quasi* instável e instável e modelagem de qualidade de água (transporte de nutrientes).

Lauriano (2009) aponta que as equações que governam o modelo hidrodinâmico HEC-RAS são as equações unidimensionais originais de fluxos não-permanente em leitos fluviais, conhecidas como equações de Saint-Venant.

Tschiedel (2017) apresenta as equações utilizadas no modelo bidimensional dado pelas equações de Saint-Venant, composto da equação de massa (Equação 01) e da equação da conservação de momento nos eixos x e y (Equação 02 e Equação 03).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} \quad (01)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (02)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (03)$$

Em que,

u e v são as velocidades nas direções cartesianas (m/s);

t é o tempo (s);

q são as contribuições de fluxo;

g é a aceleração da gravidade (m/s²);

H é a elevação da superfície d'água (m);

h a profundidade (m);

v_t é o coeficiente de viscosidade turbulenta;

c_f é o coeficiente de fricção de fundo;

f é o parâmetro de Coriolis.

A solução com equações completas de Saint-Venant bidimensional, assim como no modelo de Onda Difusa bidimensional, é dada considerando o método de discretização de um

algoritmo de volumes finitos (LAURIANO, 2009). Este método de solução de equação de fluxo instável em modelos bidimensionais, de acordo com USACE (2021), permite passos de tempo maiores do que em métodos explícitos e resolve regimes subcríticos, supercríticos, além de fornecer maior estabilidade e robustez ao modelo, se comparado a métodos tradicionais de diferenças finitas e elementos finitos.

Considerando a simulação do escoamento na planície de inundação, há três tipos de modelo de inundação: tipo bacia de amortecimento, seção composta e células de armazenamento. Destes, o modelo compatível com um fluxo bidimensional é o modelo de inundação do tipo células de armazenamento. Trata-se de um modelo que simula a vazão do rio em uma bacia de drenagem, delimitada por uma malha computacional, considerando como base de cálculo a topografia e o uso e cobertura do solo (COUTINHO, 2015).

Ainda segundo o autor, neste tipo de modelo ocorre uma troca de vazão entre as células da planície de inundação calculada a partir da equação de Manning (Equação 04), baseado em raster, com controle de fluxo pelos gradientes de pressão, atrito e de declividade da linha d'água.

Paz, Collischonn e Tucci (2010) citam que este tipo de modelo apresenta como vantagem a melhoria na representação da propagação da inundação, pois proporciona trocas de água entre células vizinhas, simulando desta forma, a inundação se propagando de forma gradual no espaço e escoando por múltiplos caminhos preferenciais conforme a topografia representada por meio de Modelos Digitais de Elevação (MDE).

A equação que expressa a variação do volume ao longo do tempo é apresentada na Equação 05 e a Figura 3 apresenta o comportamento da discretização por células de armazenamento na planície de inundação.

$$Q_i = \pm \frac{h_{fluxo}^{5/3}}{n} \left(\frac{|h_1 - h_2|}{\Delta x} \right)^{1/2} \cdot \Delta y \quad \text{Equação 04}$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_{topo} + Q_{bai} + Q_{esq} + Q_{dir} + Q_{cp} + Q_{vert} + Q_{solo} \quad \text{Equação 05}$$

Em que,

Q_i é a vazão de troca entre duas células, ou na direção x ou y;

h_{fluxo} é a profundidade disponível para escoamento;

n é o coeficiente de Manning;

Δx e Δy são os espaçamentos entre as células nas direções x e y, respectivamente;

h_1 e h_2 são as lâminas d'água nas células 1 e 2, respectivamente;

ΔV é a variação de volume no intervalo de tempo Δt ;

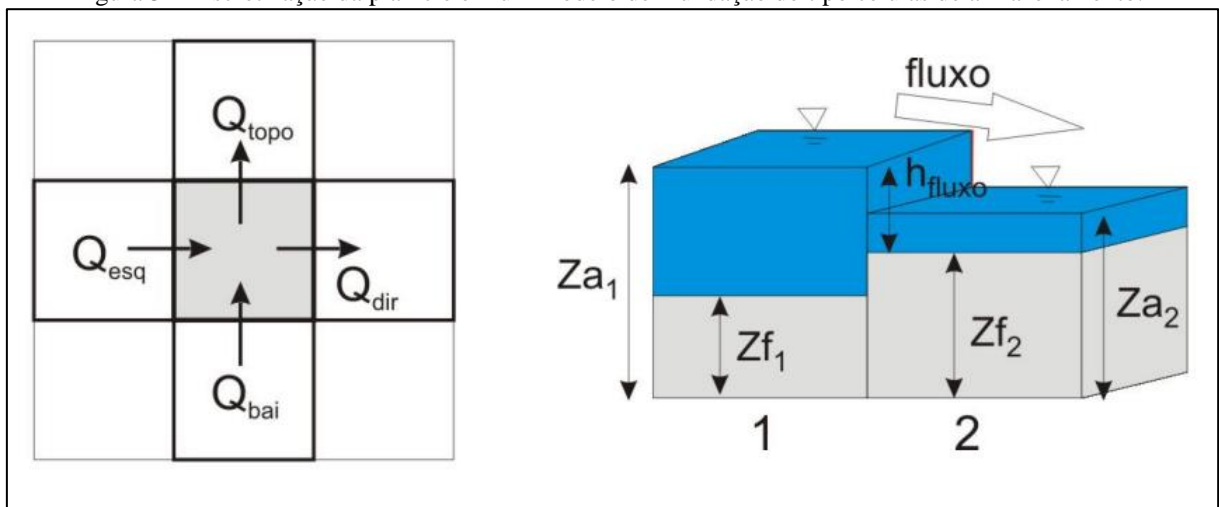
Q_{topo} , Q_{bai} , Q_{esq} e Q_{dir} são as vazões trocadas entre as células vizinhas;

Q_{cp} é a vazão trocada com o canal principal;

Q_{vert} é o balanço de entradas e saídas verticais;

Q_{solo} é o fluxo de água para completar o solo, considerando este como um reservatório.

Figura 3 - Discretização da planície em um modelo de inundação do tipo células de armazenamento.



Fonte: Adaptado de Paz, Collischonn e Tucci (2010).

2.4 BASES TOPOGRÁFICAS

Conforme citado no item 2.3.1 Modelo Hidrodinâmico HEC-RAS, Paz, Collischonn e Tucci (2010) destacam que a modelagem de inundação por células de armazenamento está associada, substancialmente, a uma topografia em formato de dados raster (modelo matricial). Desta forma, para a simulação de ruptura hipotética de barragem, o emprego de base topográfica do vale de jusante como dado de entrada é fundamental.

Souza (2006) expõe a carência de consciência cartográfica no Brasil, em que há ausência de um mapeamento em escala adequada, no geral. Há um mapeamento sistemático incompleto na escala 1:25.000 ou menor, e a maioria dos mapas encontram-se desatualizados. Porém, o avanço da tecnologia tem propiciado formas diversas de geração e obtenção de dados para geração de produtos cartográfico, como a partir de sensoriamento remoto ou por processos fotogramétricos.

Complementarmente, focado na topografia de vale de jusante, esta pode ser obtida a partir de informações via topografia *in situ* até informações via satélite, cada qual apresentando vantagens e desvantagens, principalmente com relação a precisão e investimentos. O Quadro 1 apresenta uma análise comparativa entre metodologias de obtenção de dados altimétricos para estudos de ruptura (TSCHIEDEL, 2017).

Quadro 1 - Comparação entre metodologias de levantamento topográfico para estudos de ruptura

Escopo		Levantamento Topográfico			
		<i>In situ</i>	LiDAR	Aerofotogrametria	Satélites
Custo	Inexistente/Baixo				x
	Médio			x	x
	Alto	x	x	x	x
Mapeamento	Áreas Pequenas	x	x	x	x
	Áreas Médias		x	x	x
	Áreas Grandes			x	x
Exatidão	Pequena			x	x
	Média		x	x	x
	Alta	x	x		
Tempo de Obtenção	Rápido				x
	Médio		x	x	
	Demorado	x	x	x	

Fonte: Tschiedel (2017).

Ainda, tratando-se dos Modelos Digitais de Elevação (MDE), Modelos Digitais de Terreno (MDT) e Modelos Digitais de Superfície (MDS), estes são modelos matemáticos tridimensionais gerados, de acordo com Sampaio e Brandalize (2018), a partir de informações altimétricas (relevo) da superfície terrestre ou marinha, seja por meio de imagens fotogramétricas, radares interferométricos ou sistema de varredura a laser.

O MDE é o nome genérico atribuído para o modelo, sendo subdividido entre MDT e MDS. A diferença crucial entre os modelos desta subdivisão está na consideração de informações altimétricas relativas à cotas de árvores, prédios e pontes associadas ao MDS, enquanto no MDT as informações associadas são relativas apenas ao solo, conforme ilustrado na Figura 4 (TSCHIEDEL, 2017).

Figura 4 - Diferença entre MDS e MDT



Fonte: Tschiedel (2017).

Há múltiplos métodos para obtenção de modelos digitais de elevação, como os métodos convencionais por meio de levantamento topográfico em campo, levantamento LiDAR (*Light Detection And Ranging*), por meio de dados orbitais, levantamento topográfico por aerofotogrametria, entre outros. Com destaque para o levantamento realizado por sensoriamento remoto e aerofotogrametria, focos do presente estudo.

2.4.1 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto, ou imageamento por radar, é a prática de obtenção de imagens da superfície da terra com a utilização de satélites. Desde a década de 1980, de acordo com levantamento de Tschiedel (2017), é possível a obtenção de informações altimétricas por este meio, porém com resolução espacial de 900 m. Atualmente, encontram-se satélites que propiciam a geração de modelos digitais de elevação com cerca de 0,50 m de resolução espacial (VICRON, 2017 apud TCHIEDEL, 2017). Souza (2006) aponta que o princípio do funcionamento dos radares baseia-se em medir o tempo para uma radiação eletromagnética emitida pelo próprio radar atingir o objeto e retornar.

O método de sensoriamento remoto pode ser subdividido em dois sistemas: ativos, com a aplicação da Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSAR) e passivo, imageamento por pareamento estereoscópico. Enquanto o sistema ativo emite e capta radiação eletromagnética, o sistema passivo depende da recepção da luz solar refletida na Terra pelo sensor (TSCHIEDEL, 2017).

Especificamente, a técnica InSAR se baseia na emissão de radiação eletromagnética e captam as imagens de um mesmo lugar por antenas em diferentes localizações, gerando

informações de ângulos diferentes (PARADELLA et al., 2015, TSCHIEDEL, 2017). O imageamento SRTM e ALOS PALSAR gera imagens por esta técnica.

2.4.1.1 SRTM

Os modelos digitais de elevação *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foram geradas na missão espacial de mesmo nome, organizada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em fevereiro de 2000. Conforme Estados Unidos (2016), o objetivo desta missão foi elaborar modelos digitais de elevação em uma escala quase global (de 56° S a 60° N), gerando um banco de dados digitais gratuito e de alta resolução.

Foi utilizada na missão SRTM a técnica InSAR que, de acordo com Santiago (2017) possui maior acurácia em relação à técnica da estereoscopia, em alguns casos, devido a ausência de influência da condição meteorológica para obtenção das imagens.

Inicialmente os dados processados pela NASA foram disponibilizados com uma resolução espacial de 90 m e, a partir do ano de 2014, estes foram disponibilizados com resolução espacial de 30 m. Santos (2005 apud SOUZA, 2006) disserta que os dados foram processados por continente, iniciando pela América do Norte, com espaçamento de um segundo de arco, representando 30 m de resolução. Para as demais regiões o espaçamento inicial era de 3 arcos de segundo, representando 90 m de resolução. O laboratório *Jet Propulsion Laboratory* reprocessou os dados gerando MDEs de aproximadamente 30 m de resolução espacial para as demais regiões.

2.4.1.2 ALOS PALSAR

Os modelos digitais de elevação ALOS PALSAR foram obtidos pelo sensor PALSAR, sistema componente do satélite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS-1), missão organizada pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) e *Japan Resources Observation System Organization* (JAROS) (ALVES, 2015). A missão teve como objetivo realizar o imageamento de alta resolução em escala continental, com consistência espacial e temporal (JAXA, 2013 apud ALVES, 2015).

Ainda segundo o autor, o sensor PALSAR, que utiliza a técnica InSAR, possui resolução espacial variando entre 10 m e 100 m, com ângulo de incidência médio de 34,3°. As imagens do banco de dados do *Alaska Satellite Facility* (ASF) são disponibilizadas com resolução espacial de 12,5 m.

Destaca-se que o MDE ALOS PALSAR se trata de uma reamostragem do MDE SRTM para 12,5 m, utilizando o sensor PALSAR para realizar as devidas correções no terreno (ASF ALASKA, 2015).

2.4.2 Levantamento Topográfico por Aerofotogrametria

O levantamento topográfico por aerofotogrametria se trata de um levantamento de campo para obtenção de modelos digitais de superfície de alta acurácia, a depender do sensor utilizado, por meio de fotografias aéreas. Atualmente, com a popularização da tecnologia de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) a obtenção de imageamento por meio deste método foi facilitada (TSCHIEDEL, 2017).

De acordo com Rabelo (2019), a resolução dos modelos gerados a partir de levantamento por aerofotogrametria depende da altura de voo e das características da câmera utilizada para obtenção das imagens. Como exemplo, relacionando altura e resolução espacial, tem-se que quanto maior a altura do voo, maior será a área do terreno abrangida e menor será a resolução espacial. Conforme o mesmo autor, as imagens são expressas em densidade de nuvem de pontos e em *Ground Sample Distance* (GSD), que conceitualmente se refere ao tamanho da área amostrada no terreno para cada pixel no modelo digital de elevação.

Para proporcionar a estimativa de precisão e acurácia dos resultados e possibilitar ajustes, é comum o uso de pontos de controle terrestres georreferenciados e pré-estabelecidos na área de levantamento, que posteriormente serão identificados nas imagens captadas (RABELO, 2019).

Ao se utilizar este tipo de metodologia para obtenção de bases topográficas, tem-se como vantagens um mapeamento rápido e coleta de grande número de informações mais detalhadas, com melhores resoluções espaciais e temporais (SANTIAGO, 2017). Porém, Tschiedel (2017) relata problemas quando utilizado para levantamento de cursos hídricos, pela modificação constante na configuração da superfície da lâmina d'água.

Tratando-se de um levantamento de campo, Tschiedel (2017) ressalta as diferenças básicas entre a topografia por métodos convencionais e por aerofotogrametria, como precisão, cobertura vegetal, tempo de processamento de dados e capacidade de mapear grandes áreas. Enquanto a precisão do levantamento por aerofotogrametria é centimétrico, a obtenção dos dados para uma grande área é rápida e o produto gerado é um MDS, os métodos convencionais proporcionam precisão milimétrica em uma mobilização dispendiosa para grandes áreas, gerando como produto um MDT. Os dados levantados por aerofotogrametria

devem necessariamente passar por processamento em *softwares* específicos para filtragem, por exemplo, da cobertura vegetal e assim, resultar em um MDT.

Voltados a hidráulica e hidrologia, este método de obtenção de imagens é satisfatório por gerar modelos digitais de elevação com resolução espacial centimétrica. Tschiedel (2017) aponta que esta é uma tecnologia consolidada e estável, porém sofre influência direta das condições meteorológicas para obtenção das imagens de satélite.

3 METODOLOGIA

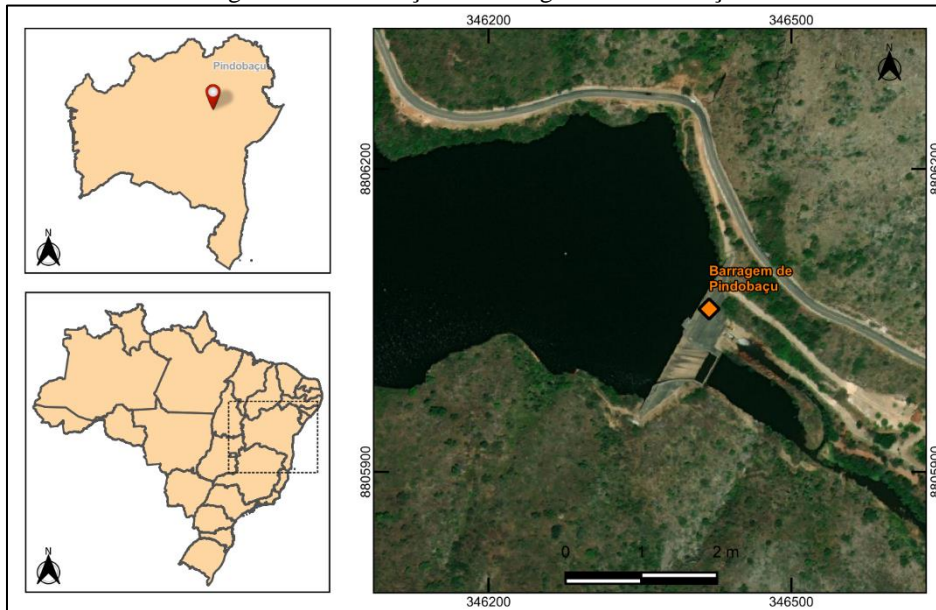
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O empreendimento em estudo trata-se de um barramento sob responsabilidade da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia (CERB), localizado no município de Pindobaçu, no Estado da Bahia. Para o estudo deste empreendimento, solicitou-se à CERB a autorização para utilização dos dados técnicos de projeto e de operação e manutenção desta barragem, bem como o levantamento topográfico da região a jusante do empreendimento, realizado em outubro de 2021 para fins da elaboração da Revisão Periódica de Segurança de Barragens (RPSB) e Plano de Ação de Emergência (PAE) da barragem Pindobaçu.

A partir da autorização do uso de dados e disponibilização do levantamento topográfico por parte da CERB, pode-se caracterizar a área de estudo, descrevendo o empreendimento.

A barragem de Pindobaçu está instalada no rio Itapicuru-Açu, nas coordenadas UTM 8.807.814,89 N, 346.344,86 E, Zona 24S, pertencente a bacia hidrográfica do rio Itapicuru, em área pertencente aos municípios de Pindobaçu e Saúde. Esta barragem é constituída de Concreto Compactado a Rolo (CCR), com altura do maciço de 44,00 m, comprimento da crista de 191,00 m e 5,00 m de largura. A crista está situada na cota 471,50 m. De acordo com o Brasil (2021), a classificação deste empreendimento quanto a Categoria de Risco e Dano Potencial Associado é, respectivamente, baixo e alto. A Figura 5 apresenta a localização do empreendimento.

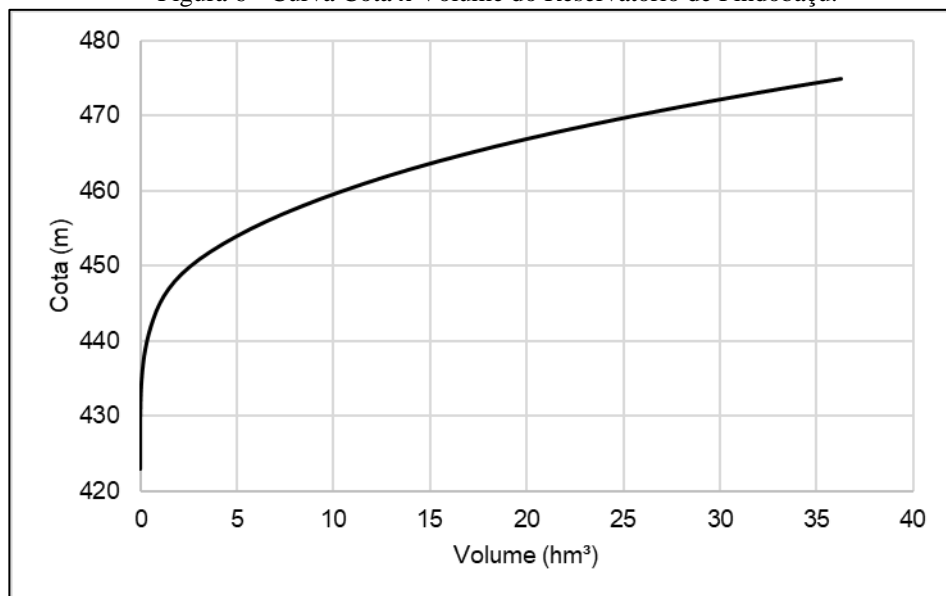
Figura 5 - Localização da barragem de Pindobaçu.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O reservatório tem seu uso destinado para abastecimento de água, regularização de vazões e irrigação, possuindo capacidade de 16,80 hm³ e uma área inundada de 232,00 ha. Os níveis de projeto, de acordo com o empreendedor, são dados pelo Nível Mínimo Operacional na cota 440,00 m, Nível Máximo Normal na cota 465,00 m (CERB, 2010). A curva cota x volume do reservatório de Pindobaçu está apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Curva Cota x Volume do Reservatório de Pindobaçu.



Fonte: CERB (2010).

Como estrutura extravasora, a barragem possui um vertedor central de soleira livre do tipo Creager, dimensionado com 60,00 m de largura e crista na cota 465,00 m. A

segurança contra cheias é garantida por esta estrutura. Para dissipação de energia, há uma estrutura do tipo salto de esqui e uma pré-fossa escavada em quartzito, à jusante. A Figura 7 apresenta uma vista aérea da estrutura extravasora da barragem de Pindobaçu.

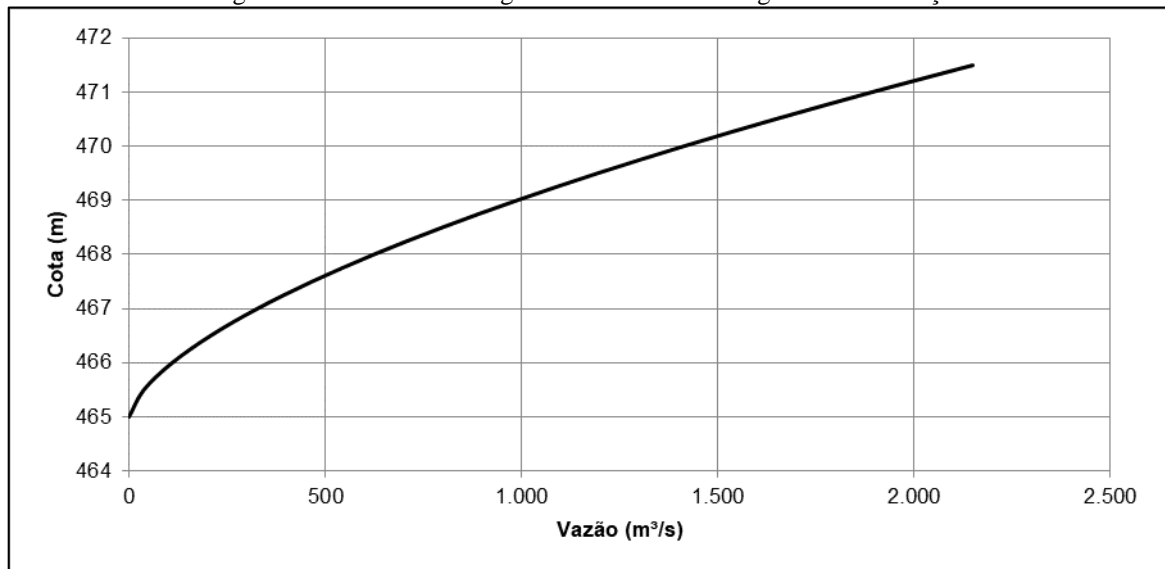
Figura 7 - Vista Aérea da Estrutura Extravasora da Barragem de Pindobaçu.



Fonte: Consórcio Nova Engevix - RK (2021).

O vertedor tipo Creager foi projetado para um tempo de recorrência de 1.000 anos e uma vazão de 1.099,19 m³/s. De acordo com o Projeto Executivo da barragem, o vertedor atende, em caso excepcional, a um tempo de recorrência de 10.000 anos, escoando uma vazão de 1.880,69 m³/s (HIGESA, 1999 apud Consórcio Nova Engevix - RK, 2021), com garantia da borda livre mínima para barragens de concreto de 0,50 m recomendada por ANA (2016). A curva de descarga do vertedor tipo Creager está apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Curva de Descarga do Vertedor da Barragem de Pindobaçu.



Fonte: CERB (2010).

Compondo as estruturas do barramento, a barragem de Pindobaçu possui uma galeria de tubulações com extensão de 62 m, em que há duas tubulações: uma para captação d'água (DN 700) e uma segunda para irrigação, restituição do rio e descarga de fundo (DN 1.500). Na extremidade da tubulação do descarregador de fundo há duas válvulas dispersoras (DN 500).

Na planície de inundação a jusante, foram identificadas duas estruturas hidráulicas do tipo ponte. Foi realizado o levantamento topográfico cadastral destas pontes à nível dos serviços de campo para a RPSB da barragem de Pindobaçu. O Quadro 2 apresenta as coordenadas em que as pontes estão localizadas.

Figura 9 - Levantamento Topográfico Cadastral - Ponte 01.



Fonte: Consórcio Nova Engevix - RK (2021).

Figura 10 - Levantamento Topográfico Cadastral - Ponte 02.



Fonte: Consórcio Nova Engevix - RK (2021).

Quadro 2 - Coordenadas das estruturas levantadas.

Estrutura	Coordenada N (UTM)	Coordenada E (UTM)
Ponte 1	8.805.475,63	349.018,76
Ponte 2	8.803.883,98	357.248,73

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2 ESTUDO HIDROLÓGICO

O estudo hidrológico de máximas da barragem de Pindobaçu foi atualizado a nível da Revisão Periódica de Segurança de Barragens pelo Consórcio Nova Engevix – RK, no ano de 2021, e os resultados provenientes desta atualização foram utilizados no presente trabalho.

Para a simulação, utilizou-se a vazão máxima referente ao tempo de recorrência de 100 anos, de modo a realizar a simulação de um cenário de ruptura mais provável. Atribuiu-se este valor de vazão pois, conforme apontado em ANA (2016), no cenário de ruptura mais provável, pode-se optar pela cheia associada a um tempo de recorrência menor (100 anos, por exemplo) em um cenário de ruptura em dia de sol.

Como metodologia aplicada na atualização dos estudos hidrológicos, adotou-se o método de chuva-vazão, pela disponibilidade de dados pluviométricos. Foram utilizados os registros de precipitação de três estações pluviométricas listadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Estações Pluviométricas utilizadas na atualização dos estudos.

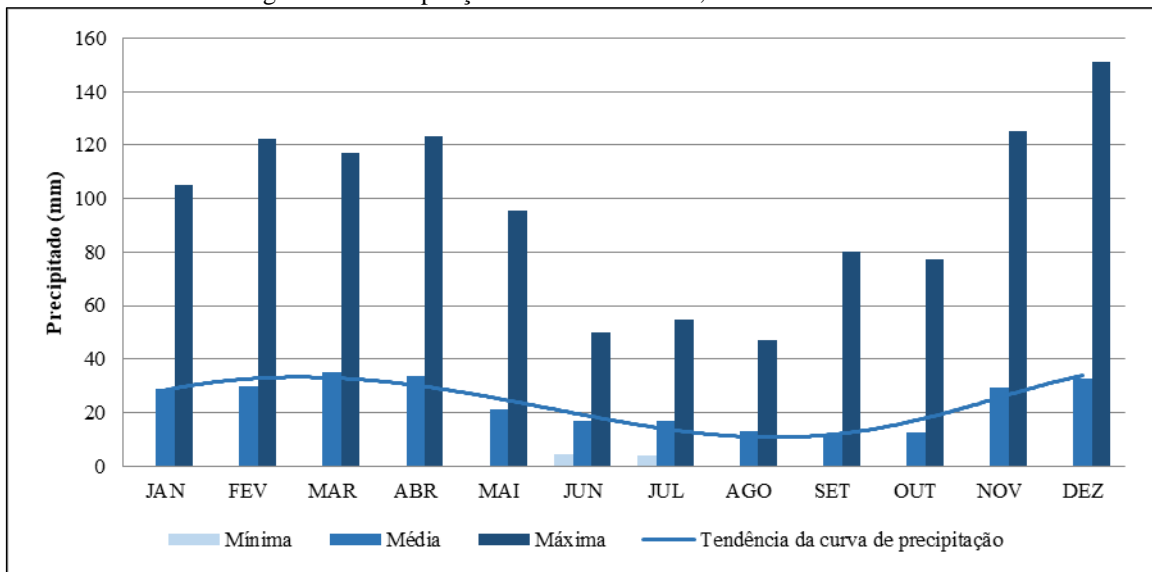
Código	Estação	Município	Operadora	Latitude	Longitude
1040010	Pindobaçu-dnocs	Pindobaçu	DNOCS	-107,33	-40,35
1040019	Saúde	Saúde	DNOCS	-109,33	-40,40
1040025	Pindobaçu-cprm	Pindobaçu	CPRM	-108,02	-40,38

Fonte: Consórcio Nova Engevix - RK (2021).

Para o preenchimento de falhas das séries de precipitação, utilizou-se o método do Vetor Regional, desenvolvido por Hiez (1977, apud Consórcio Nova Engevix - RK, 2021). Desta forma, a aplicação do método a extensão da série, bem como complementar as falhas existentes. Após o preenchimento, analisou-se o comportamento da precipitação por meio da Figura 11. Observa-se que há uma regularidade nas precipitações, com período chuvoso definido entre os meses de novembro a abril.

Realizou-se um ajuste estatístico utilizando diferentes distribuições para realizar a análise de frequência dos eventos. A distribuição escolhida, que melhor se ajustou a amostra, foi a de Gumbel. A partir da aplicação da distribuição, foram obtidas as precipitações máximas diárias.

Figura 11 - Precipitações mensais mínimas, médias e máximas.



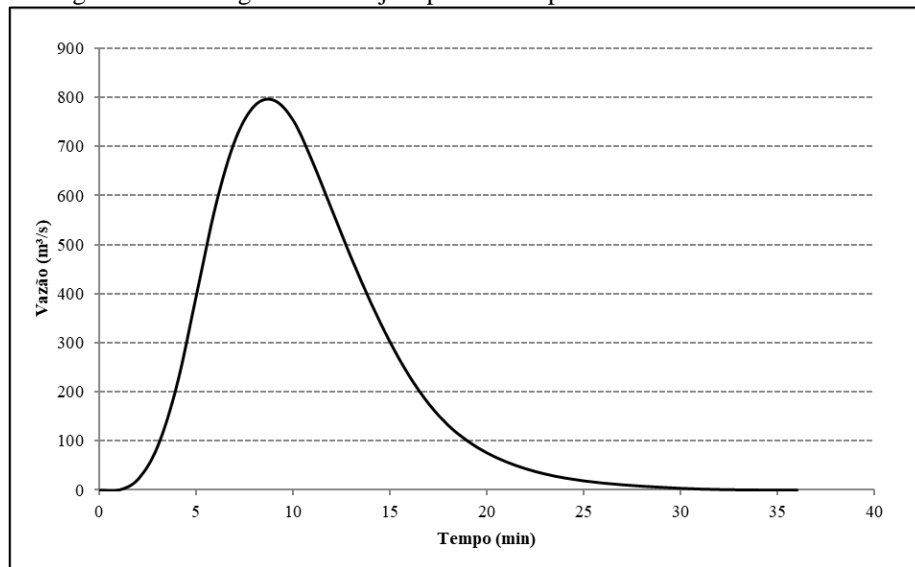
Fonte: Consórcio Nova Engevix - RK (2021).

A bacia de contribuição direta da barragem de Pindobaçu possui uma área de drenagem de 650 km² e um tempo de concentração de 482 min (8,02 h), calculado pela fórmula de Kirpich (1940, apud Consórcio Nova Engevix – RK, 2021). Com base no tempo de concentração inferior à 24 h, adotou-se o método de Isozonas para determinação da altura da precipitação.

Para a atualização do hietograma de projeto, foi utilizado o método de Huff (1967, apud Consórcio Nova Engevix – RK, 2021) aplicados ao 1º quartil para a obtenção do percentual de chuva acumulada total por intervalo de tempo. A precipitação máxima para a duração de 9 h (tempo imediatamente superior ao tempo de concentração da bacia) obtida foi de 101,45 mm para o tempo de recorrência de 100 anos.

O hidrograma de projeto foi obtido no *software* HEC-HMS pelo modelo chuva-vazão, por meio do método do hidrograma unitário, desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS), considerando, por simplificação, uma bacia única com CN de 88. O hidrograma de projeto para o tempo de recorrência de 100 anos, utilizado como dado de entrada no modelo hidrodinâmico, está apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Hidrograma de Projeto para o Tempo de Recorrência de 100 anos.



Fonte: Consórcio Nova Engevix - RK (2021).

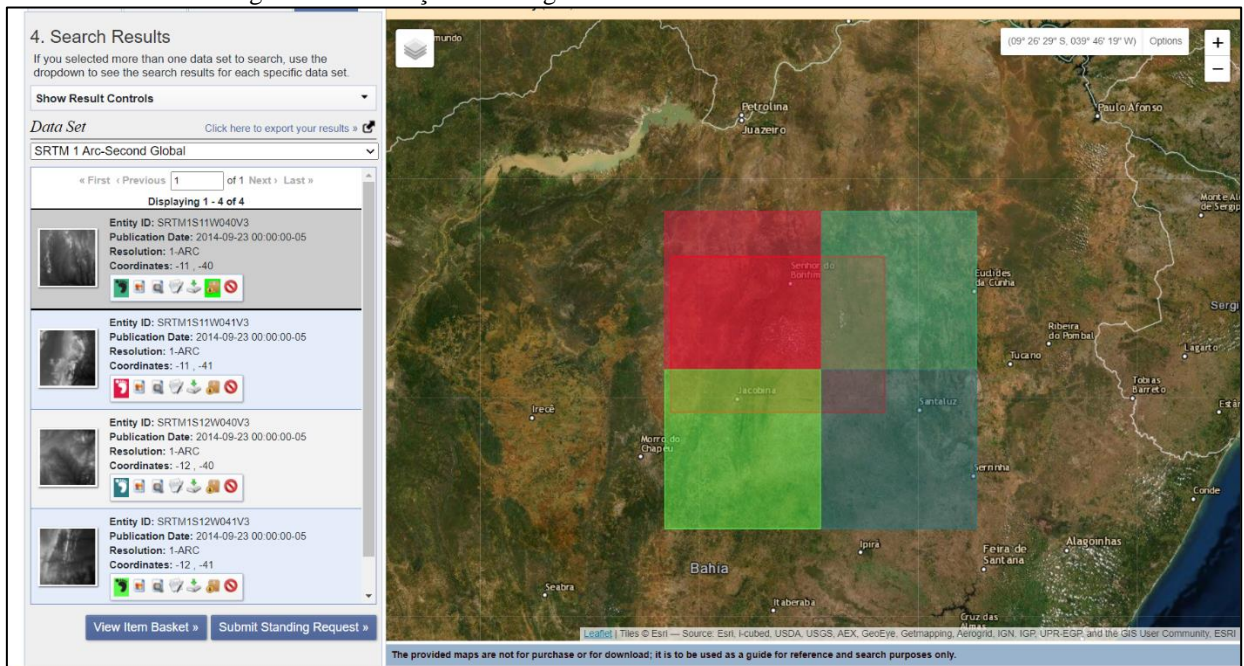
3.3 BASES TOPOGRÁFICAS

As bases topográficas utilizadas no estudo são o objeto diferencial para a análise dos resultados. Desta forma, foram utilizadas três bases distintas da área a jusante à barragem: MDE SRTM, MDE Alos Palsar e MDT gerado a partir de levantamento aerofotogramétrica e topográfico.

3.3.1 Modelo Digital de Elevação: SRTM

As imagens SRTM foram adquiridas por meio do *download* do banco de dados do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) disponível em <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Localizou-se na imagem de satélite o empreendimento em estudo e selecionou-se, por meio de uma poligonal, a região de interesse, conforme a Figura 13. Foram obtidas 04 cartas com resolução espacial 30 m x 30 m, Sistema de Referência Geográfico DATUM WGS84. Estas imagens foram processadas no *software* QGIS versão 3.16.9 e reprojetaadas para o Sistema de Referências SIRGAS2000, UTM Fuso 24 S. Realizada a reprojeção, uniu-se as imagens em um único raster. Adotou-se para este raster a nomenclatura MDE_SRTM.

Figura 13 - Obtenção das imagens SRTM no banco de dados do USGS.



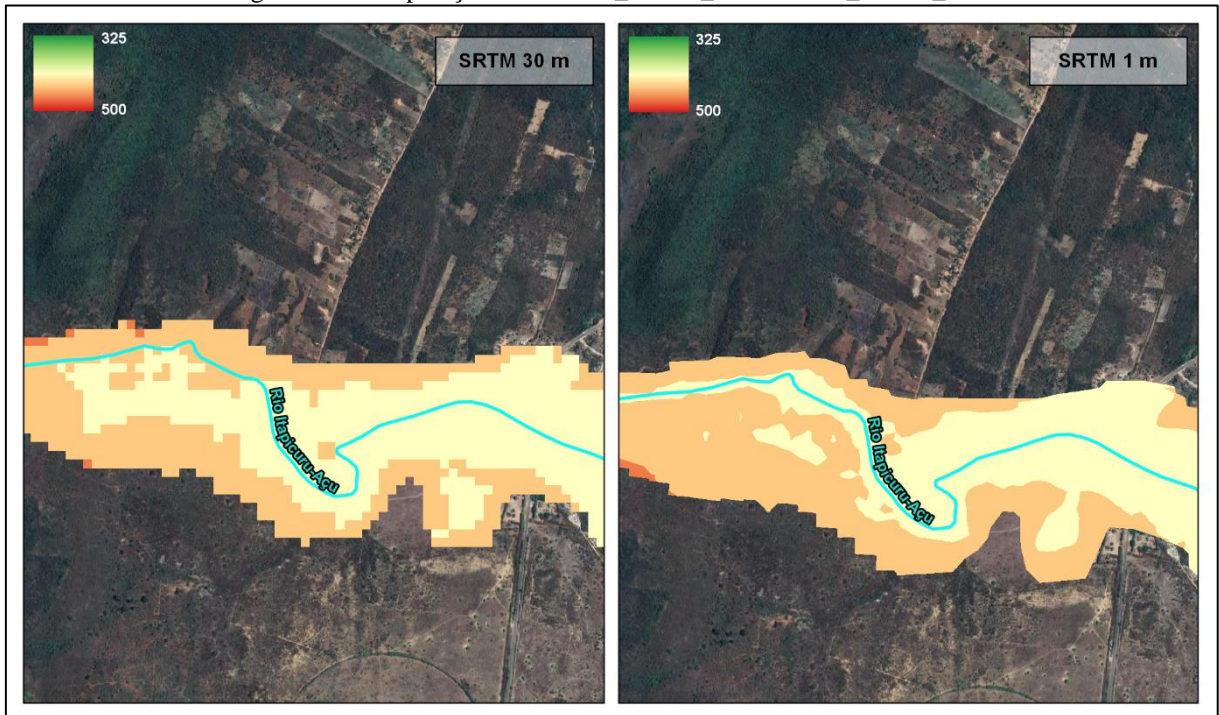
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

De modo a proporcionar celeridade no processamento dos dados, o MDE_SRTM_30m gerado foi recortado utilizando a ferramenta do QGIS *Clip raster by mask layer*. As cartas SRTM em seu formato bruto, possuem depressões (ou buracos) que podem ser reconhecidas como erro durante a modelagem hidrológica. De modo a preencher as depressões existentes e minimizar os erros, aplicou-se a ferramenta do QGIS *Fill Sink*, mantendo a declividade mínima padrão do sistema de 0,01 graus.

Para ser possível a comparação entre mesmas resoluções de bases, o MDE_SRTM_30m com resolução de 30 m foi interpolado, extraindo-se curvas de níveis com espaçamento de 1 m utilizando a ferramenta do QGIS *Contour* e gerando um raster com resolução de 1 m por meio da utilização da ferramenta *Tin Interpolation*, de acordo com a Figura 14. Adotou-se para este raster a nomenclatura MDE_SRTM_1m.

Para a simulação, foi adicionado ao terreno uma calha do rio fictícia, de modo a representar este no modelo. Como não houve execução de levantamento batimétrico no vale de jusante, a geometria estimada da calha do rio foi obtida por dados secundários, para direcionamento inicial do fluxo de água. Desta forma, obteve-se pela imagem de satélite uma largura da calha média de 20 m e, com as ferramentas de modificação do RAS *Mapper*, módulo do próprio HEC-RAS, e o dado vetorial do rio principal, com a aplicação da declividade do rio principal obtida no levantamento aerofotogramétrico de 0,00258 m e profundidade estimada de 3 m, a calha do rio foi adicionada.

Figura 14 - Comparação entre MDE_SRTM_30m e MDE_SRTM_1m.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

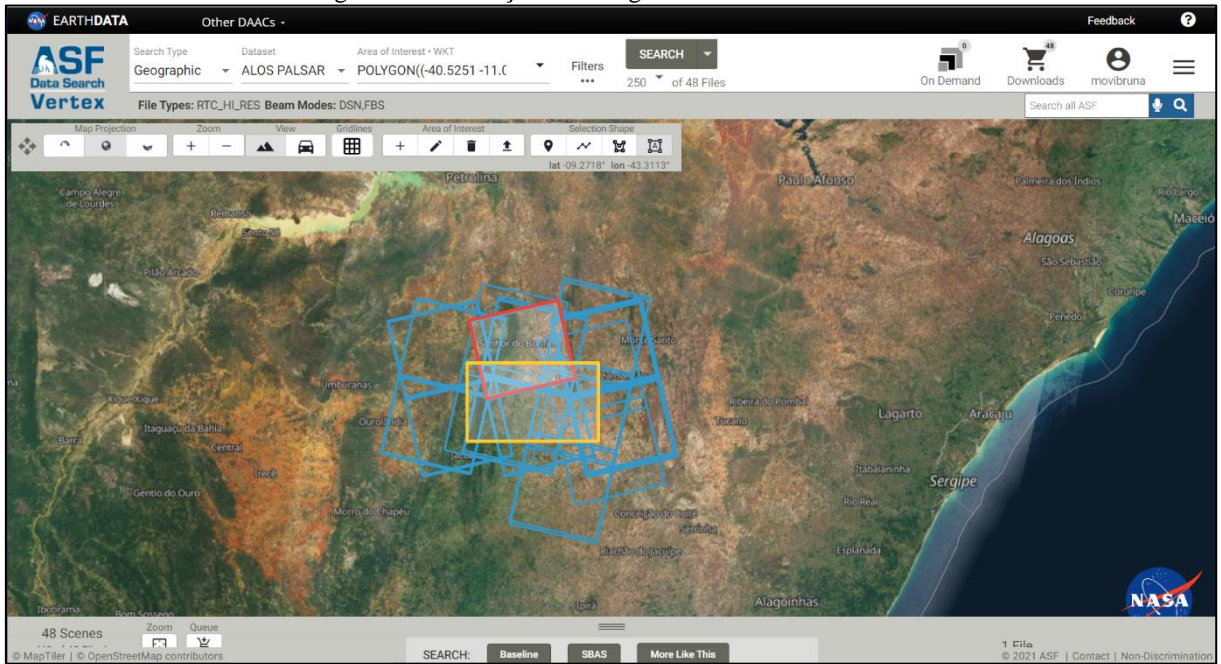
3.3.2 Modelo Digital de Elevação: ALOS PALSAR

As imagens ALOS PALSAR adquiridas diretamente do banco de dados do *Alaska Satellite Facility* (ASF), de maneira similar. Localizou-se o empreendimento e delimitou-se sobre a imagem de satélite a região de interesse de obtenção de cartas, conforme apresenta a Figura 15. Obteve-se 48 imagens com resolução espacial 12,5 m x 12,5 m e destas, selecionou-se 08 imagens complementares. Após *download*, as imagens também foram reprojctadas para o Sistema de Referências SIRGAS2000, UTM Fuso 24 S e unidas em um único raster. Adotou-se para este raster a nomenclatura MDE_ALOS.

O mesmo recorte do raster aplicado ao raster MDE_SRTM foi aplicado ao raster MDE_ALOS.

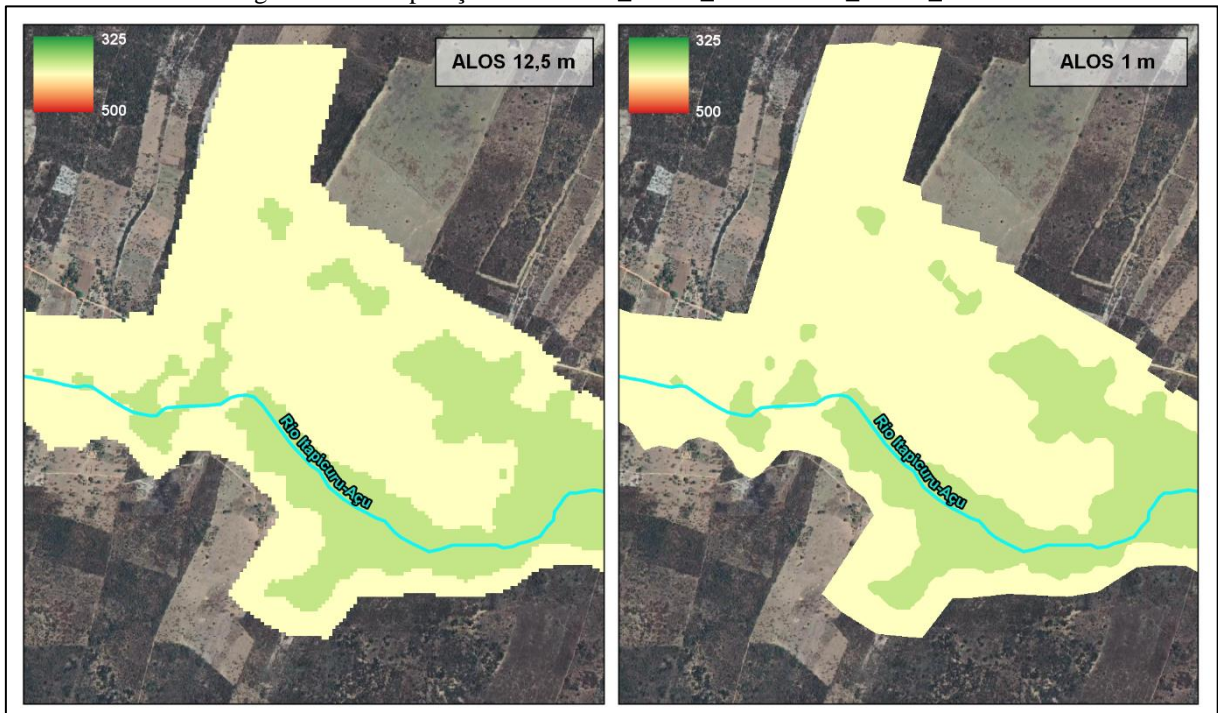
Assim como aplicado para o MDE SRTM, o MDE Alos Palsar foi interpolado de maneira similar, da resolução 12,5 m para resolução 1m, conforme apresentada na Figura 16. Adotou-se para estes raster as nomenclaturas MDE_ALOS_1m.

Figura 15 - Obtenção das imagens do ALOS PALSAR.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 16 - Comparação entre MDE_ALOS_12m e MDE_ALOS_1m.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.3.3 Modelo Digital de Terreno: Levantamento Aerofotogramétrico

O MDT gerado a partir de levantamento aerofotogramétrico e topográfico foi fornecido pela CERB, com resolução espacial 1 m x 1 m. A área levantada foi de 1.700 ha,

definida pela CERB em seu Termo de Referência. O levantamento foi realizado com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) em escala 1:25.000 e obteve como resultado curvas de nível equidistantes 1 m, ortomosaicos e MDT. Adotou-se para este raster a nomenclatura MDT_1m. Além do mapeamento da altimetria da região a jusante, foi realizado o mapeamento das principais estruturas hidráulicas localizadas no rio principal, como pontes.

Após o processamento das bases topográficas, iniciou-se os procedimentos para a elaboração do modelo hidrodinâmico.

3.3.4 Comparação entre as Bases Topográficas em Estudo

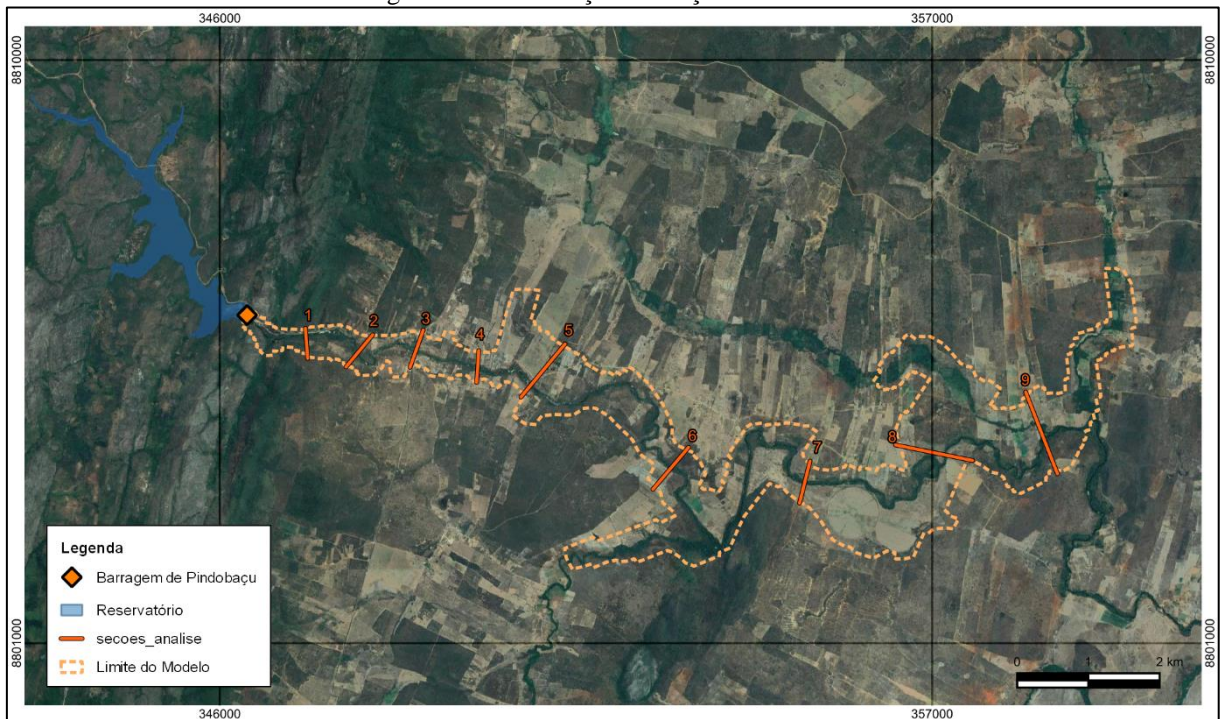
De modo a observar as principais diferenças entre as bases topográficas, foram definidas seções transversais na região a jusante do barramento, no rio principal. O rio principal foi traçado com base no arquivo vetorizado de cursos d'água da ANA e realizando correções por meio da comparação entre o vetor e a imagem de satélite do Google Satélite, utilizando a ferramenta *Vertex Tool*, do QGIS.

Os perfis traçados seguiram a recomendação da ANA (2016), com intervalos de 1 km nos primeiros 5 km a jusante da barragem e após estes, intervalos regulares, garantindo informações detalhadas em elementos de risco, como por exemplo infraestruturas hidráulicas. Assim, definiu-se o intervalo de 4 km entre seções, contemplando também neste intervalo, as pontes. Utilizando a ferramenta *Add Line Feature* no QGIS, os perfis foram traçados na região do vale de jusante e vetorizados. A Figura 17 apresenta as seções transversais do rio traçadas. Ao total, foram traçadas 09 seções transversais do rio.

Para comparação entre as seções resultantes das três bases topográficas, utilizou-se a ferramenta *ProfileTool* do QGIS. A partir da seleção da linha correspondente a seção em análise, a ferramenta gera o perfil de elevação correspondente.

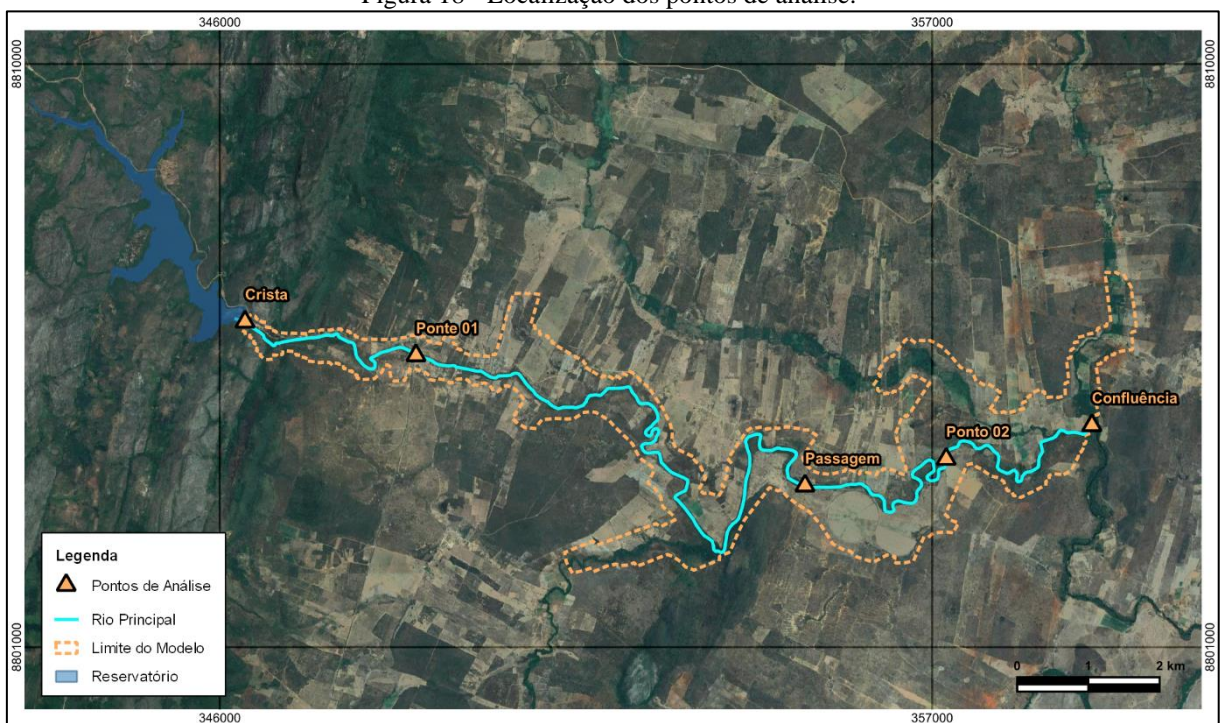
Ainda, de modo a observar diferenças altimétricas pontuais entre as bases topográficas, foi utilizada a ferramenta do QGIS *Sample Raster Values* para localizar a partir de uma camada vetorial os valores correspondentes no raster. Desta forma, o vetor de entrada localizou pontos na crista da barragem, nas duas estruturas de pontes localizadas no rio principal, em uma passagem e um ponto no limite extremo a jusante, na confluência entre os rios Itapicuru-Açu e Fumaça. Os pontos estão apresentados na Figura 18.

Figura 17 - Localização das seções de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 18 - Localização dos pontos de análise.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para avaliar os resíduos entre as bases topográficas, utilizou-se a malha computacional do modelo hidrodinâmico e, a partir desta, extraiu-se os valores de elevação do dado matricial com a ferramenta *Sample Raster Values*. Utilizando como referência o MDT

gerado a partir de levantamento aerofotogramétrico, por serem dados obtidos em campo com um maior nível de detalhamento, comparou-se em um primeiro momento as bases interpoladas com a base de referência, MDT_1m e MDE_SRTM_1m, bem como a MDT_1m e MDE_ALOS_1m. E em um segundo momento, comparou-se as bases em sua resolução espacial original, MDT_1m e MDE_SRTM_30m e MDT_1m e MDE_ALOS_12,5m. A Tabela 2 compila os arquivos utilizados para as comparações e simulações.

Tabela 2 – Nomenclaturas utilizadas para as bases topográficas.

Nomenclatura	Descrição
MDT_1m	Modelo digital de terreno gerado a partir de levantamento aerofotogramétrico. Adotado como base topográfica de referência
MDE_SRTM_30m	Modelo digital de elevação obtido pelas imagens SRTM em resolução espacial original de 30 m
MDE_SRTM_1m	Modelo digital de elevação obtido pelas imagens SRTM interpolado de 30 m para 1 m
MDE_ALOS_PALSAR_12,5m	Modelo digital de elevação obtido pelas imagens ALOS PALSAR em resolução espacial original de 12,5 m
MDE_ALOS_PALSAR_1m	Modelo digital de elevação obtido pelas imagens ALOS PALSAR interpolado de 12,5 m para 1 m

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Ao se analisar os pontos extraídos, foi possível calcular a diferença de elevação entre as bases a partir da subtração das elevações utilizando a ferramenta do QGIS *Raster Calculator*, a média, desvio padrão, discrepância mínima e discrepância máxima.

Define-se resíduo, no presente trabalho, como sendo a diferença entre o valor altimétrico da célula da base topográfica em análise e o valor do ponto da base topográfica de referência, neste caso, sendo o Modelo Digital de Terreno e erro o módulo desta diferença. E o erro médio quadrático como o dado pela Equação 06.

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum(Z_i - Z_t)^2}{n}}$$

Equação 06

Em que, de acordo com Silveira e Silveira (2016),

Z_i é o valor altimétrico da célula;

Z_t é o valor do ponto;

n é o número total de pontos.

Na análise comparativa, para observar as diferenças com relação a volume, a curva Cota x Volume das bases topográficas foi determinada utilizando a ferramenta do QGIS *Raster Surface Volume* e os dados extraídos foram compilados de forma gráfica no Excel.

Também de forma gráfica, comparou-se as curvas hipsométricas, extraídas por meio do QGIS com a utilização da ferramenta *Hypsometric curves*.

3.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO

Para a simulação de ruptura hipotética da barragem de Pindobaçu foi escolhido o *software* HEC-RAS versão 6.1, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) e lançado em setembro de 2021 por se tratar de um *software* livre e de uso difundido em estudos desta natureza. A versão 6.1 trata-se de um aprimoramento e substitui as versões anteriores do *River Analysis System* (RAS).

A modelagem hidrodinâmica adotada é do tipo módulo bidimensional (2D) em regime transitório, com modelo de inundação do tipo células de armazenamento e o método de discretização dos volumes finitos. A modelagem 2D foi adotada pois é comumente empregada em estudos de ruptura onde são observadas ocorrências de diferentes tipos de escoamento, variações bruscas na profundidade e velocidade, por exemplo (COUTINHO, 2015). Ainda, por neste tipo de modelo ser construído uma malha computacional, esta pode ser refinada de modo a detalhar o fluxo no canal principal ou em estruturas hidráulicas ao longo deste.

Com base nas comparações entre as hipsometrias das três bases topográficas em estudo, apresentadas nos resultados do presente trabalho, o Modelo Digital de Elevação ALOS PALSAR apresentou diferenças altimétricas significativas quando comparado ao MDE SRTM e MDT e, desta forma, foi descartado das simulações de ruptura. Assim, foram utilizadas na simulação de ruptura hipotética de barragem o Modelo Digital de Terreno gerado a partir de levantamento aerofotogramétrico (Simulação 01) e topográfico e o Modelo Digital de Elevação SRTM (Simulação 02).

3.4.1 Geometria do Modelo

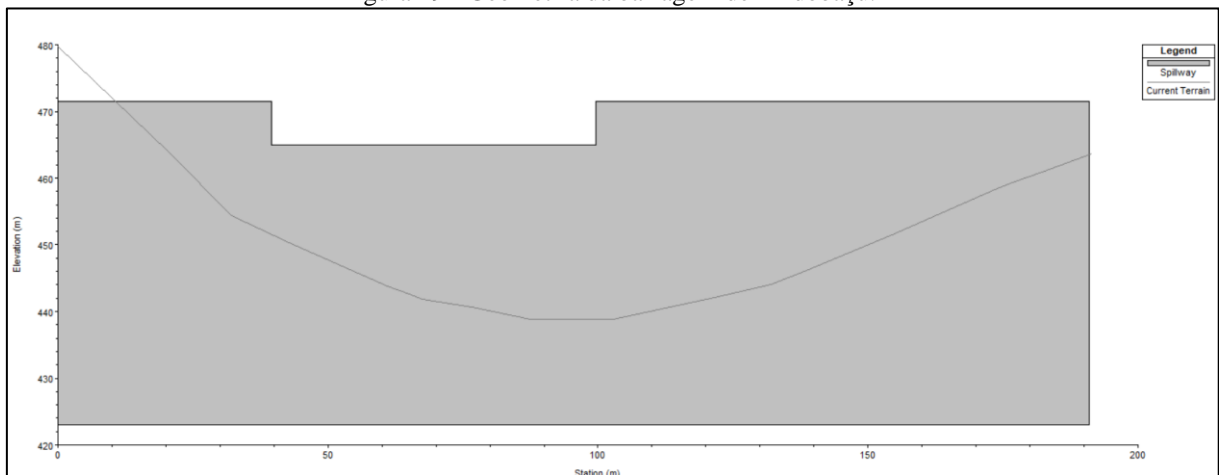
A construção da geometria do modelo foi realizada no HEC-RAS 6.1 utilizando o módulo *RAS Mapper* e edição de geometria. Foi construída, no *RAS Mapper*, uma malha ortogonal com células de armazenamento de 25 m x 25 m ao longo da planície de inundação.

No eixo do canal principal, de modo a alinhar as células na direção do fluxo predominante, criou-se uma *breakline* com um espaçamento de 5 m. Ainda, nas margens do canal principal, construiu-se uma *refinement region* de 10 m x 10 m, de modo a refinar a região dentro da calha do rio e permitir um maior controle do modelo (HEC-RAS, 2021).

O reservatório foi adicionado à geometria como um elemento de Área de Armazenamento. Assim, área do reservatório, vetorizada no QGIS, foi inserida associada a curva Cota x Volume apresentada na Figura 6. Após a inserção destes elementos, foi inserido na geometria uma estrutura hidráulica para realizar a conexão entre planície de inundação e reservatório, o próprio barramento.

Foi traçado o eixo da barragem utilizando a opção SA/2D Conn, conforme observado na imagem de satélite e inseriu-se as informações da estrutura da barragem de Pindobaçu, conforme descrito no item 3.1 Caracterização da Área de Estudo. Estas informações consistem nas dimensões do perfil do barramento e do órgão extravasor. A Figura 19 ilustra a geometria do barramento desenvolvido no modelo.

Figura 19 - Geometria da barragem de Pindobaçu.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Ao longo do rio principal à jusante do empreendimento, foram identificadas estruturas hidráulicas do tipo pontes. Estas duas estruturas, foram inseridas no modelo dentro da planície de inundação, de forma análoga a inserção da estrutura da barragem, adicionando as informações das estruturas levantadas em campo.

Para determinação da brecha da ruptura, foram utilizados os valores característicos da brecha apontados por USBR (1989, apud ANA, 2016) para barragens de concreto gravidade. Desta forma, adotou-se as condições mais críticas dentre os intervalos de referência, pois segundo ANA (2016), não existem estudos sistemáticos voltados a dimensão

das brechas em barragens de concreto, o que torna de difícil definição. Em contrapartida, é sabido que o desenvolvimento da brecha se dá de forma muito rápida. Isto exposto, o Quadro 4 compila os valores adotados para a geometria da brecha (Figura 20). A fim de comparar diretamente os resultados, foi utilizada a mesma geometria de brecha para as duas simulações.

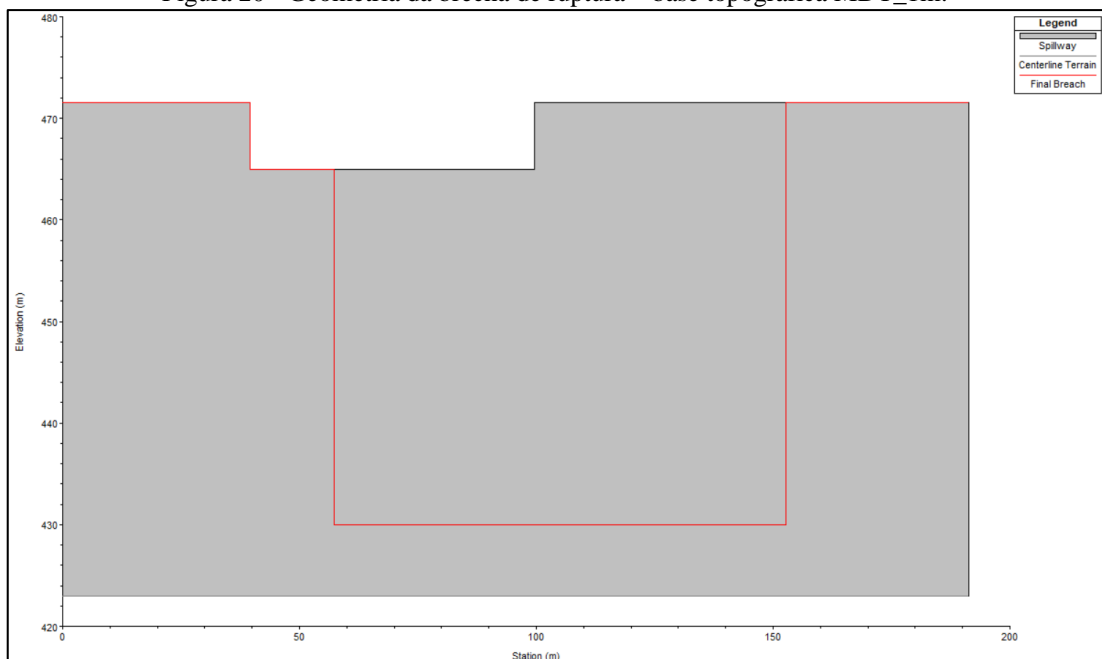
Quadro 4 - Valores característicos adotados para definição da brecha de ruptura.

Parâmetro	Referência	Adotado
Altura da brecha (m)	Aproximadamente igual a altura da barragem	41,50
Largura média da brecha (m)	Um múltiplo de vários blocos, sendo usualmente, $B_{bre} \leq 0,5B_{barr}$	95,50
Componente horizontal da inclinação dos taludes da brecha	$Z = 0$	0
Tempo de ruptura (h)	$0,1 \leq t_{rot} \leq 0,3$	0,1

Fonte: Elaborado pela autora (2022) e adaptado de USBR (1989, apud ANA, 2016).

Na simulação, foi considerada a formação da brecha aproximadamente no centro do barramento com 41,50 m de altura e 95,50 m de largura, com geometria retangular, sendo desenvolvida no espaço de tempo de 6 minutos. Para altura, foi considerado o preconizado por USACE (2014, apud Lara, 2016) em que a altura é dada entre o topo da barragem e o nível de superfície do solo com interface com o barramento. A ruptura hipotética da barragem de Pindobaçu foi programada para ocorrer no momento do pico de vazão do hidrograma, de forma a se simular a pior condição possível.

Figura 20 - Geometria da brecha de ruptura – base topográfica MDT_1m.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.4.2 Cenário a Simular

Com o enfoque do estudo voltado para a comparação entre as estimativas de mancha de inundação resultantes da utilização de diferentes bases topográficas, adotou-se como cenário a simular um cenário de ruptura mais provável em que, segundo ANA (2016), são estabelecidos critérios em função de causas prováveis de ruptura, como uma ruptura por mecanismo hidráulico (por galgamento) ou por mecanismo estrutural (cenário de ruptura em dia de sol).

Como o vertedor comporta a vazão de cheia de projeto, o galgamento da estrutura tem baixa possibilidade de ocorrer. Simulou-se, portanto, uma ruptura hipotética por falha estrutural, como queda de blocos. A elevação inicial do reservatório considerada para o início da ruptura foi de 0,15 m abaixo da crista, valor proposto por HARTFORD e KARTHA (1995, apud ANA, 2016) para qualquer tipo de barragem em um cenário de ruptura em dia de sol.

Com estas considerações iniciais, as duas simulações foram desenvolvidas no modelo hidrodinâmico.

3.4.3 Extensão do Cálculo

Para determinar a extensão do cálculo, ou seja, o limite de jusante do estudo, utilizou-se as recomendações do Guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência. Neste apresenta-se como critérios adequados para adoção do limite de jusante uma fronteira física (foz do rio), confluência com outro rio de maior dimensão ou um reservatório a jusante ou 50 km a jusante da barragem, conforme preconizado na legislação finlandesa ou 30 km a jusante da barragem (ANA, 2016).

Adotou-se o critério de 22 km a jusante da barragem, devido a confluência com um limite físico, o rio Fumaça. Ainda, o levantamento aerofotogramétrico tem seu limite definido nesta confluência. Desta forma, o MDT base da análise do presente estudo cobre a área até o limite de 22 km a jusante do barramento.

3.5 APLICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO HEC-RAS

Para a aplicação do modelo, foi considerado uma modelagem computacional bidimensional em regime de escoamento não permanente, por ser o escoamento comumente encontrado em cursos d'águas e canais.

Foram inseridas condições de contorno à montante e à jusante. O hidrograma de cheias correspondente ao tempo de recorrência de 100 anos foi inserido como condição de montante e a declividade do rio principal, obtida nos dados da geometria no *software* HEC-RAS no valor de 0,00258 m/m foi estabelecida como condição de jusante. Também foi inserido como condição de jusante a vazão sanitária de projeto de 1,89 m³/s, correspondente a vazão Q_{90} (CERB, 2010).

Ainda, na planície de inundação foi adotado valores de coeficiente de rugosidade de Manning, baseado no uso e ocupação do solo. Para tal, foram utilizados os mosaicos Landsat em escala 1:250.000 da Coleção 6 do projeto MapBiomass (2020). A partir da identificação das classes de uso e ocupação do solo existentes na região a jusante do barramento, foi associado valores de Manning de acordo com a tabela de referência de Chow (1959, apud FOREST SCIENCE LABS, 2006). Adicionou-se no *software* HEC-RAS uma classificação de terreno a partir da opção *Create a New Land Cover Layer* e, atribuiu-se os valores de Manning a cada classe, conforme mostrado no Quadro 5, por meio da comparação com as características do terreno visualizados na imagem de satélite.

Quadro 5 - Valores Manning atribuídos ao Rio Principal e Área de Inundação.

Classe	Associação	n
Rio, Lago e Oceano	Canal limpo, sinuoso (normal)	0,040
Formação Savânica	Vegetação dispersa e ervas daninhas (normal)	0,050
Formação Florestal	Árvores densas e em linha (normal)	0,150
Pastagem	Pastagem baixa (normal)	0,030
Mosaico de Agricultura e Pastagem	Pastagem baixa (normal)	0,030
Formação Campestre	Pastagem alta (normal)	0,035

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Foram utilizadas para os cálculos as equações completas de Saint-Venant que, apesar de aumentar o tempo de processamento do modelo, são hidraulicamente corretas para as análises hidrodinâmicas. Como condição inicial, foi considerado o reservatório em nível máximo normal, cota 465,00 m, por se tratar de um vertedouro de soleira livre. O intervalo de tempo de simulação utilizado foi de 5 segundos.

Não foi aplicado calibração do modelo hidrodinâmico. De acordo com Tschiedel e Paiva (2018), os dados de entrada dos modelos de ruptura de barragens são, em maioria, pouco precisos e podem não exprimir a realidade do local. Os autores citam o exemplo da utilização de valores de Manning para representar a rugosidade de uma área que nunca foi

inundada. Devido a estas incertezas associadas à precisão dos dados de entrada, não possibilitam a calibração de modelos de ruptura.

As simulações, análises, geoprocessamento e cálculos desenvolvidos no estudo foram executados com a utilização de um *notebook* marca ACER Aspire A515-5G, com processador Intel ® Core ™ i5-10210U CPU 2.11 GHz, 8 GB de memória RAM e placa gráfica NVIDIA GeForce MX250.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 COMPARAÇÃO ENTRE AS BASES TOPOGRÁFICAS

4.1.1 Bases Topográficas Utilizadas

Comparou-se, de início, os valores altimétricos de pontos específicos do vale de jusante. A Tabela 3 apresenta a comparação entre as elevações obtidas.

Tabela 3 - Comparação entre as altimetrias das bases topográficas em pontos específicos de análise.

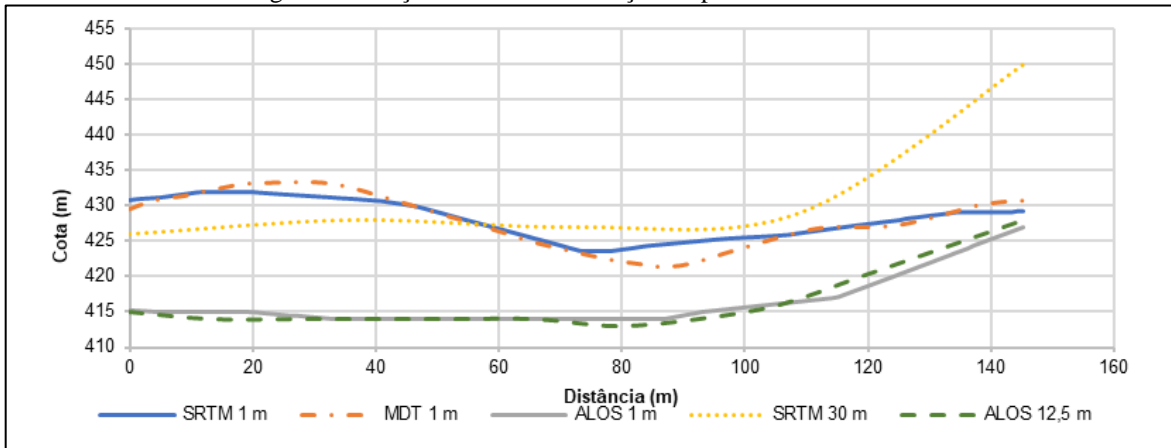
Ponto avaliado	MDE_SRTM_30m	MDE_ALOS_12m	MDT_1m
Cota da crista da barragem (m)	442,00	429,00	447,18
Ponte 01 (m)	417,00	404,00	415,03
Passagem (m)	387,00	376,00	383,64
Ponte 02 (m)	382,00	369,00	380,27
Confluência (m)	382,00	369,00	381,48

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Observa-se que a base MDE_ALOS_12m apresentou diferenças significativas de altimetria, quando comparada ao MDE_SRTM_30m e MDT_1m, que apresentaram elevações com pouca variação entre si. Isto reflete um primeiro indício de semelhanças altimétricas entre o MDE SRTM e o MDT gerado a partir de levantamento aerofotogramétrico e divergência entre estes e o MDE ALOS PALSAR.

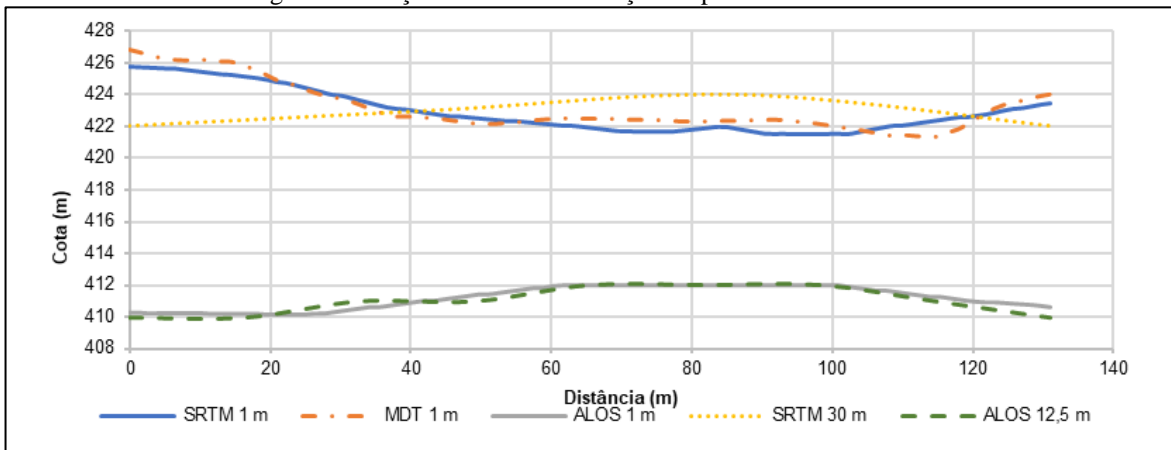
Estas diferenças são constatadas também nas comparações entre as seções transversais traçadas na calha do rio. O MDE ALOS PALSAR mantém uma diferença altimétrica significativa em relação a base topográfica de referência, superiores a 10 m, enquanto o MDE SRTM acompanha o traçado da seção, porém com menor detalhamento. As Figura 21 à Figura 29 são exemplos que demonstram as diferenças apontadas.

Figura 21 - Seção transversal da Seção 01 para diversos MDTs.



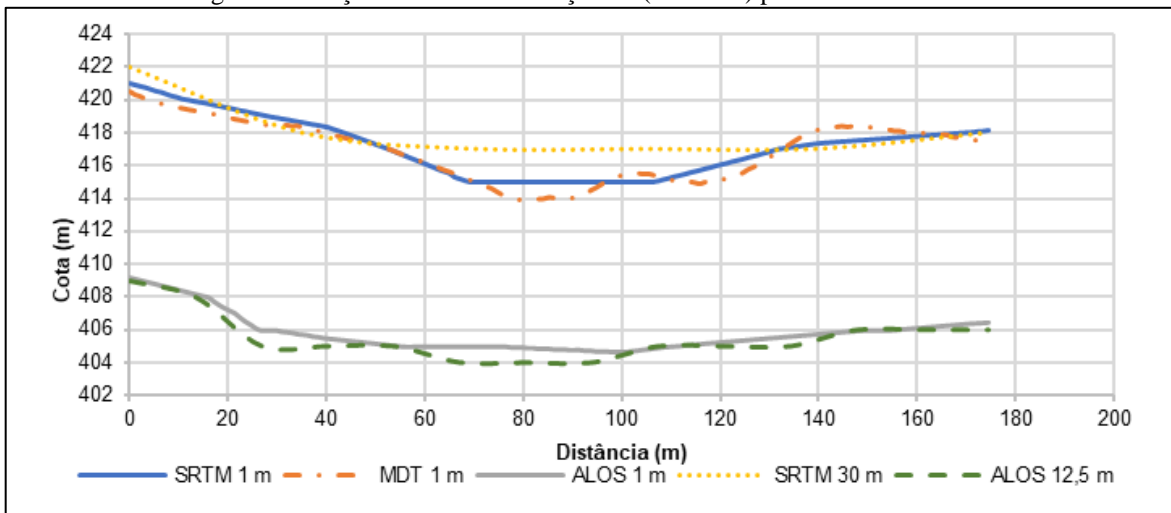
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 22 - Seção transversal da Seção 02 para diversos MDTs.



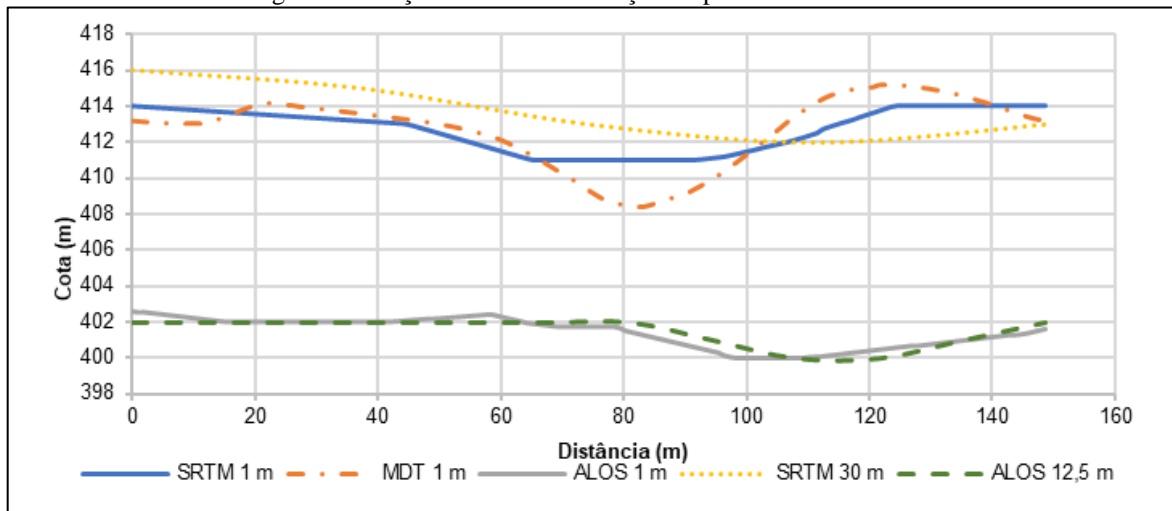
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 23 - Seção transversal da Seção 03 (Ponte 01) para diversos MDTs.



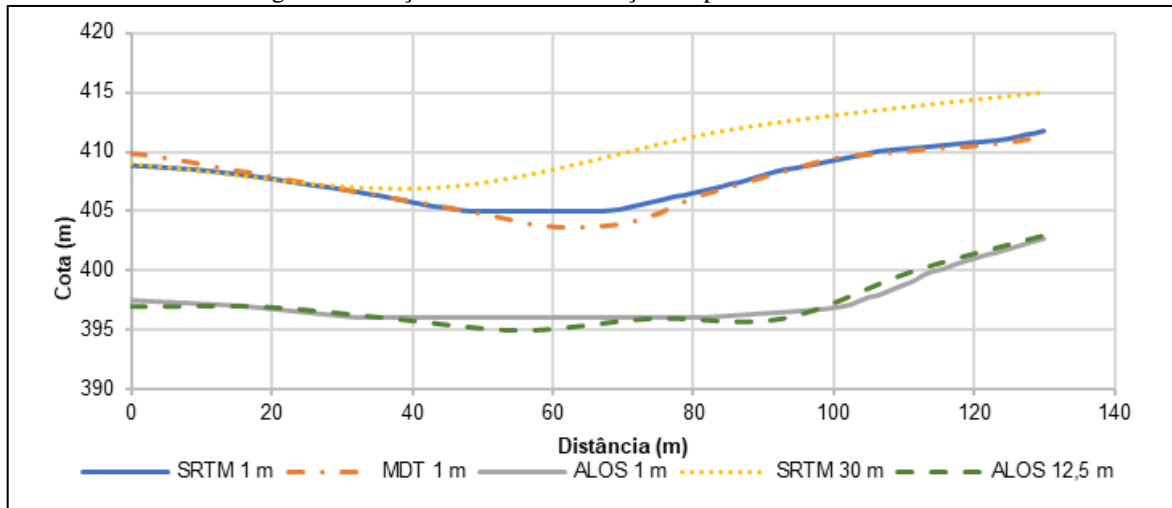
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 24 - Seção transversal da Seção 04 para diversos MDTs.



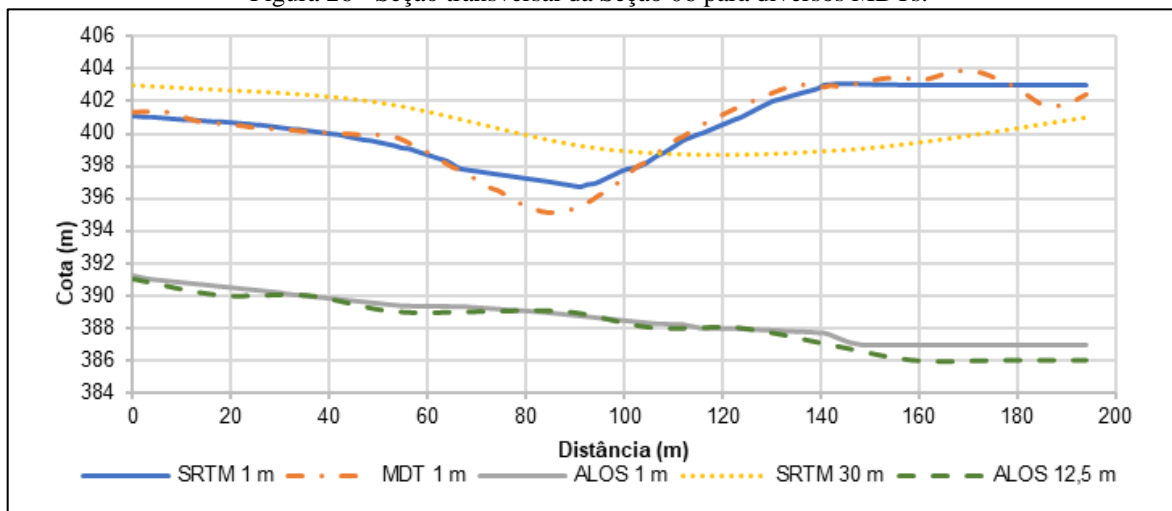
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 25 - Seção transversal da Seção 05 para diversos MDTs.



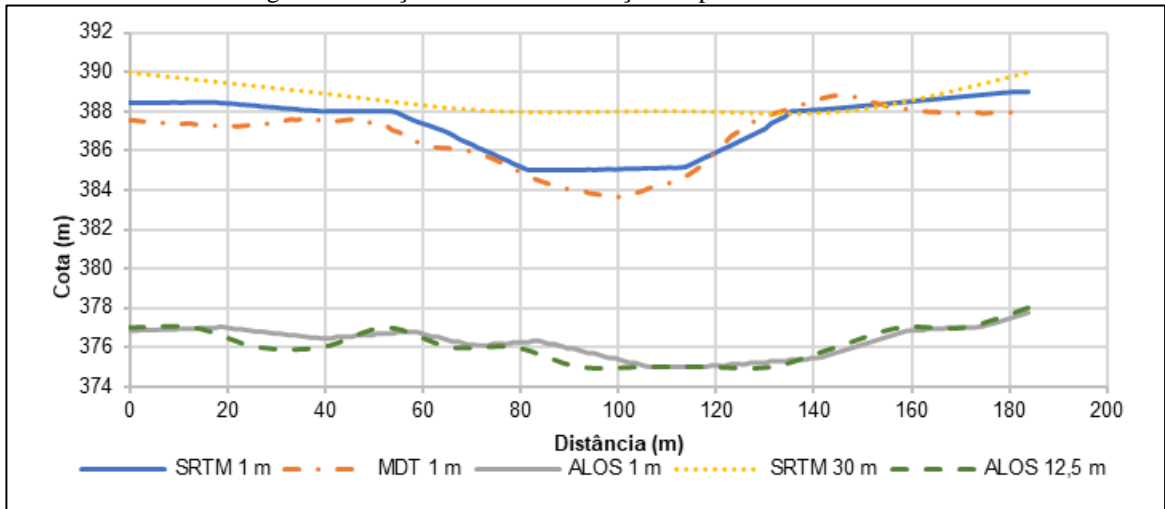
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 26 - Seção transversal da Seção 06 para diversos MDTs.



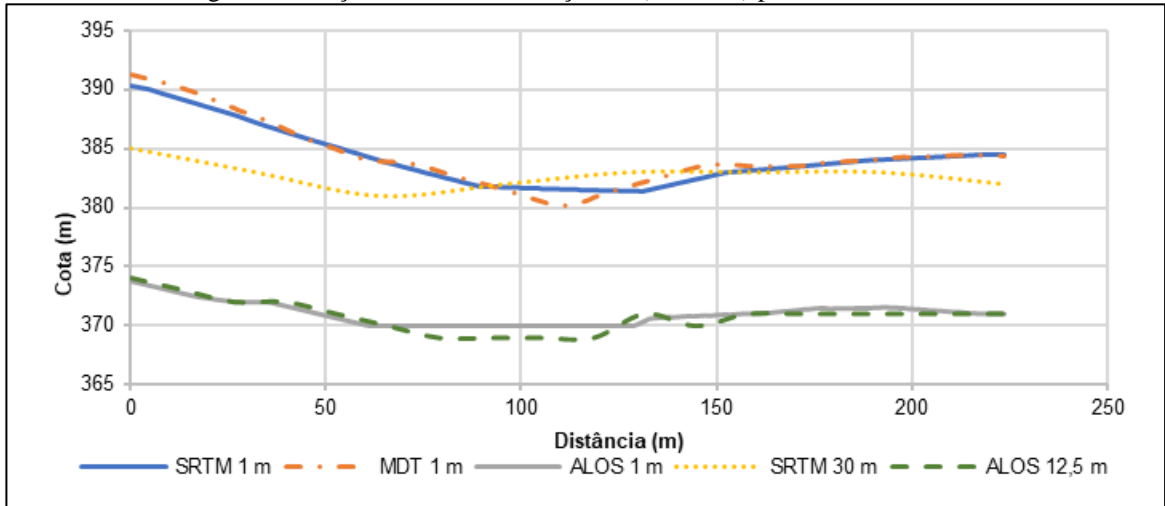
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 27 - Seção transversal da Seção 07 para diversos MDTs.



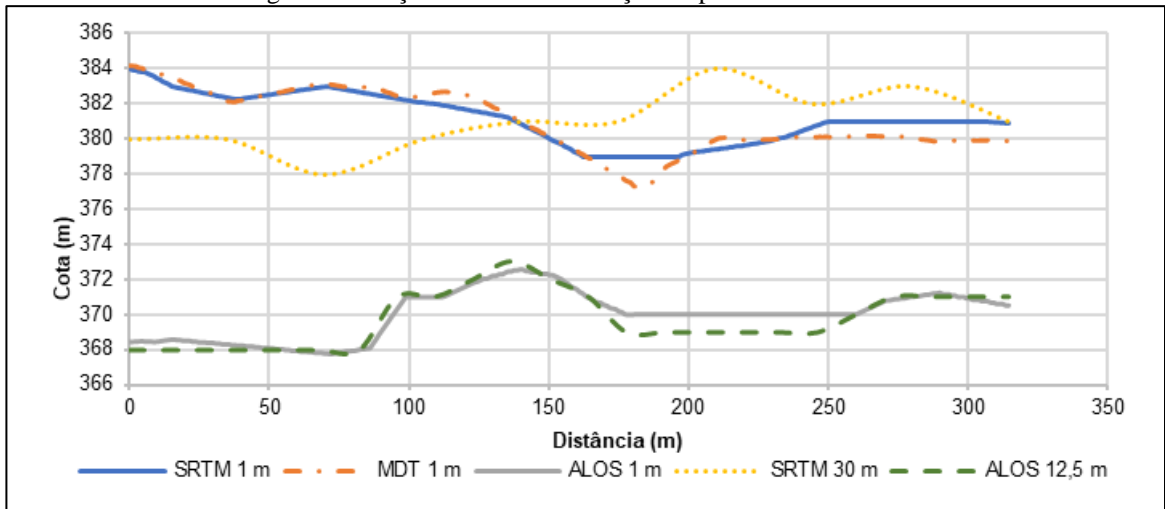
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 28 - Seção transversal da Seção 08 (Ponte 02) para diversos MDTs.



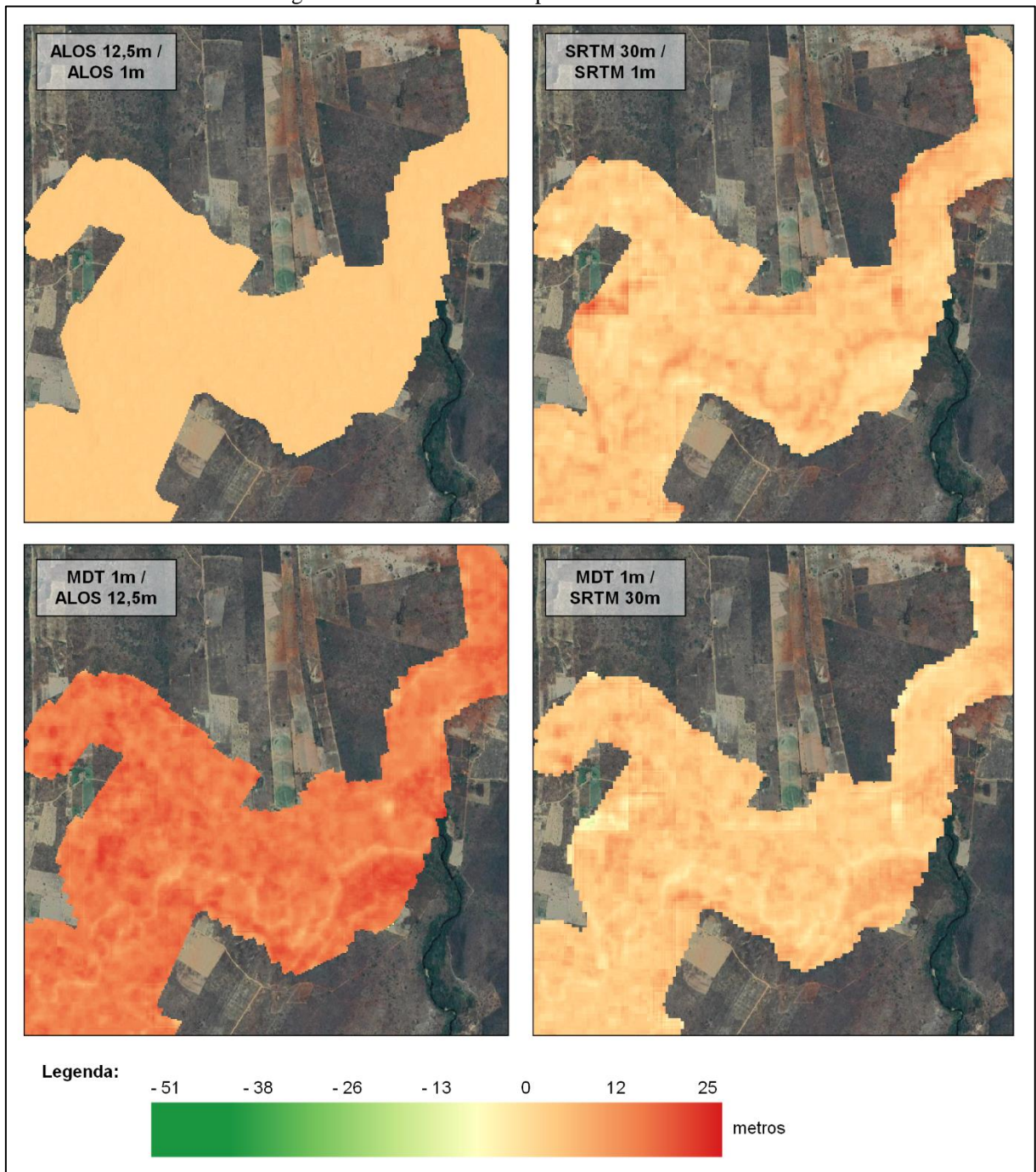
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 29 - Seção transversal da Seção 09 para diversos MDTs.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 30 – Recortes dos Mapas de erros altimétricos.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Calculando-se a diferença entre os dados matriciais das bases com o MDT, pixel a pixel, de modo a expressar graficamente as diferenças altimétricas entre as bases, resultou em mapas de erros altimétricos conforme a Figura 30. Verifica-se que ao se comparar os resultados da interpolação do MDE ALOS PALSAR de resolução 12,5 m para 1 m, há ausência de diferenças significativas. Estas já são mais expressivas no resultado da

interpolação do MDE SRTM de resolução 30 m para 1 m, havendo variações em elevações em determinados pontos, bem como rebaixamentos.

Ao se comparar os MDEs com o MDT de referência, constata-se que o MDT gerado a partir de levantamento aerofotogramétrico e topográfico está elevado em relação ao MDE ALOS PALSAR, convergindo com as diferenças apuradas nas seções transversais. Observa-se que diferenças altimétricas na calha do rio são menores comparadas as demais áreas do vale. O Apêndice A, Apêndice B, Apêndice C e Apêndice D apresentam os mapas de erros altimétricos contemplando o vale de jusante como um todo.

4.1.2 Bases Topográficas de mesma Resolução Espacial

Com base nos valores de elevação extraídos da malha de pontos uniforme das bases, obteve-se inicialmente alguns parâmetros estatísticos básicos como média, desvio padrão discrepância mínima e máxima e erro médio quadrático. Ao todo, foram extraídos 25.665 pontos da malha e para cada um destes, calculou-se o erro entre a comparação entre as bases MDT_1m e MDE_SRTM_1m, bem como a MDT_1m e MDE_ALOS_1m para, por fim, resultar no erro médio quadrático. A Tabela 4 apresenta os resultados desta comparação.

Tabela 4 - Comparação entre as bases topográficas com resolução espacial de 1 metro.

Parâmetros	MDT_1m / MDE_SRTM_1m	MDT_1m / MDE_ALOS_1m
Número de pontos	25.665	25.665
Média (m)	0,44	12,01
Desvio padrão (m)	0,30	1,82
Discrepância mínima (m)	0,00	0,01
Discrepância máxima (m)	13,55	40,54
Erro médio quadrático (m)	0,60	12,26

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Constata-se a partir dos resultados diferenças expressivas na comparação entre os dois pares de bases topográficas. Enquanto a elevação média calculada na comparação entre as bases MDT_1m e MDE_SRTM_1m é de 0,44 m, na comparação entre MDT_1m e MDE_ALOS_1m este valor chega a ser vinte e sete vezes superior, de 12,01 m.

Expressivos também foram os resultados para a discrepância máxima e erro médio quadrático. Da amostragem de 25.665 pontos, a máxima discrepância encontrada foi de 13,55 m entre as bases MDT_1m e MDE_SRTM_1m. Para a comparação entre as bases MDT_1m e MDE_ALOS_1m, 8% dos pontos apresentaram erro inferior a 0,60 m, tendo como valor resultante de discrepância máxima 40,54 m.

4.1.3 Bases Topográficas em Resolução Espacial Original

A mesma análise comparativa foi aplicada entre as bases topográficas em suas resoluções espaciais originais. Os resultados são semelhantes para a comparação entre a base de referência (MDT) e o Modelo Digital de Elevação ALOS PALSAR.

Entretanto, quando comparadas MDT_1m e MDE_SRTM_30m, os valores resultantes divergiram dos resultados da interpolação, conforme exposto na Tabela 5. Houve um aumento na elevação média, desvio padrão e erro quadrático médio e entende-se que isto se deve pela discrepância máxima observada ser de 51,01 m.

Tabela 5 - Comparação entre as bases topográficas em resolução espacial original.

Parâmetros	MDT_1m / MDE_SRTM_30m	MDT_1m / MDE_ALOS_12,5m
Número de pontos	25.665	25.665
Média (m)	2,23	12,24
Desvio padrão (m)	1,55	1,90
Discrepância mínima (m)	0,00	0,02
Discrepância máxima (m)	51,01	40,01
Erro médio quadrático (m)	3,24	12,50

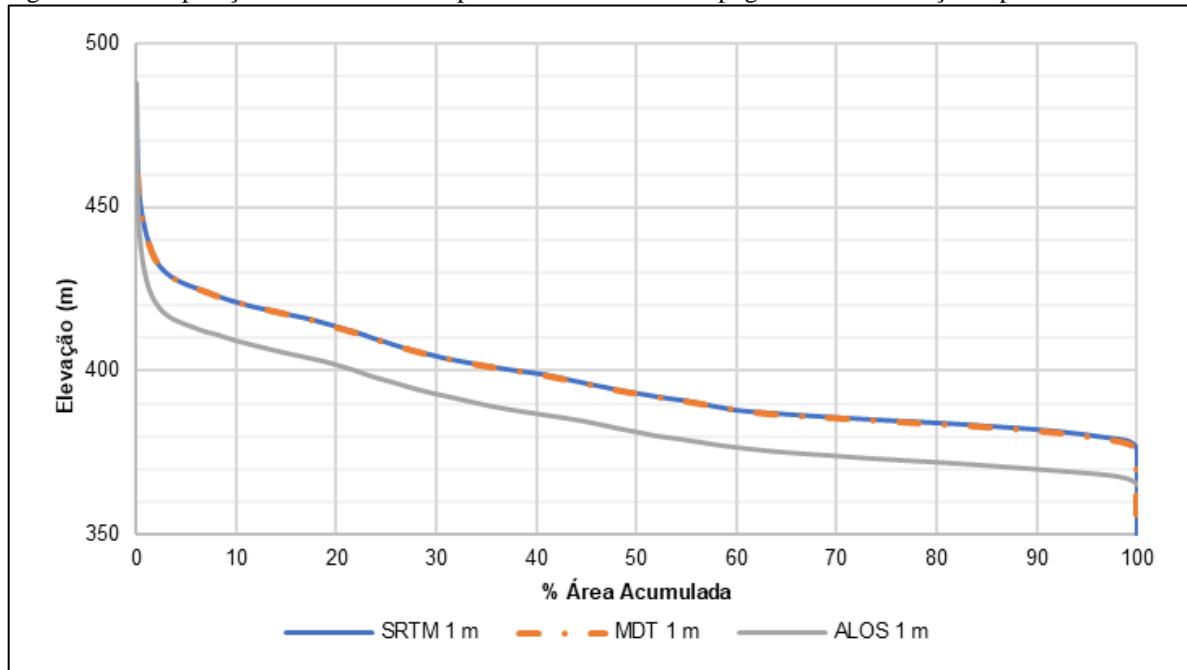
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Apesar de haver uma discrepância máxima maior na comparação entre as bases MDT_1m e MDE_SRTM_30m do que a observada na comparação entre MDT_1m e MDE_ALOS_12,5m, os demais parâmetros são mais favoráveis para a comparação MDT e SRTM, resultado similar ao constatado para as comparações entre bases de mesma resolução.

4.1.4 Curvas Hipsométricas e Curvas Cota x Volume

Quando comparadas as curvas hipsométricas, uma diferença vertical significativa é observada na forma gráfica, de mesma ordem que a discrepância máxima, como representado na Figura 31.

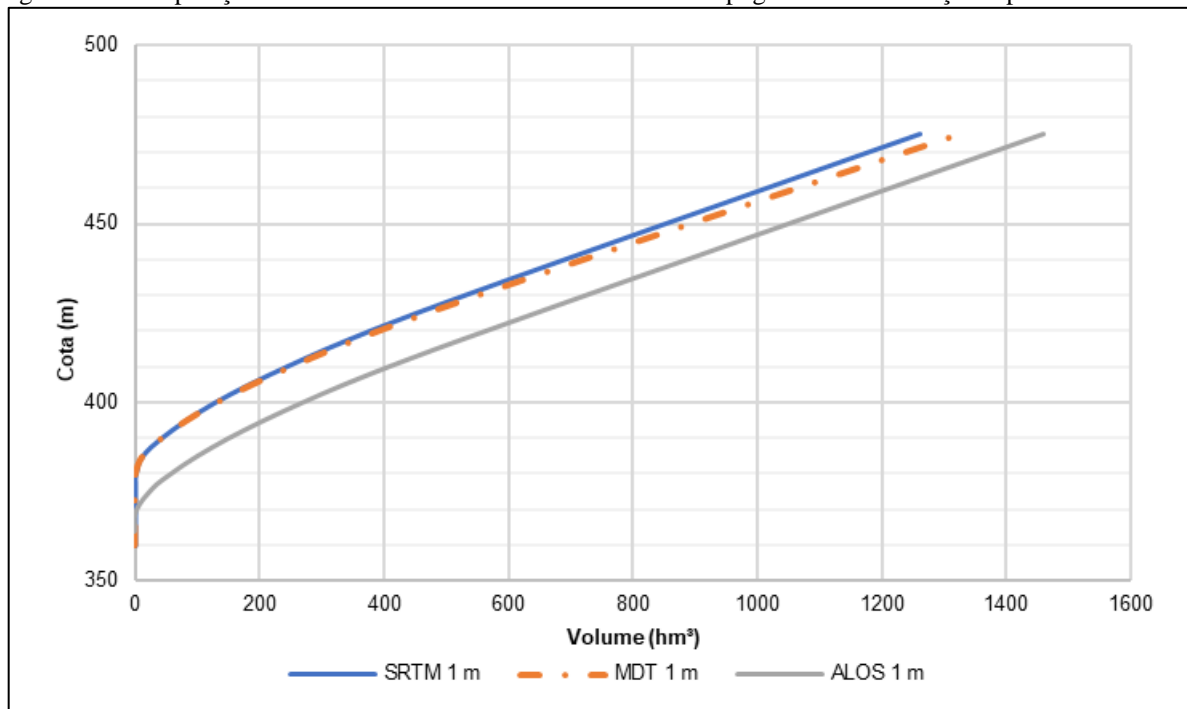
Figura 31 - Comparação entre as curvas hipsométricas das bases topográficas de resolução espacial de 1 metro.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Um comportamento similar é observado graficamente na Figura 32, quando comparadas as curvas Cota x Volume das bases topográficas de resolução espacial de 1 metro.

Figura 32 - Comparação entre as curvas Cota x Volume das bases topográficas de resolução espacial de 1 metro.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Com base no exposto, das três bases topográficas em estudo, o MDE ALOS PALSAR diverge significativamente do MDT e do MDE SRTM, que possuem comportamento altimétrico semelhante. Desta forma, para as análises dos resultados das simulações de ruptura, o MDE ALOS PALSAR é incongruente.

Comparando-se os dados matriciais de mesma resolução espacial com os de resolução original, averiguou-se maior paridade entre o MDT_1m e MDE_SRTM_1m, se comparado aos de resolução original. Desta forma, o MDT_1m e MDE_SRTM_1m foram utilizados como base topográfica do modelo hidrodinâmico.

4.2 SIMULAÇÃO DA RUPTURA HIPOTÉTICA DE BARRAGEM

Para a avaliação dos resultados da Simulação 01 e Simulação 02 da ruptura hipotética da barragem de Pindobaçu, foram extraídas as informações referentes a extensão da mancha de inundação (área), vazão máxima, cota máxima da cheia, velocidade máxima da onda de ruptura, profundidade máxima na seção e tempo de chegada da onda em cada uma das seções ilustradas na Figura 17. Estas informações estão compiladas na Tabela 6 para a simulação utilizando o MDT_1m (Simulação 01) e na Tabela 7 para a simulação utilizando o MDE_SRTM_1m (Simulação 02).

Tabela 6 - Características da cheia de ruptura nas seções de referência - Base topográfica MDT_1m (Simulação 01).

Seção	Distância do barramento (km)	Chegada da onda (00H00)	Chegada do pico da onda (00H00M)	Vazão máxima (m ³ /s)	Cota máxima da cheia (m)	Velocidade máxima da onda de ruptura (m/s)	Profundidade máxima na seção (m)
Seção 01	1	00:02	00:11	10.101	437,35	11,5	17,2
Seção 02	2	00:05	00:16	8.851	432,13	6,6	15,9
Seção 03	3,2	00:08	00:20	7.701	427,01	7,3	14,9
Seção 04	4,2	00:12	00:29	6.680	421,92	7,2	14,4
Seção 05	5,2	00:16	00:33	5.200	418,57	4,8	15,4
Seção 06	9,4	00:31	01:01	4.653	405,99	6,9	11,2
Seção 07	14,8	00:47	01:26	4.066	392,00	5,3	8,6
Seção 08	18,8	01:11	01:58	3.077	387,56	3,8	9,5
Seção 09	21,4	01:38	02:40	2.295	384,17	3,1	10,1

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

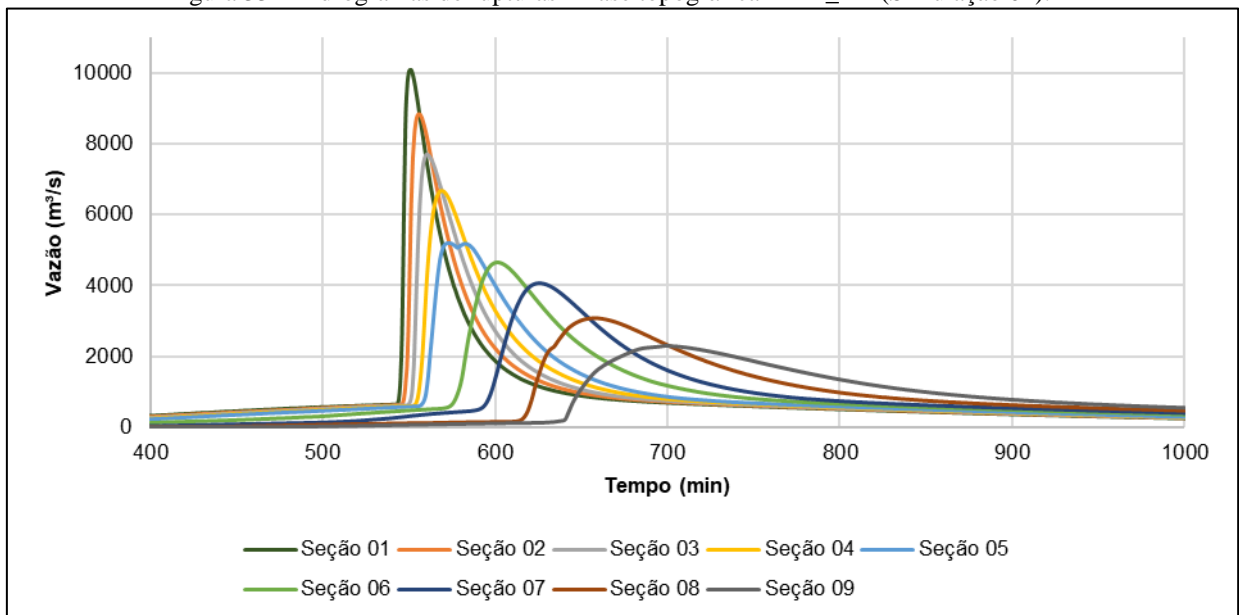
Tabela 7 - Características da cheia de ruptura nas seções de referência - Base topográfica MDE_SRTM_1m (Simulação 02).

Seção	Distância do barramento (km)	Chegada da onda (00H00)	Chegada do pico da onda (00H00M)	Vazão máxima (m ³ /s)	Cota máxima da cheia (m)	Velocidade máxima da onda de ruptura (m/s)	Profundidade máxima na seção (m)
Seção 01	1	00:03	00:11	10.084	437,36	11,3	17,2
Seção 02	2	00:05	00:16	8.845	431,91	6,8	15,7
Seção 03	3,2	00:08	00:20	7.728	426,86	7,1	14,8
Seção 04	4,2	00:12	00:25	6.699	421,97	7,2	14,3
Seção 05	5,2	00:16	00:41	5.339	418,55	5,0	15,3
Seção 06	9,4	00:27	01:00	4.780	406,02	6,9	11,2
Seção 07	14,8	00:47	01:24	4.164	391,86	5,5	8,6
Seção 08	18,8	01:08	01:54	3.198	387,61	3,2	9,5
Seção 09	21,4	01:31	02:30	2.509	384,04	3,3	9,9

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

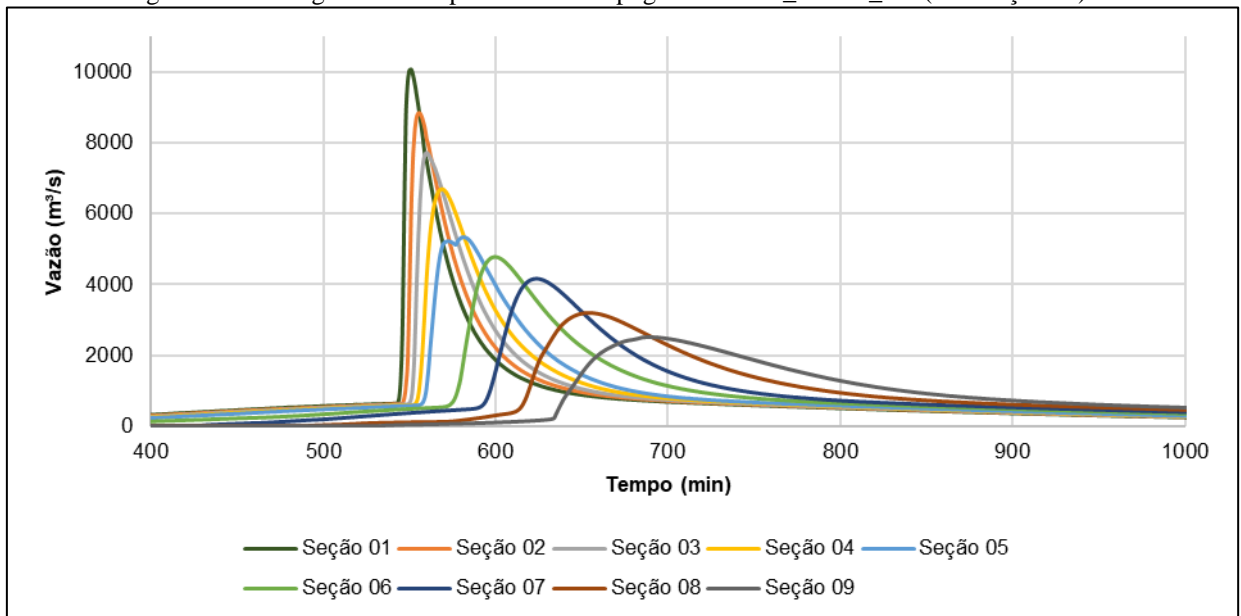
Ainda, os hidrogramas de ruptura do cenário simulado estão expostos na Figura 33 e Figura 34. Constata-se que ao longo do vale de jusante, conforme o distanciamento do barramento, ocorre uma redução do pico de vazão, resultado já esperado.

Figura 33 - Hidrogramas de rupturas - Base topográfica MDT_1m (Simulação 01).



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 34 - Hidrogramas de rupturas - Base topográfica MDE_SRTM_1m (Simulação 02).



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Conforme discutido nos itens 4.1.1 e 4.1.2, as bases topográficas MDT_1m e MDE_SRTM_1m possuem diferenças altimétrica diminutas entre si, com uma variação média de 0,60 m e divergência principalmente na calha do rio, local em que foram adotados valores estimados de geometria e deste modo, tornando-se uma área mais vulnerável a incertezas nos resultados do modelo.

Como exposto na Tabela 8, há pouca variação nos resultados da simulação. As diferenças de cota máxima de cheia e profundidade máxima na seção variam entre 0,0 m e 0,2 m.

A variação da velocidade máxima da onda de ruptura é um pouco superior, apresentando variação de até 0,60 m/s, mas ainda assim de baixa magnitude. Destaca-se que a seção 08 apresenta a estrutura da Ponte 02, o que pode ter ocasionado um aumento na velocidade.

Em contraponto, verificou-se diferenças significativas no tempo de chegada do pico da onda nas seções 05 e 09. Nesta última, o pico da onda de cheia é retardado em 10 minutos para a Simulação 01. Este retardamento é justificado pelo aumento da velocidade nesta sessão.

Variações nos resultados da simulação de ruptura, mesmo que pouco significativas, são esperadas quando utilizadas bases topográficas distintas, principalmente quando utilizadas bases provenientes de levantamento aerofotogramétrico. Isto porque são geradas a partir de

escala mais detalhada do vale de jusante, representando com maior fidelidade a realidade da área em estudo.

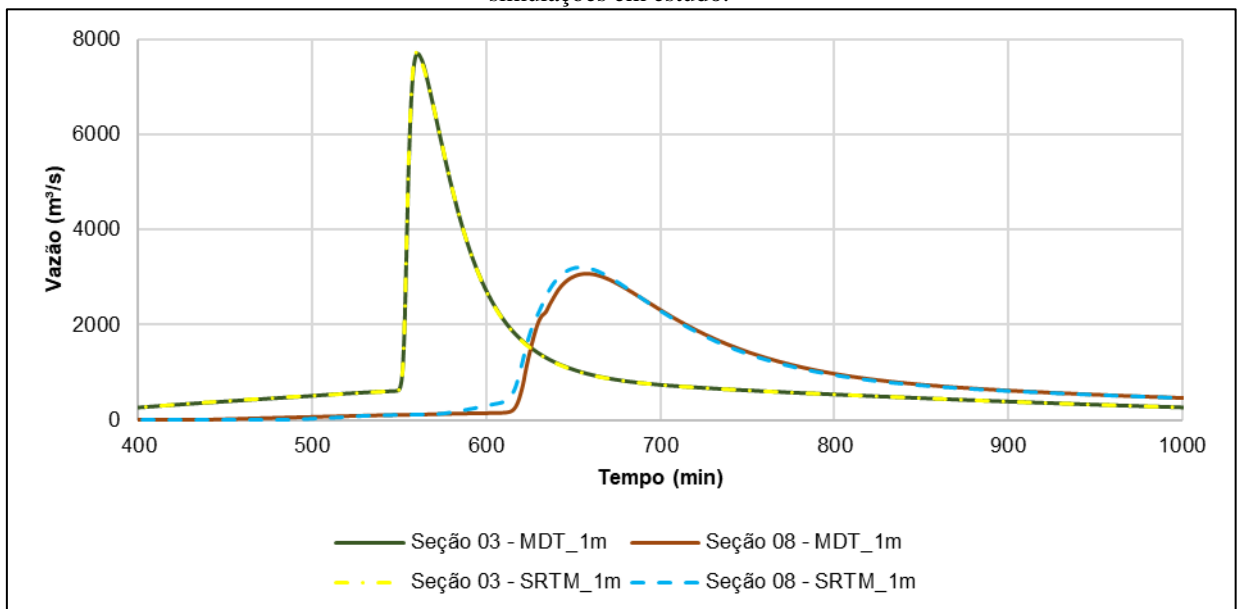
Tabela 8 - Diferença resultante entre as simulações de ruptura de barragem.

Seção	Chegada da onda (00H00)	Chegada do pico da onda (00H00M)	Módulo Vazão máxima (m ³ /s)	Módulo Cota máxima da cheia (m)	Módulo Velocidade máxima da onda de ruptura (m/s)	Módulo Profundidade máxima na seção (m)
Seção 01	0:01	0:00	18	0,0	0,1	0,0
Seção 02	0:00	0:00	5	0,2	0,2	0,2
Seção 03	0:00	0:00	27	0,1	0,2	0,1
Seção 04	0:00	0:04	19	0,0	0,0	0,1
Seção 05	0:00	0:08	139	0,0	0,3	0,1
Seção 06	0:04	0:01	126	0,0	0,0	0,1
Seção 07	0:00	0:02	98	0,1	0,1	0,0
Seção 08	0:03	0:04	122	0,0	0,6	0,0
Seção 09	0:07	0:10	215	0,1	0,2	0,2

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Com relação aos hidrogramas de ruptura, comparando graficamente, observa-se também ausência de diferenças consideráveis, conforme apresentado na Figura 35.

Figura 35 - Comparação entre os hidrogramas de ruptura nas seções 03 (Ponto 01) e 08 (Ponte 02) para as duas simulações em estudo.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.2.1 Resultados das Manchas de Inundação

O Apêndice E apresenta o mapa contendo as duas manchas de inundações geradas a partir das simulações de ruptura para o cenário de ruptura mais provável, utilizando o MDT_1m e MDE_SRTM_1m. Constata-se que, de maneira geral, a área inundada se mantém independente da topografia utilizada. Isto é coerente com os resultados discutidos acima. Pelas bases apresentarem perfil similar, ocorreu diferenças pouco significativas na vazão e profundidade máxima, e desta forma, as células da malha computacional são alagadas de maneira semelhante, resultando em manchas de inundação com áreas e geometria similares. Enquanto a Simulação 01 possui área de 1.300 ha, a Simulação 02 possui área de 1.297 ha. Uma diferença de três hectares, correspondendo a 0,23% em área.

A partir da visualização do resultado da mancha, nota-se que o canal do rio Itapicuru-Açu não é capaz de comportar a vazão do cenário de cheia simulado e atinge as regiões do vale de jusante. Com isto, foi necessário identificar os pontos vulneráveis, como as residências e infraestruturas atingidas, e comparou-se se são os mesmos para as duas manchas de inundação. Observou-se que com uma área maior, a mancha de inundação resultante da simulação utilizando o MDT_1m contempla na área inundada uma quantidade maior de edificações atingidas.

Foram mapeadas, desta forma, 90 residências atingidas e 02 locais de aglomeração. Enquanto para a mancha de inundação resultante da simulação utilizando o MDE_SRTM_1m foram identificadas 80 residências atingidas e 02 locais de aglomeração. O mapeamento está apresentado no Apêndice F e Apêndice G.

Estas infraestruturas atingidas pela mancha de inundação estão em área de risco e de danos potenciais à perda de vidas humanas, bens materiais e ambientais. Assim, devem ser contabilizadas a nível de PAE e inseridas nas ações de intervenção em caso de acidentes.

Pela escala do MDT_1m ser mais detalhada do vale de jusante e representar a planície de inundação de forma fidedigna, o mapeamento dos pontos vulneráveis desta topografia estão a favor da segurança.

Por representar áreas similares entre si, a Simulação 02 apresentou resultados aderentes quando comparada a Simulação 01. Havendo a necessidade de se utilizar a topografia SRTM para simulação da ruptura hipotética de barragem, é interessante que, gerado o resultado da mancha, seja considerada uma margem entorno desta e/ou infraestruturas no limiar da zona inundável, para segurança.

5 CONCLUSÃO

A topografia, dado de entrada dos modelos hidrodinâmicos, pode ser obtida de diversas formas, de forma gratuita ou por meio de contratação de serviços de campo de levantamento topográfico. A depender da via de obtenção, apresentam resoluções espaciais diferentes e, conseqüentemente, nível de precisão distintos.

Os resultados das simulações de ruptura de barragens permitem auxiliar no mapeamento das áreas atingidas e na compreensão dos impactos causados em casos de acidentes e, assim, permitir que ações sejam planejadas de modo a minimizar estes impactos.

Ao se comparar as bases topográficas em estudo em suas características originais, é possível identificar disparidade entre si. O modelo digital de elevação ALOS PALSAR se distancia, com relação a altimetria, dos modelos SRTM e do levantamento aerofotogramétrico, independente da resolução espacial utilizada.

Considerando-se as seções transversais à calha do rio principal, o MDE ALOS PALSAR mantém uma diferença altimétrica significativa em relação a base topográfica de referência, superiores a 10 m, enquanto o MDE SRTM acompanha o traçado da seção, porém com menor detalhamento. A tendência é reforçada na comparação entre as curvas hipsométricas e curvas Cota x Volume. Conclui-se, desta forma, que o MDE SRTM e o MDT gerado a partir de levantamento aerofotogramétrico possuem comportamentos altimétricos semelhantes e o MDE ALOS PALSAR é incongruente e apresentará resultados destoantes da realidade local, em uma modelagem hidrodinâmica.

Destaca-se que a comparação entre as bases topográficas é necessária, pois a depender da topografia do vale de jusante, os resultados podem diferir do apresentado no caso específico deste estudo.

Baseando-se na comparação dos resultados das simulações utilizando as bases topográficas MDT gerado a partir de levantamento aerofotogramétrico e MDE SRTM, constatou-se pouca variação nos resultados da simulação. As diferenças de cota máxima de cheia e profundidade máxima na seção variam entre 0,0 m e 0,2 m variação da velocidade máxima da onda de ruptura de até 0,60 m/s. Considera-se estas variações de baixa magnitude.

Com relação aos hidrogramas de ruptura, conforme o distanciamento do barramento, ocorre uma redução do pico de vazão, resultado já esperado. Entre si, as simulações resultaram em diferenças também de baixa magnitude, com variação entre 5 e 215 m³/s. Diferenças mais significativas foram observadas no tempo de chegada do pico da onda, em

que foi verificado um retardamento de 10 minutos para a Simulação 01, na seção de análise mais a jusante. Destaca-se, entretanto, que variações nos resultados das simulações eram esperadas, devido a escala mais detalhada que o MDT gerados a partir de levantamento aerofotogramétrico apresenta.

Com relação as manchas de inundação, estas fornecem subsídios para os empreendedores programarem ações em caso de emergência e implementarem um Plano de Ação de Emergência eficiente. Concluiu-se com base nas análises da mancha, que o canal do rio Itapicuru-Açu não é capaz de comportar a vazão do cenário de cheia simulado e causa inundações na região do vale de jusante em estudo. A área atingida na Simulação 01 é de 1.300 ha, enquanto na Simulação 02 é de 1.297 ha. Uma diferença de três hectares, correspondendo a 0,23% em área.

Há inseridos nessas áreas pontos vulneráveis a sofrerem impactos em casos de acidentes. A depender da mancha de inundação, há diferenças entre as infraestruturas atingidas: 90 residências e 02 locais de aglomeração foram mapeados na Simulação 01 e 80 residências e 02 locais de aglomeração mapeados na Simulação 02. Apesar de o MDT gerado a partir de levantamento aerofotogramétrico representar de forma fidedigna e retornar um mapeamento em favor da segurança, pelas áreas serem similares, é possível, quando necessário e na ausência de recursos financeiros, utilizar o modelo digital de elevação SRTM para simulação de ruptura de barragem, considerando no mapeamento uma margem entorno da mancha de inundação e/ou infraestruturas no limiar da zona inundável. Entretanto, este artifício não substitui a precisão que um modelo digital de terreno garante à simulação de ruptura.

Com base nas análises realizadas, recomenda-se para trabalhos futuros comparar os resultados da simulação de ruptura hipotética de barragem, acrescentando uma simulação com topografia de base gratuita, a exemplo do SRTM, compatibilizada com levantamento topográfico da calha do rio, seja por aerofotogrametria ou por métodos convencionais. Recomenda-se avaliar a viabilidade econômica da construção do modelo obtido por aerofotogrametria em comparação ao modelo gratuito, pontuando as economias geradas e melhor distribuição dos recursos financeiros. Ainda, para trabalhos futuros, recomenda-se estudar o percentual de acréscimo de margem necessária entorno das manchas de inundação, quando utilizado o MDE SRTM como topografia, para segurança, pelo erro obtido ou pela diferença de áreas atingidas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Fabio Corrêa. **Análise Morfoestrutural das bacias dos rios Raraíba e Mamanguape (PB), com base em MDE-SRTM e Imagem PALSAR/ALOS-1**. 2015. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3J3BGME>. Acesso em: 25 out. 2021.
- ANA, Agência Nacional de Águas (org.). **Guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência - PAE**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2016. 129 p. (Manual do). Disponível em: https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/volume-iv-guia-de-orientacao-e-formularios-dos-planos-de-acao-. Acesso em: 22 set. 2021.
- ASF ALASKA. **ALOS PALSAR Radiometrically Terrain Corrected (RTC)**. 2014. Disponível em: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu>. Acesso em: 25 out. 2021.
- ASF ALASKA. **ASF Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR products**. Asf Alaska, 2015. Disponível em: https://media.asf.alaska.edu/uploads/RTC/rtc_product_guide_v1.2.pdf. Acesso em: 25 out. 2021.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. SNISB (org.). **Mapa Interativo**. 2021. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=93e7af22c2294572b5aa554dfc048bc4>. Acesso em: 20 dez. 2021.
- BRASIL. AGÊNCIA SENADO FEDERAL. **Catástrofe de Mariana completa 5 anos e senadores cobram punições e reparações**. 2020. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2020/11/05/catastrofe-de-mariana-completa-5-anos-e-senadores-cobram-punicoes-e-reparacoes>. Acesso em: 15 nov. 2021.
- BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Política Nacional de Segurança de Barragens**: Legislação Federal. Brasília, 20 set. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em: 22 set. 2021.
- BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. **Política Nacional de Segurança de Barragens**: Legislação Federal. Brasília, 30 set. 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm#art2. Acesso em: 22 set. 2021.
- CERB (Bahia). **Ficha Técnica**: barragem de Pindobaçu. Salvador: CERB, 2010.
- CONSÓRCIO NOVA ENGEVIX-RK (Brasil). **Reavaliação dos projetos existentes e da construção de acordo com os critérios de projeto aplicados à época da revisão**: Capítulo I - estudos hidrológicos e hidráulicos. Florianópolis: Consórcio Nova Engevix-RK, 2021.
- CONSÓRCIO NOVA ENGEVIX-RK (Brasil). Tomo V: Levantamento Topográfico: Barragem de Pindobaçu. Florianópolis: Consórcio Nova Engevix-RK, 2021.

COUTINHO, Marlon Marques. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES**. 2015. 260 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

ESTADOS UNIDOS. SERVIÇO GEOLÓGICO DOS ESTADOS UNIDOS. **EarthExplorer**. 2000. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 25 out. 2021.

ESTADOS UNIDOS. NASA. **Shuttle Radar Topography Mission**. 2016. Disponível em: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/mission.htm>. Acesso em: 25 out. 2021.

FEMA, Federal Emergency Management Agency (org.). **Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risk Associated with Dam Incidents and Failures**. Estados Unidos: Fema, 2013. 145 p. Disponível em: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema_dam-safety_inundation-mapping-flood-risks.pdf. Acesso em: 15 nov. 2021.

FOREST SCIENCE LABS (Estados Unidos). **Manning's n Values**. 2006. Disponível em: http://www.fsl.orst.edu/geowater/FX3/help/8_Hydraulic_Reference/Mannings_n_Tables.htm. Acesso em: 03 jan. 2022.

LARA, Pedro Guilherme de. **Metodologia Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de Barragens**. 2016. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

LARA, Pedro Guilherme de; GOODELL, Christopher; BONUMÁ, Nádia Bernardi. **Previsão do risco de cota de inundação induzido por rompimento de barragens**. In: XXXI SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2017, Belo Horizonte. Seminário. Belo Horizonte: Sngb, 2017. p. 2-13. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/316218932>. Acesso em: 18 set. 2021.

LAURIANO, André Wilhiam. **Estudo de ruptura da barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS**. 2009. 251 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/656M.PDF>. Acesso em: 14 nov. 2021.

LOPES JUNIOR, Paulo Roberto. **Definição da Mancha de Inundação Gerada por Rompimento Hipotético de Barragem: uma comparação entre modelos dinâmico e estático**. 2020. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/212048>. Acesso em: 18 set. 2021.

MAPBIOMAS. **Coleção 6 com mapas de Cobertura e Uso do Solo do Brasil**. 2020. Disponível em: https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR. Acesso em: 20 dez. 2020.

NASCIMENTO, Santiago Henrique Anjos Soares. **Análise de modelos digitais de terreno por meio da modelagem hidráulica na definição de áreas de risco de inundação**. 2017. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/24032>. Acesso em: 19 set. 2021.

NEVES, Yuri Tomaz. **Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica acoplada 1D/2D utilizando imagens de perfilamento a laser**. 2019. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

O GLOBO (Brasil). **Duas barragens se rompem na Bahia por conta das chuvas e risco de enxurradas leva preocupação a populações ribeirinhas**. 2021. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/duas-barragens-se-rompem-na-bahia-por-conta-das-chuvas-risco-de-enxurradas-leva-preocupacao-populacoes-ribeirinhas-25332294>. Acesso em: 14 fev. 2022.

PAZ, Adriano Rolim da; COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos E. M.. **Simulação Hidrológica de Rios com Grandes Planícies de Inundação**. 4. ed.: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 2010. 15 v. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/230278/000815751.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 nov. 2021.

RABELO, Matheus Lima Carvalho. **Aplicação da aerofotogrametria na construção de modelo hidráulico para o município de Barrolândia-TO**. 2019. 119 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019. Disponível em: <http://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/1894>. Acesso em: 25 out. 2021.

REDAÇÃO O SUL (Brasil). **Desde 2000, o Brasil tem um rompimento de barragem a cada dois anos. Veja lista**. 2019. Disponível em: <https://www.osul.com.br/desde-2000-o-brasil-tem-um-rompimento-de-barragem-a-cada-dois-anos-veja-lista/>. Acesso em: 15 nov. 2021.

ROCHA, Felipe Figueiredo. **Retroanálise da ruptura da barragem São Francisco - Mirai, Minas Gerais, Brasil**. 2015. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUBD-A9VN49>. Acesso em: 22 set. 2021.

SAMPAIO, Tony Vinicius Moreira; BRANDALIZE, Maria Cecília Bonato. **Cartografia geral, digital e temática**. Curitiba: Prppg Ufpr, 2018. 1 v. (Geotecnologias: teoria e prática). Disponível em: <http://www.prppg.ufpr.br/site/ppggeografia/wp-content/uploads/sites/71/2018/03/cartografia-geral-digital-e-tematica-b.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2021.

SILVEIRA, Ricardo Michael Pinheiro; SILVEIRA, Claudinei Taborda da. **ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO COM DISTINTAS**

CARACTERÍSTICAS DE PROCESSAMENTO E AQUISIÇÃO. **Boletim de Geografia**, [S.L.], v. 33, p. 106, 14 maio 2016. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/bolgeogr.v33i0.31930>. Acesso em: 15 nov. 2021.

SOUZA, Juliana Mio de. **Análise da Qualidade Cartográfica dos dados da Shuttle Radar Topography Mission - SRTM**. 2006. 1225 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Ppgec, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SPECKHANN, Gustavo Andrei. **Uma proposta de mapeamento de risco de inundação na bacia do Rio Itajaí utilizando descritores de terreno**. 2018. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/192967>. Acesso em: 19 set. 2021.

TSCHIEDEL, Arthur da Fontoura. **Avaliação de fontes de incerteza em estudos de rompimentos de barragens**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/164266>. Acesso em: 22 set. 2021.

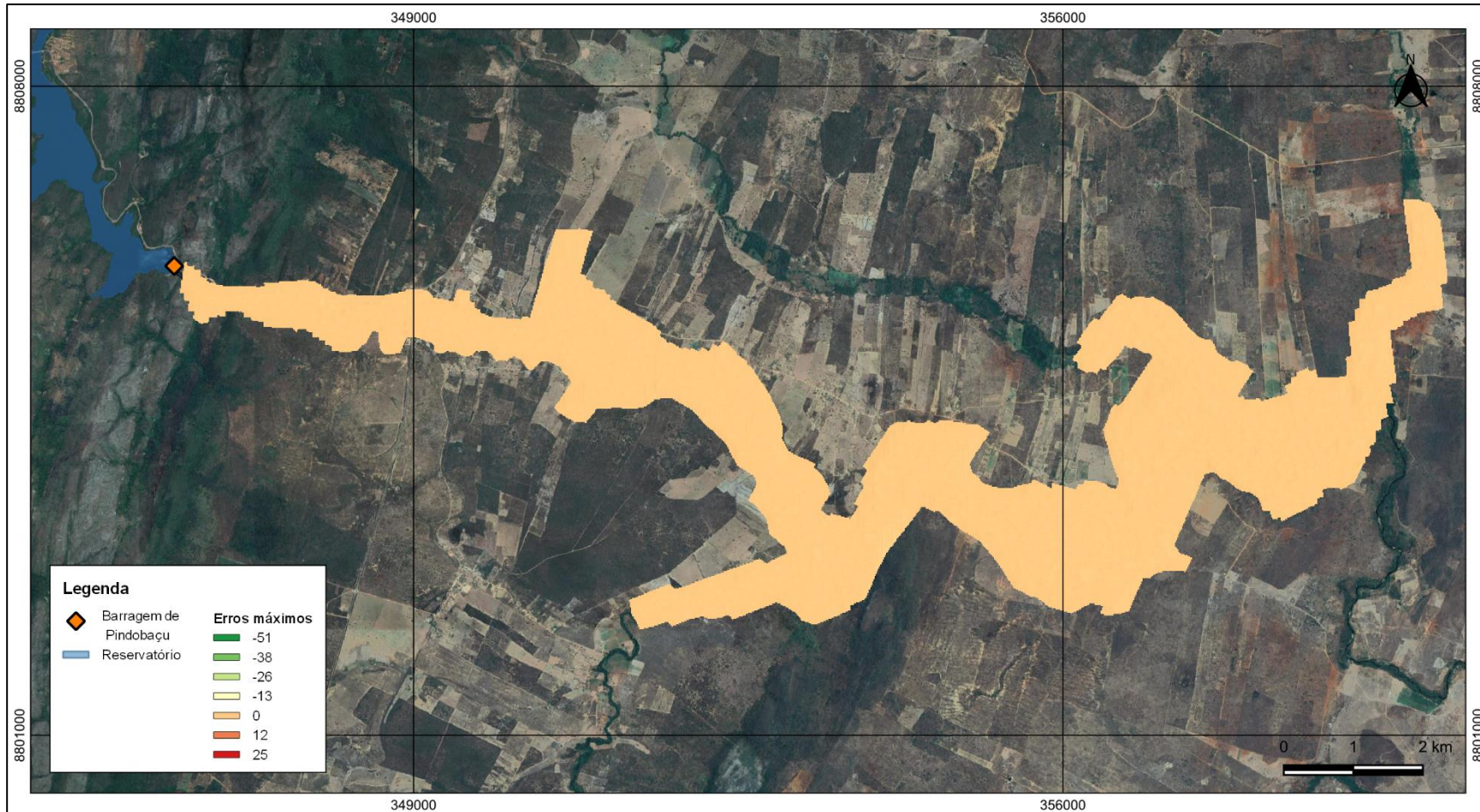
TSCHIEDEL, Arthur da Fontoura; PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de. **Uncertainty assessment in hydrodynamic modeling of floods generated by dam break**. Rbrh, Porto Alegre, v. 23, n. 30, p. 1-17, 30 jul. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.231820170074>. Disponível em: https://more.ufsc.br/artigo_revista/inserir_artigo_revista. Acesso em: 03 dez. 2022.

USACE US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS River Analysis System: 2d modeling user's manual**. Estados Unidos: Usace, 2021. 289 p.

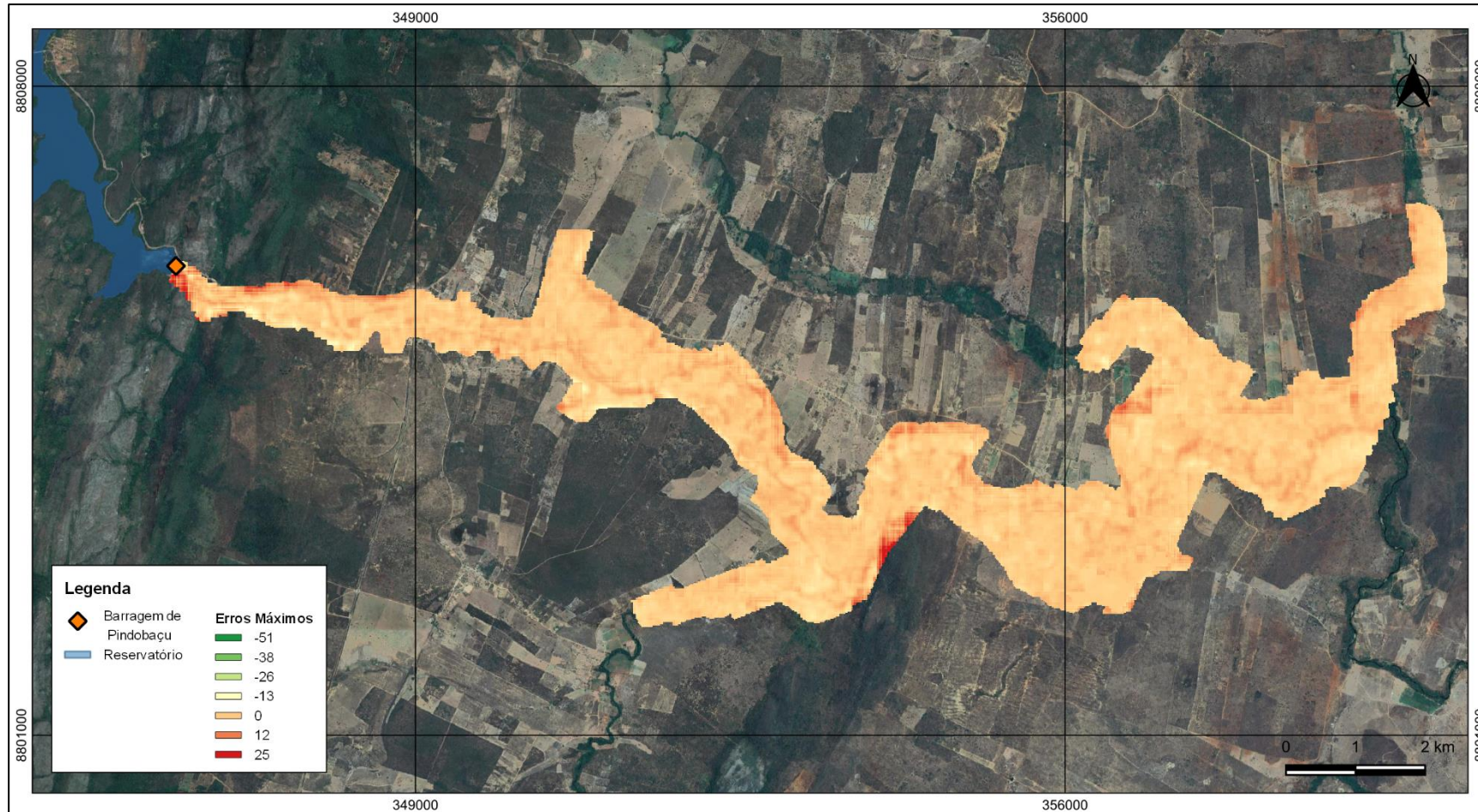
VEROL, Aline; MIGUEZ, Marcelo; MASCARENHAS, Flavio. Propagação da Onda de Ruptura de Barragem Através de um Modelo Quasi-2D. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 165-176, nov. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v18n1.p165-176>. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/97/1d26d0aaa30c558f2bd790fc33c60b91_558d713f8ab863583f5dae18bca92417.pdf. Acesso em: 15 nov. 2021.

WILLINGHOEFER, Matheus. **Avaliação do risco de rompimento da barragem de uma pequena central hidrelétrica na bacia do rio do peixe**. 2015. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/160177/TCC%202015-1%20Matheus%20Willinghoefer.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 nov. 2021.

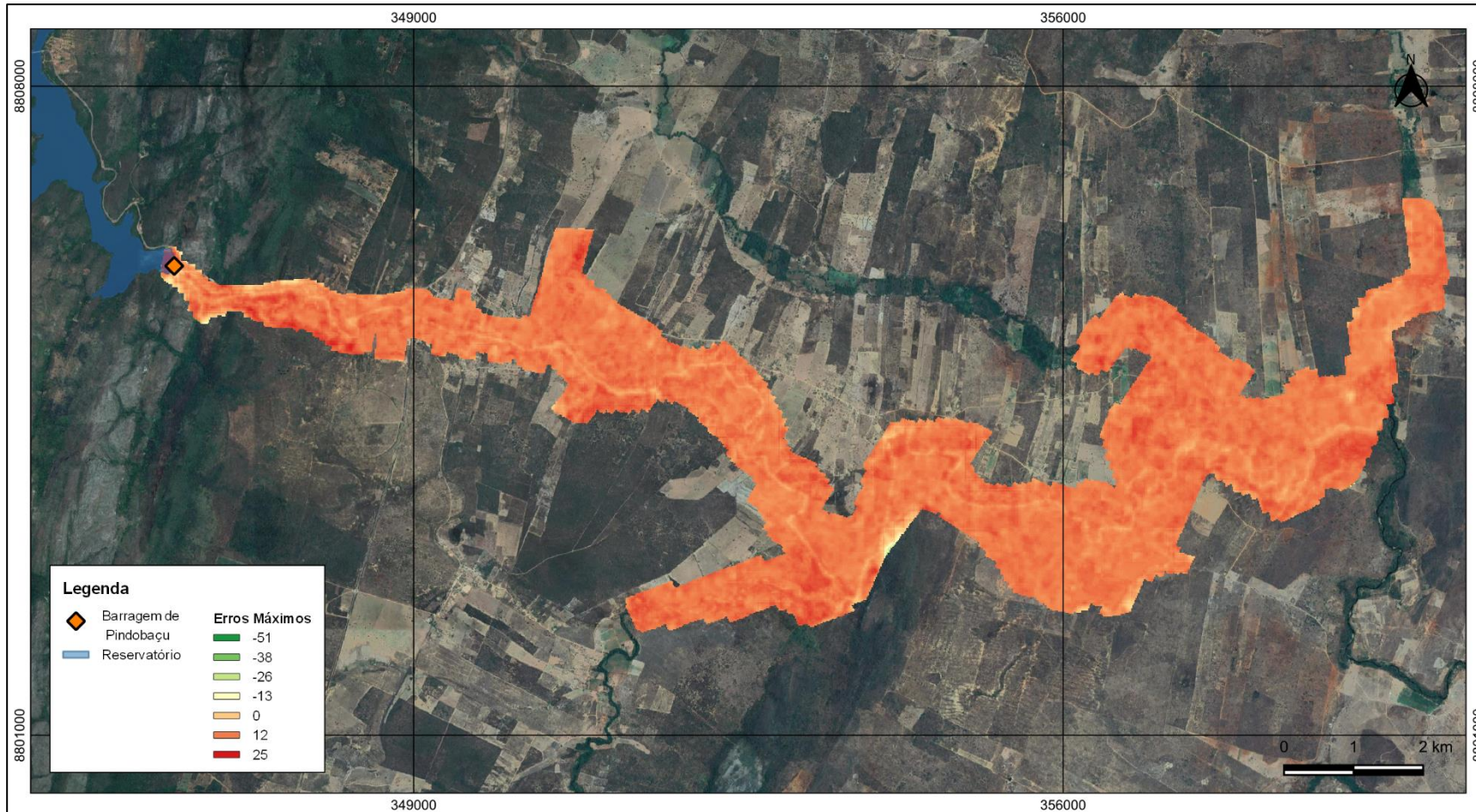
APÊNDICE A – Mapas de erros altimétricos – ALOS 12,5m / ALOS 1m



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

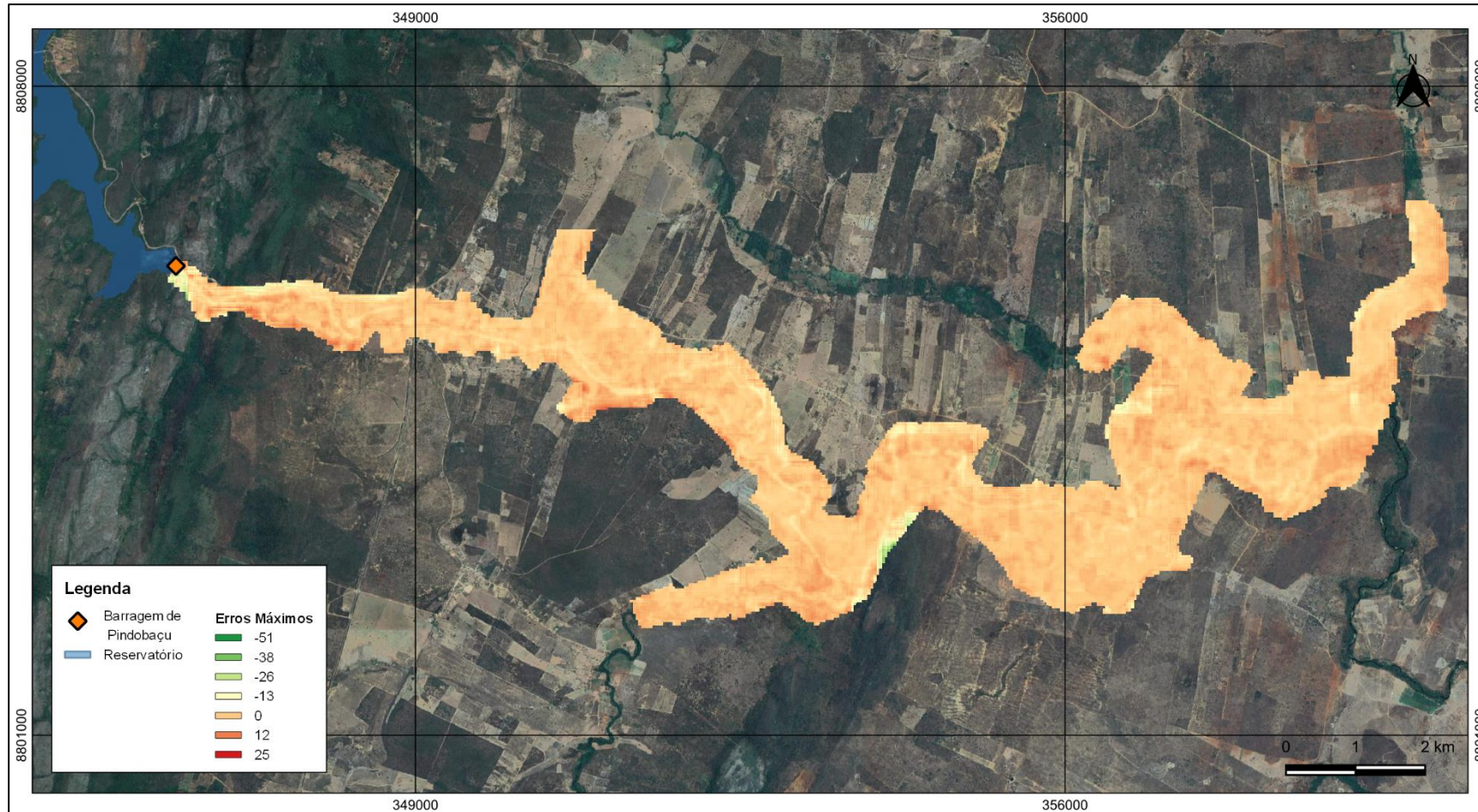
APÊNDICE B – Mapas de erros altimétricos – SRTM 30m / SRTM 1m

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

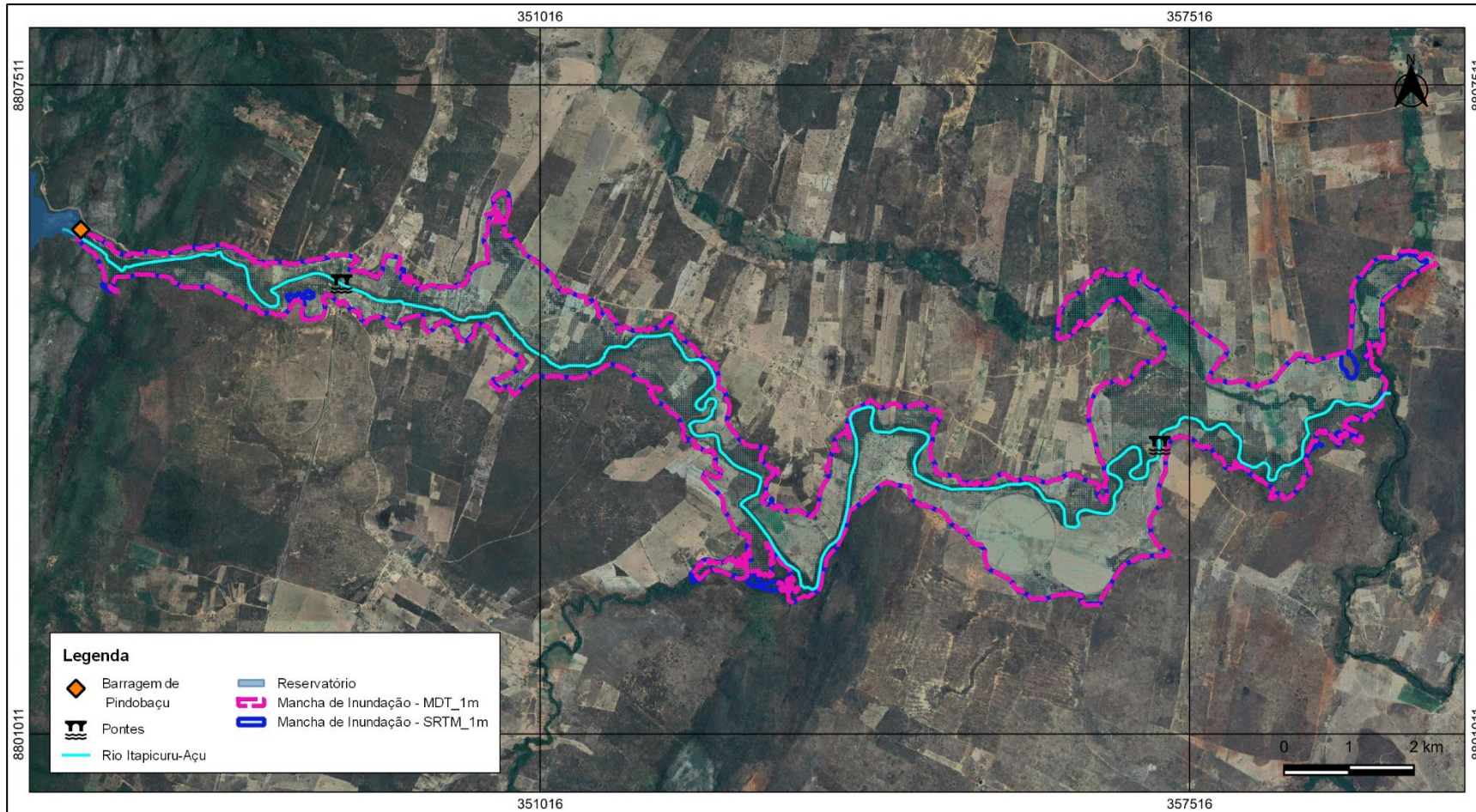
APÊNDICE C – Mapas de erros altimétricos – MDT 1m / ALOS 12,5m

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

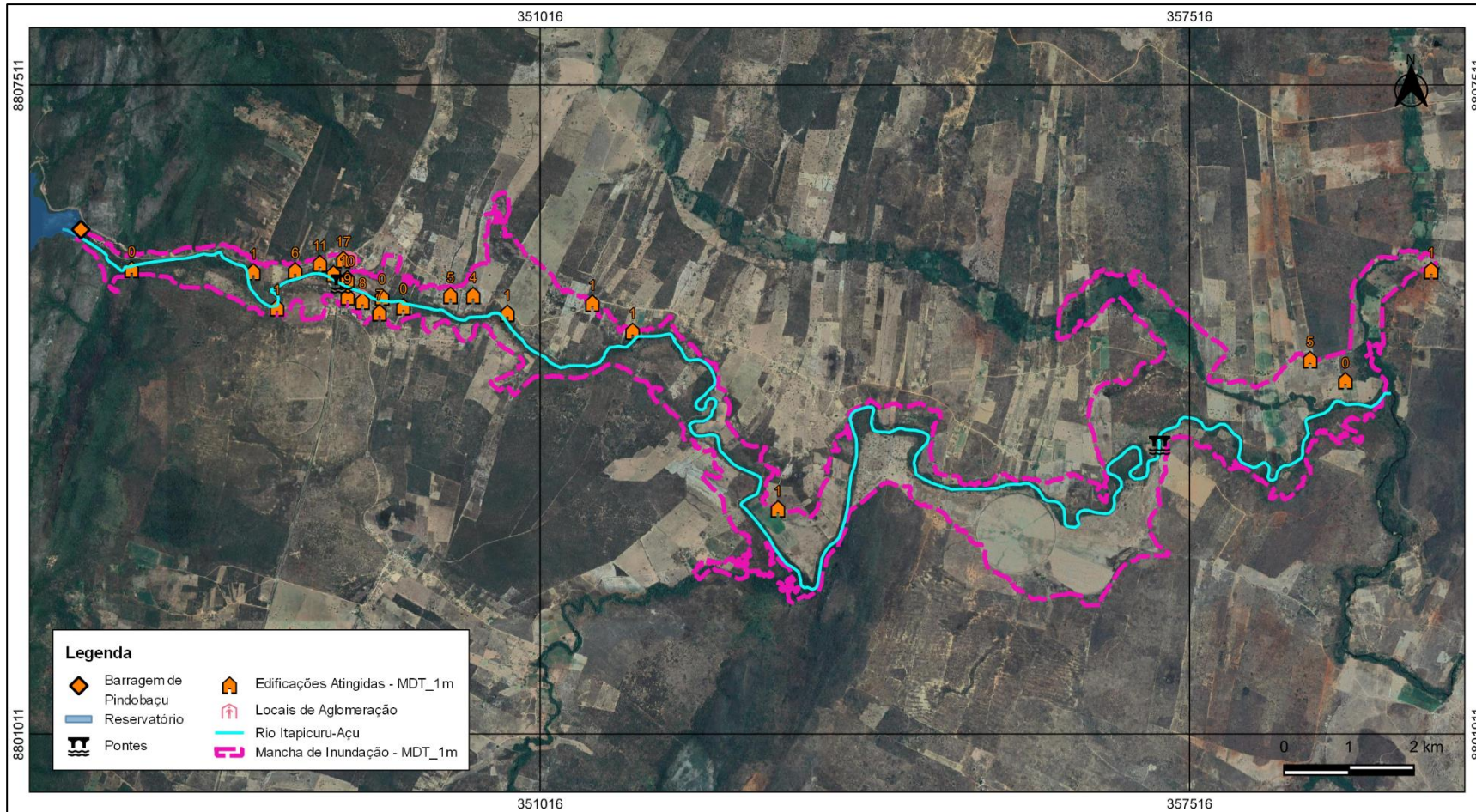
APÊNDICE D – Mapas de erros altimétricos – MDT 1m / SRTM 30m



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

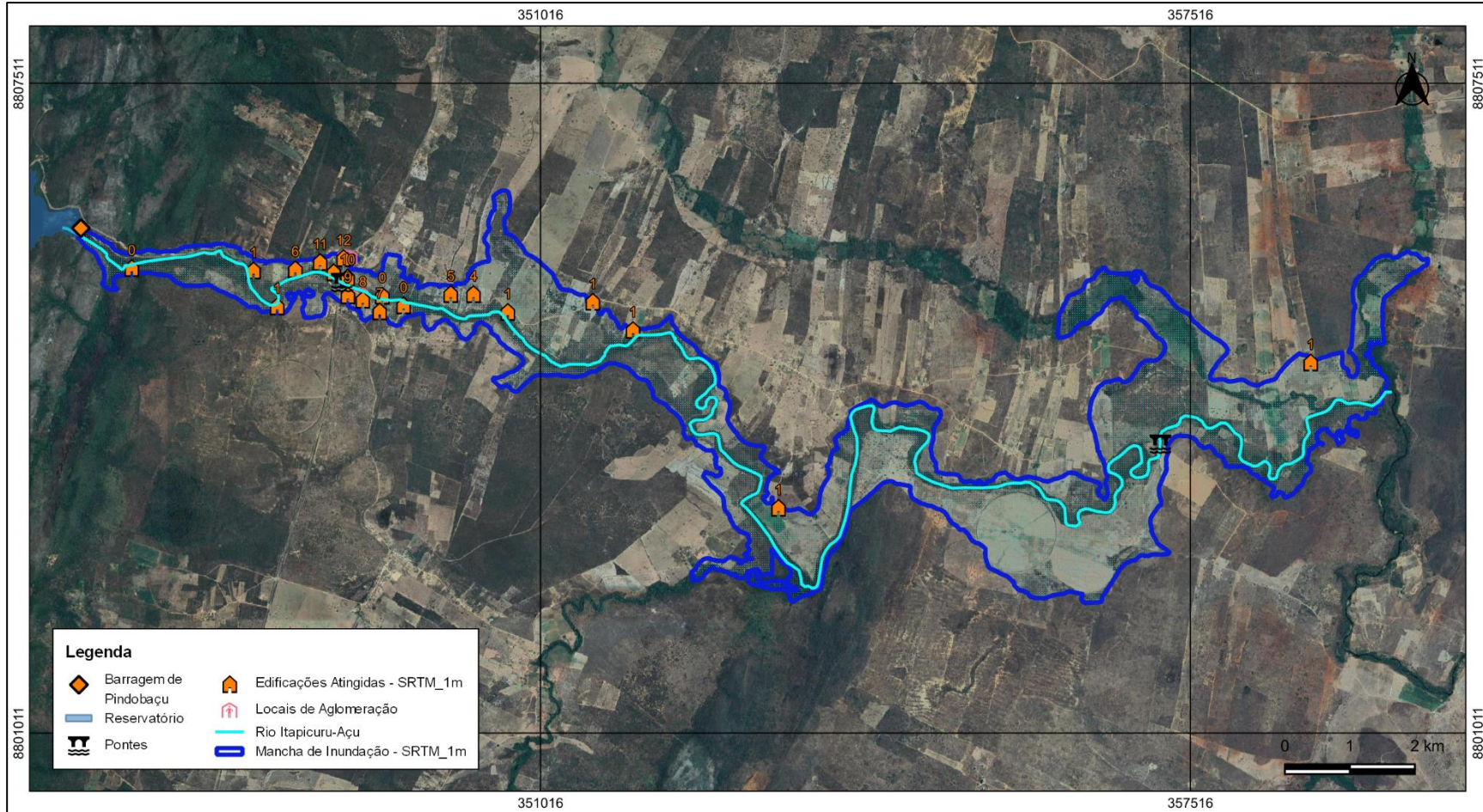
APÊNDICE E – Diferença entre as áreas das manchas de inundação para o cenário de ruptura mais provável

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

APÊNDICE F – Pontos vulneráveis mapeados na mancha de inundação – Simulação 01

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

APÊNDICE G – Pontos vulneráveis mapeados na mancha de inundação – Simulação 02



Fonte: Elaborado pela autora (2022).