



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Simulação de Rompimento da Barragem São Bento do Una através do Software HEC-RAS

Joao Pedro do Nascimento e Silva¹, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello², Tiago Barbosa da Silva³, Wesley Michael Pereira Silva⁴

¹Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru-PE. E-mail: jpnnds_2012@hotmail.com. ²Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (Caruaru-PE) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Email: isabelamcVBello@hotmail.com. ³Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru-PE. E-mail: tgbarbosa91@gmail.com. ⁴Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru-PE. E-mail: wesleymichaelpereira@hotmail.com.

Artigo recebido em 14/07/2021 e aceito em 06/03/2022.

RESUMO

Os danos associados ao rompimento de uma barragem são enormes, e devem ser evitados a todo custo, já que pode causar perdas de vidas humanas. Diversos estudos são realizados antes de sua construção a fim de evitar futuros desastres, dentre eles, destaca-se a determinação das áreas afetadas por um rompimento hipotético da barragem. Este artigo apresenta o resultado da simulação de ruptura da Barragem São Bento do Una, localizada no município de mesmo nome no interior de Pernambuco, por meio do modelo unidimensional de fluxo não permanente. Foi usada como base a geometria da área de estudo, elaborada por meio do *software* QGIS através da análise dos modelos digitais de terreno, disponibilizados pelo Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), e exportada para o *software* HEC-RAS. A partir dos resultados, foi determinada a região afetada, a vazão da água e profundidade, e foram criados mapas a fim de contribuir nos estudos para planos de contingência e mitigação de riscos. Verificou-se que o tempo decorrido para que a ruptura atingisse sua geometria final foi de 56 minutos após o início da simulação. A maior vazão de saída do reservatório aconteceu no minuto 56, onde 6672,72 m³/s de água são expelidos para fora do reservatório, diminuindo na medida que o nível d'água se aproxima da cota inferior da brecha de ruptura. O tempo gasto pela água para atingir a cidade de São Bento do Una, situada a cerca de 17 km da barragem, foi de aproximadamente 1 hora e 50 minutos.

Palavras-chave: Pernambuco Tridimensional, modelo digital, análise de risco, geoprocessamento.

Rupture Simulation of São Bento do Unas's Dam using HEC-RAS Software

ABSTRACT

The damage associated with dam rupture is enormous, and must be avoided at all costs, as it can cause loss of human life. Therefore, several studies are carried out before its construction in order to avoid future disasters. Among them, we highlight the determination of the areas affected by a hypothetical rupture of the dam. This article presents the result of the simulation of rupture of the São Bento do Una Dam, located in the municipality of the same name in the interior of Pernambuco, using the one-dimensional model of non-permanent flow. The geometry of the study area was used as a basis, elaborated using the QGIS software through the analysis of digital terrain models, made available by the Pernambuco Three-Dimensional Program (PE3D), and exported to the HEC-RAS software. From the results, the affected area, water speed and depth were provided, and then maps were created in order to contribute to studies for contingency plans and risk mitigation. It was found that the elapsed time for the rupture to reach its final geometry was 56 minutes after the start of the simulation. The highest outlet flow from the reservoir occurs in the 56th minute, where 6672.72 m³ / s of water is expelled out of the reservoir, decreasing as the water level approaches the lower level of the breach gap. The time taken by water to reach the city of São Bento do Una, located about 17 km from the dam, was approximately 1 hour and 50 minutes.

Keywords: Pernambuco three-dimensional, digital model, risk analysis, geoprocessing.

Introdução

As barragens são barreiras artificiais feitas em cursos de água para a retenção de grandes quantidades de água, e devem ser vistas como um todo no tempo ou nas atividades e uma unidade ou um todo orgânico no espaço (Mello, 1975). Entre as finalidades de uma barragem, tem-se abastecimento humano, dessedentação animal, abastecimento industrial, irrigação, geração de energia hidroelétrica, piscicultura, controle de cheias, regularização de rios, navegação, recreação e urbanização, contenção de rejeitos, dentre outros (Carvalho, 1983).

Acidentes com barragens são um problema mundial que vem acontecendo cada vez mais nas últimas décadas. De acordo com o Boletim 99 do CIGB (1995), 70% das rupturas ocorrem nos primeiros dez anos de vida da barragem. Por possuírem uma estrutura de grande porte, o seu rompimento pode provocar prejuízos econômicos, ambientais e perda de vidas humanas.

No Brasil, há um crescimento no quantitativo de pessoas que vem expondo-se aos riscos trazidos por rompimento de barragens de mineração (Freiras, Silva, Menezes, 2016). Alguns autores como Freitas e Silva (2019); Laschefski (2020); Armada (2021); e Silva (2021) discutem sobre as consequências trazidas por tais desastres, em que se destacam impactos econômicos, sociais, ambientais - fauna, flora, solo, água - e, mais gravemente, perdas humanas.

Em 2010, o Governo Federal do Brasil, devido ao aumento de casos de rompimento de barragens e à falta de uma legislação unificadora, sancionou a Lei Federal Nº 12.334 que estabeleceu a Política Nacional de Segurança das Barragens (PNSB) e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) (Pereira et al., 2021). Em seu texto, a lei não cita diretamente a mancha de inundação que seria provocada pelo rompimento da barragem, mas regrou que um dos instrumentos da PNSB seria a classificação por categoria de dano potencial associado, considerando a quantidade de vidas humanas perdidas e os impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem (BRASIL, 2010).

Outro instrumento da PNSB é o Plano de Segurança de Barragens (PSB), que entre os itens básicos necessários impôs a necessidade da elaboração de um Plano de Ação de Emergência (PAE), quando exigido, e delegou o nível de detalhamento dos itens básicos do PSB para serem estabelecidos pelo órgão fiscalizador (BRASIL, 2010).

Em 2017, a Agência Nacional das Águas (ANA), através da Resolução Nº 236, estabeleceu

o nível de detalhamento do PSB para barragens fiscalizadas por ela. Em congruência com a Lei Federal Nº 12.334, a resolução colocou entre os itens básicos do PSB a classificação da barragem quanto ao dano potencial associado e delimitou duas classes de barragens que precisariam preparar um PAE que contenha, entre outros itens, uma síntese do estudo de inundação proveniente do rompimento da barragem.

Por conta do grande risco ligado a uma estrutura de barragem, vários estudos devem ser feitos durante a elaboração do projeto, com o intuito de prevenir e evitar ao máximo danos futuros, um deles é o Plano de Ação de Emergência (PAE), que abrange todas as ações a serem tomadas em emergências e considerado indispensável sua efetiva aplicação (Costa et al., 2019).

Uma simulação computacional de rompimento de uma barragem é um processo que exige dados hidrológicos e topográficos. Para determinar a mancha de inundação é necessário simular, por meio de modelos hidráulicos, a ruptura da barragem que pode ocorrer gradual ou instantaneamente (Faria, 2019). Porém, para a simulação, é fundamental a inserção de dados referentes à topografia da região a ser modelada, descrevendo a geometria do sistema de cursos d'água (Lauriano, 2009). Tais dados são de grande relevância à modelagem, pois, caso sejam mal inseridos, a precisão do modelo pode ser reduzida de forma significativa (Colucci, 2017).

Dentre as tecnologias topográficas que merecem destaque, tem-se o perfilamento a laser em que é realizado uma varredura de pontos na superfície do terreno, obtendo com rapidez e qualidade dados espaciais, sendo possível o mapeamento de corpos de água nas proximidades da costa e não muito profundos (Silveira e Oliveira, 2019). O processo de perfilamento a laser é conhecido mundialmente como Light Detection and Ranging - LiDAR e consiste na utilização de um pulso de laser na direção do terreno para obtenção de coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície (Baltasavias, 1999).

O estado de Pernambuco, através do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) utilizando tecnologia LiDAR, disponibiliza cerca de 75 bilhões de pontos (com coordenadas planimétricas e altimétricas) cotados e imagens aéreas, isso corresponde a cerca de um ponto a cada 1,3 m² de todo o território de pernambucano, bem como, Modelos Digitais do Terreno e Elevação (MDT's e MDE's) para auxiliar o desenvolvimento de estudos para modelagem do comportamento hidrodinâmico e planejamento urbano.

O presente artigo apresenta uma simulação

da ruptura da Barragem São Bento do Una, realizada no software HEC-RAS, por meio do modelo unidimensional de fluxo não permanente, a partir dos dados topográficos disponibilizados pelo Programa Pernambuco Tridimensional, com a finalidade de contribuir nos estudos para planos de contingência e mitigação de riscos.

Materiais e métodos

Área de estudo

O município de São Bento do Una está localizado na região do Agreste, na Microrregião

Vale do Ipojuca e na Região de Desenvolvimento Agreste Central do Estado de Pernambuco (Figura 1). Ocupa uma área total de 726,96 km², representando 0,74% da área total de Pernambuco, estando inserido na mesorregião do Agreste, na Microrregião Vale do Ipojuca e na região de desenvolvimento Agreste Central do Estado de Pernambuco, no entorno das coordenadas geográficas de latitude – 8°31'22" Sul e longitude – 36°26'40" Oeste, com altitude média de 650 m. A área onde será construída a barragem

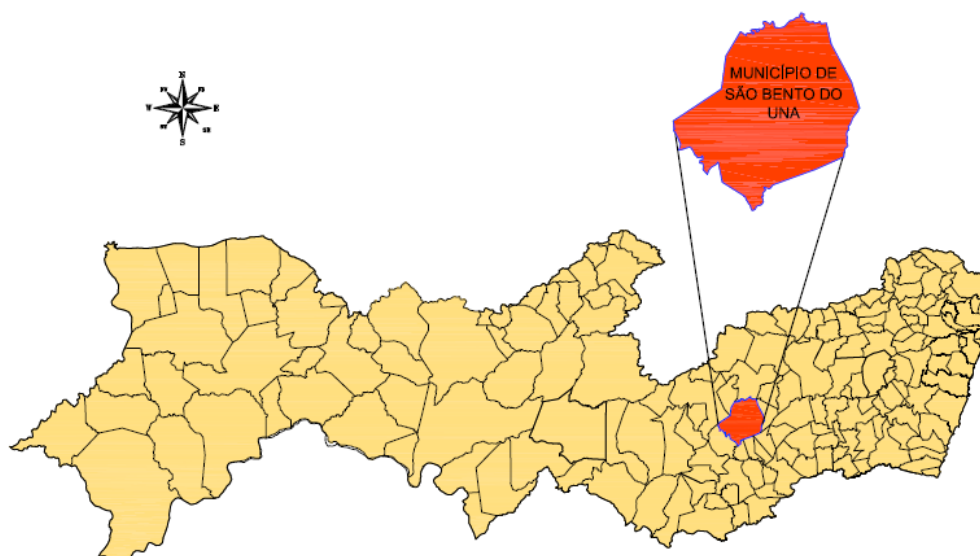


Figura 1. Localização do município de São Bento do Una (Fonte: Adaptada de ITEP, 2015).

São Bento do Una possui características físico-naturais e antrópicas bem particulares, que são: regime hidrológico deficiente, insuficiência de água para atividades da cadeia produtiva local, regime climático seco e limitações ao crescimento socioeconômico da área. Estas características influenciam a ocorrência dessa região ser uma zona que predomina a caatinga, como também influenciam para que o uso das terras seja voltado para a pecuária de corte e leite e criação de aves (ITEP, 2015).

De acordo com a Secretaria de Infraestrutura do Governo do Estado de Pernambuco (SEINFRA), o eixo da barragem ficará situado a aproximadamente 17 km da cidade de São Bento do Una, e tem como coordenadas em relação ao sistema de referência cartográfica SIRGAS 2000 UTM 24S: 9.047.889,721 N e 767.689,900 E, para a ombreira esquerda e 9.048.114,744 N e 768.623,155 E, para a ombreira direita; e poderá ter uma altura máxima de 691 m. Segundo estudos hidrológicos, para a cheia deca milenar, a cota de água no reservatório atinge os

689,69 m correspondente a um volume acumulado de cerca de 26×10^6 m³ (ITEP, 2015).

Na Figura 2 está destacada a localização do eixo do barramento. Apesar do eixo barrável estar situado no rio Una, duas importantes bacias hidrográficas fazem parte do município de São Bento do Una. O rio Ipojuca constitui 10,8% da área do município e o rio Una ocupa 89,2% da área (ITEP, 2015).

Segundo o relatório dos Estudos Topográficos e relatório dos Estudos Geotécnicos / Geológicos realizado pela SEINFRA, a solução mais viável para a Barragem São Bento do Una seria uma barragem de Terra/Enrocamento, e com os parâmetros de acordo com a Tabela 1.

A ruptura de barragem pode acontecer de forma abrupta ou gradativa dependendo do que causou a falha e do tipo de barragem. Para as de terra, a adoção de um rompimento súbito não é uma suposição realista, já que ele ocorre de maneira mais lenta, normalmente levando algumas horas para chegar ao estado final da brecha (Visher, 1997).

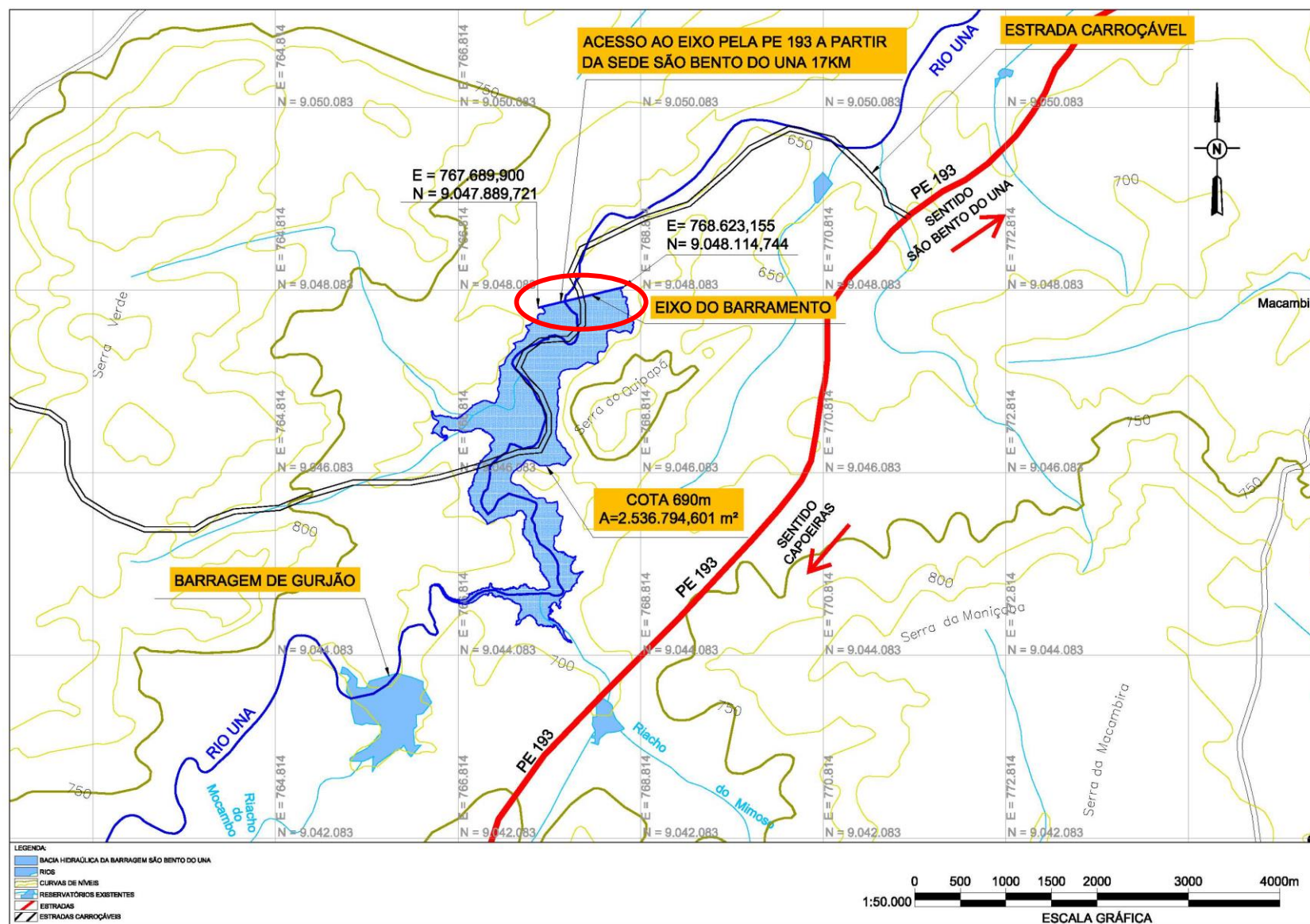


Figura 2. Localização do eixo da barragem (Fonte: SEINFRA/PE, 2014).

Tabela 1. Configuração da Barragem São Bento do Una.

PARÂMETRO	VALOR
Área da bacia de contribuição total	186,52 km ²
Cota de tomada d'água	658,00 m
Largura máxima estabelecida para o sangradouro	140,00 m
Tipo estabelecido de sangradouro	Creager
Cota da soleira do vertedouro	686 m
Capacidade de armazenamento	17,77 x 10 ⁶ m ³

Fonte: SEINFRA/PE (2014).

Equações e materiais

A preparação e metodologia necessária para simulação do modelo unidimensional de fluxo não permanente possuem várias etapas, que são realizadas por meio de diferentes softwares. Na Figura 3 está apresentado o fluxograma dos passos executados para a simulação.

A análise da área de estudo foi feita por meio de simulações no software Hydrologic

Engineers Corps – River Analysis System (HEC-RAS), que é um programa gratuito criado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Atores como Agudelo-Otálora et al., (2018), Raman e Liu (2019), Vieira et al., (2019), Cabral et al., (2019), utilizaram o software no estudo de rompimento de barragem e determinação de área de inundação.

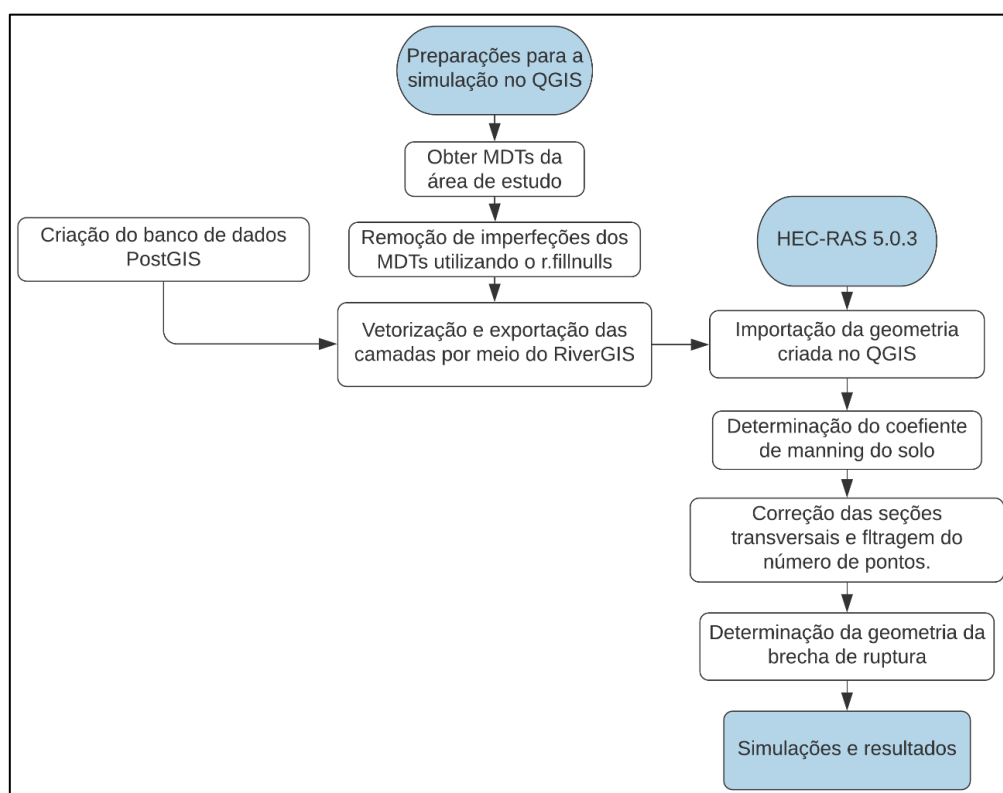


Figura 3. Fluxograma da metodologia utilizada na simulação (Fonte: Autores, 2021).

Para simular o escoamento unidimensional de fluxo não permanente, o programa utiliza as equações completas de Saint Venant, a de continuidade e a de dinâmica, apresentadas respectivamente nas Equações 1 e 2.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} + v \frac{q}{A} = g(S_o - S_f) \quad (2)$$

Onde: A é a área da seção transversal, t o tempo, Q a vazão, x a distância longitudinal no

canal, q vazão de contribuição lateral, v a velocidade da água, g a aceleração da gravidade, y a profundidade da água, S_o é a declividade do fundo do rio e S_f a declividade da linha de energia.

Além das Equações 1 e 2, para a simulação é necessária a criação da geometria do terreno ao longo do rio e do reservatório, e também o coeficiente de rugosidade de Manning, que é usado para descrever a resistência exercida pelo canal sobre o escoamento. Foram usados como base para a criação da geometria da região de estudo modelos digitais de terreno (MDT), que são modelos numéricos gerados a partir do processamento de imagens aéreas e representam a cota relativa do terreno, onde é representada a superfície da área levando em consideração suas altitudes, apresentando as cotas do terreno sem considerar os demais objetos acima do nível do solo.

O resultado da simulação é dependente da qualidade dos modelos digitais de terreno, já que a maioria dos dados necessários são obtidos através deles, portanto é de suma importância obter modelos da mais alta qualidade.

Nesse trabalho foram utilizados os modelos digitais de terreno disponibilizados pelo Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), que mapeou todo o território do estado de Pernambuco através da tecnologia LiDAR, onde é realizada uma varredura de pontos na superfície do terreno através do perfilamento a laser, que consiste na utilização de um pulso de laser na direção do terreno para obtenção de coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície (Baltsavias, 1999).

Os MDTs usados para auxiliar no desenvolvimento da modelagem do comportamento hidrodinâmico deste trabalho apresentam uma precisão altimétrica melhor que 25 cm. Levando em consideração o tamanho total da área de estudo, os dados possuem grande precisão e alta qualidade para realizar a simulação.

Criação da geometria

Para a elaboração do modelo de simulação unidimensional de fluxo não permanente no HEC-RAS 5.0.3, é necessário criar uma geometria com caracterização das seções transversais da região de estudo, para isso foi utilizado o software QGIS 2.18.14, que é um software livre com código-fonte aberto, multiplataforma de sistema de informação geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados. Foi realizado o tratamento prévio dos MDTs com a ferramenta de processamento *r.fillnulls*, que preenche áreas sem dados planialtimétricos por meio de interpolação.

Com o material já corrigido, a geometria foi determinada no QGIS, com o auxílio do complemento RiverGIS, que é um plugin gratuito para criação geométrica de modelo de fluxo HEC-RAS a partir de dados espaciais. Para sua utilização é necessário um banco de dados PostGIS para o armazenamento de dados e operações espaciais. PostGIS é um extensor de banco de dados espacial para PostgreSQL. Ele adiciona suporte para objetos geográficos, permitindo que consultas de localização sejam executadas em SQL.

Por meio do RiverGIS, foram criadas as camadas necessárias para a geometria do modelo de simulação unidimensional de fluxo não permanente. Abaixo estão listadas as camadas que foram vetorizadas

- StreamCenterlines: vetorização do eixo do rio, indicando a topologia e atributos;
- Bank Lines: vetorização das margens do rio a jusante do eixo da barragem;
- XSCutLines: vetorização das seções perpendiculares ao fluxo, com largura entre 2000 e 4000 m, dependendo da seção do rio, e com equidistância entre 200 e 400 m aproximadamente;
- Flowpaths: vetorização da área prevista para o fluxo de água durante a simulação;
- InlineStructure: vetorização do eixo da barragem;
- StorageAreas: vetorização do reservatório a montante do eixo da barragem por meio de polígono.

A Vetorização das camadas foi feita partindo do reservatório, passando pelo eixo da barragem e seguindo o curso do Rio Una até a cidade de São Bento do Una. O resultado final da geometria gerada no QGIS está apresentado na Figura 4.

A largura relativa à vetorização das seções perpendiculares do fluxo do rio foi definida com base em simulações realizadas pelo autor anteriormente, onde para valores menores que 1500 m, o nível d'água máximo atingido durante a simulação excedia o limite da seção e a área prevista para o fluxo de água, causando transbordamento com relação à geometria.

Todos os dados necessários para gerar a geometria de simulação foram calculados, a partir do MDT, e gravados nas camadas vetorizadas por meio do complemento RiverGIS. Por fim, a geometria foi exportada para o HEC-RAS, e o resultado está representado na Figura 5.

A nomenclatura das seções no programa é dada pela distância entre ela e o final da geometria do rio em metros, ou seja, a seção 16979.79 está

situada a 16979,79 m do fim da geometria.

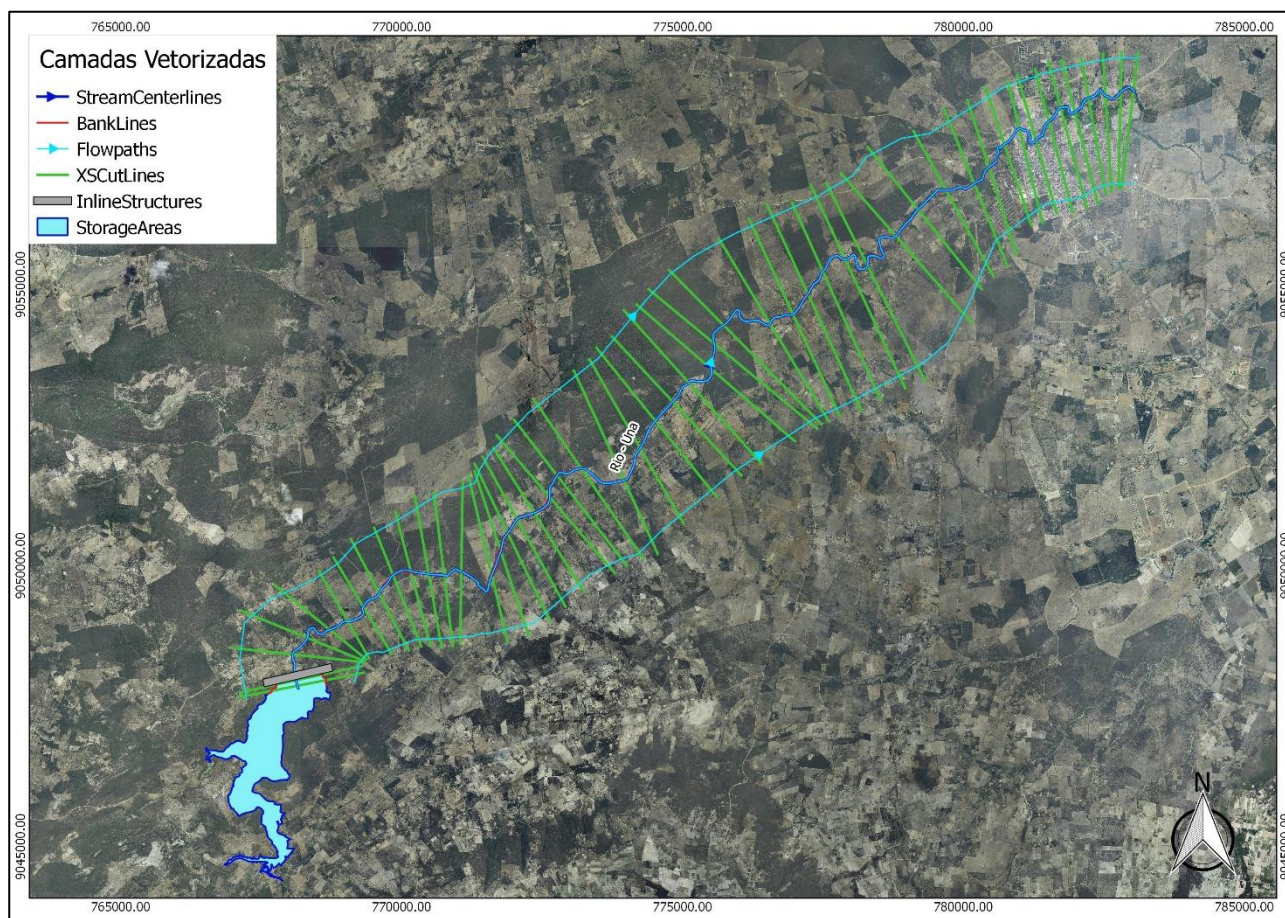


Figura 4. Geometria vetorizada no QGIS para a simulação (Fonte: Autores, 2021).

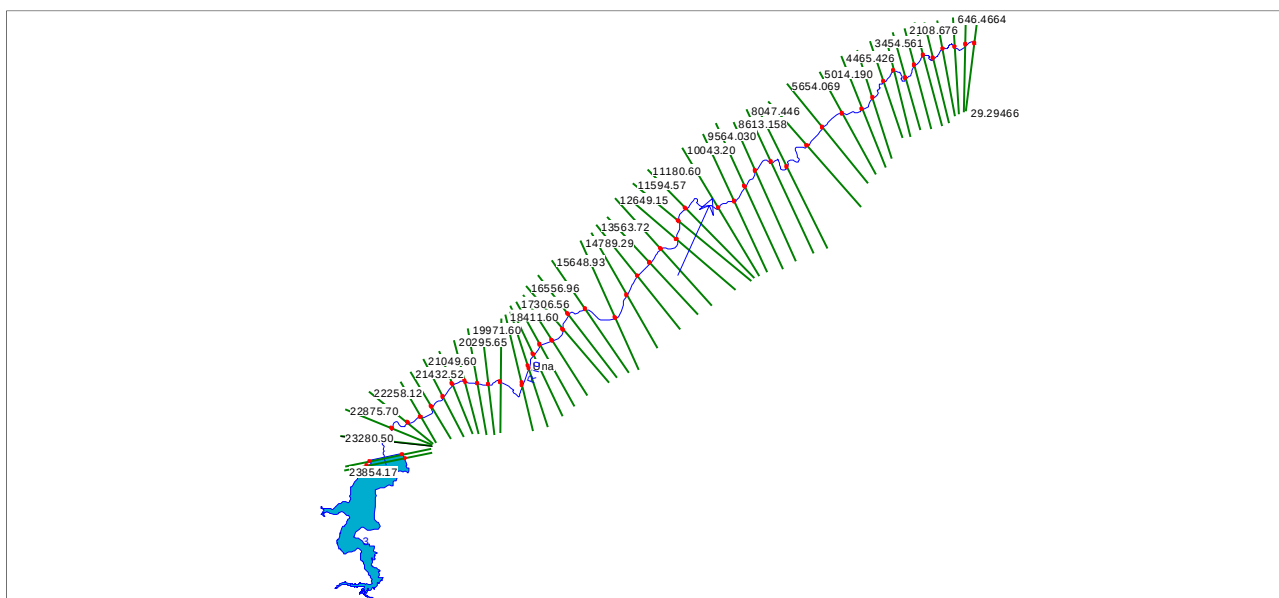


Figura 5. Geometria inserida no HEC-RAS (Fonte: Autores, 2021).

Edição de geometria no HEC-RAS

Após importada a geometria criada no QGIS, foram realizadas as preparações para a simulação. Inicialmente, adotou-se os coeficientes

de rugosidade de Manning para as áreas às margens esquerda, direita e no leito do rio. Os valores do coeficiente são calibrados visando, principalmente, evitar problemas com instabilidade numérica conforme (Neto, 2015). Dessa forma, o valor mais

apropriado foi 0,055 para o canal principal e para a planície de inundação adjacente ao rio.

Em seguida foi realizada a interpolação das seções transversais ao longo do rio, utilizando uma ferramenta do próprio HEC-RAS, com a finalidade de melhorar o detalhamento da geometria. Foi realizada a interpolação a cada 50 m, onde as seções em verde escuro são as originais, e as em verde claro são as interpoladas (Figura 6).

Com o objetivo de melhorar ainda mais a geometria, todas as seções transversais foram verificadas manualmente, a fim de corrigir o posicionamento de alguns pontos referentes às margens do rio. Também foram colocados os pontos denominados Levees, que são usados para definir a calha principal do rio, portanto foram inseridos em pontos de maior elevação.

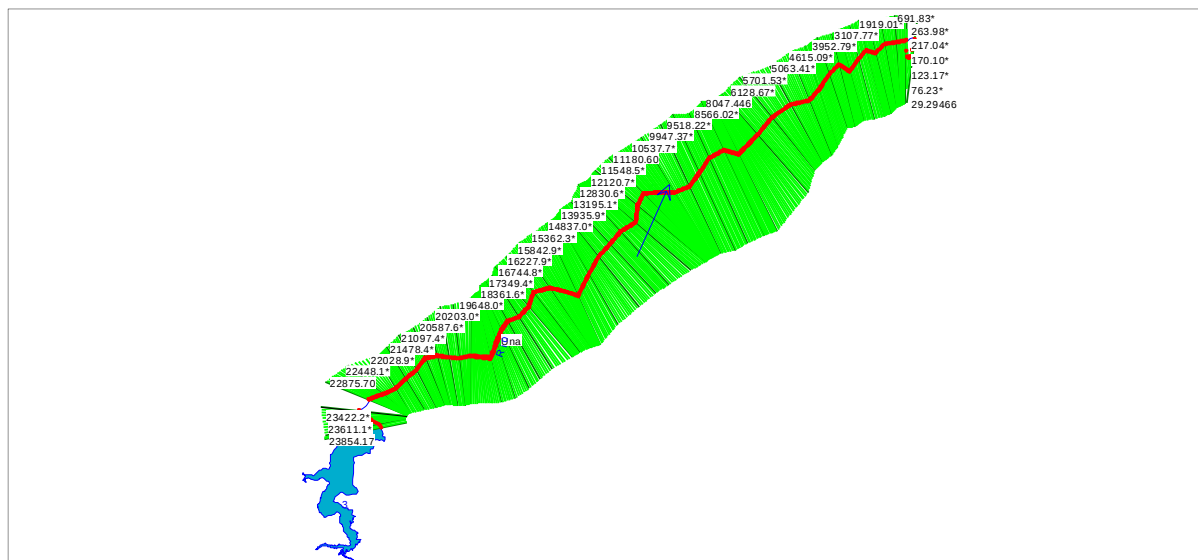


Figura 6. Geometria com seções interpoladas a cada 50 metros (Fonte: Autores, 2021).

Nas Figura 7 e 8 estão apresentadas, respectivamente, a seção 16979.79 antes e depois da correção. Os pontos em vermelho são referentes às margens do rio, e os pontos em rosa são referentes às Levees.

Após a correção, deve-se filtrar os pontos de cada uma das seções transversais, eles não podem exceder a quantidade de 500 pontos por seção, trata-se de uma limitação do software. A

filtragem deve ser realizada excluindo os pontos em excesso localizados na planície de inundação adjacente ao rio, para que o detalhamento da calha não sofra alterações. A exclusão de pontos das seções deve ser realizada com cautela, já que pode ocasionar em uma grande alteração em relação a geometria, caso ela não possua um grande detalhamento.

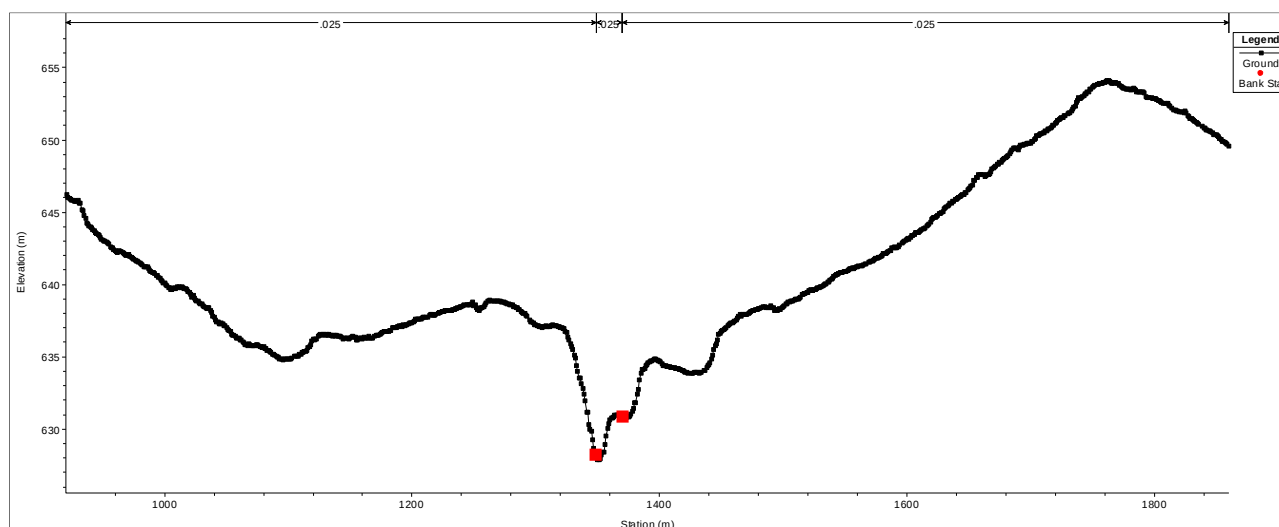


Figura 7. Seção 16979.79 sem correção.

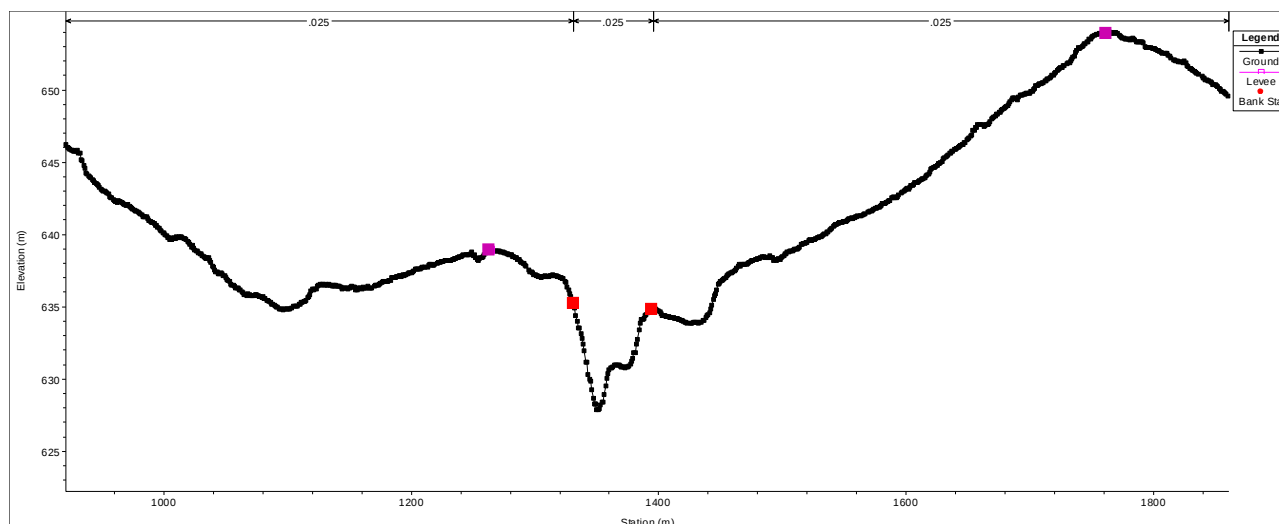


Figura 8. Seção 16979.79 após correção das margens do rio e levees (Fonte: Autores, 2021).

Nesse trabalho foram utilizados modelos digitais de terreno com uma precisão satisfatória ao desenvolvimento da simulação executada, com erro máximo altimétrico melhor que 25 cm, portanto não houve alterações quanto a geometria das seções após a filtragem dos pontos, conforme

pode ser observado na Figura 9, que apresenta a seção 16979.79 já filtrada.

Comparando as Figuras 8 e 9, antes de depois da filtragem, percebe-se que não houve alteração com relação a geometria geral da seção.

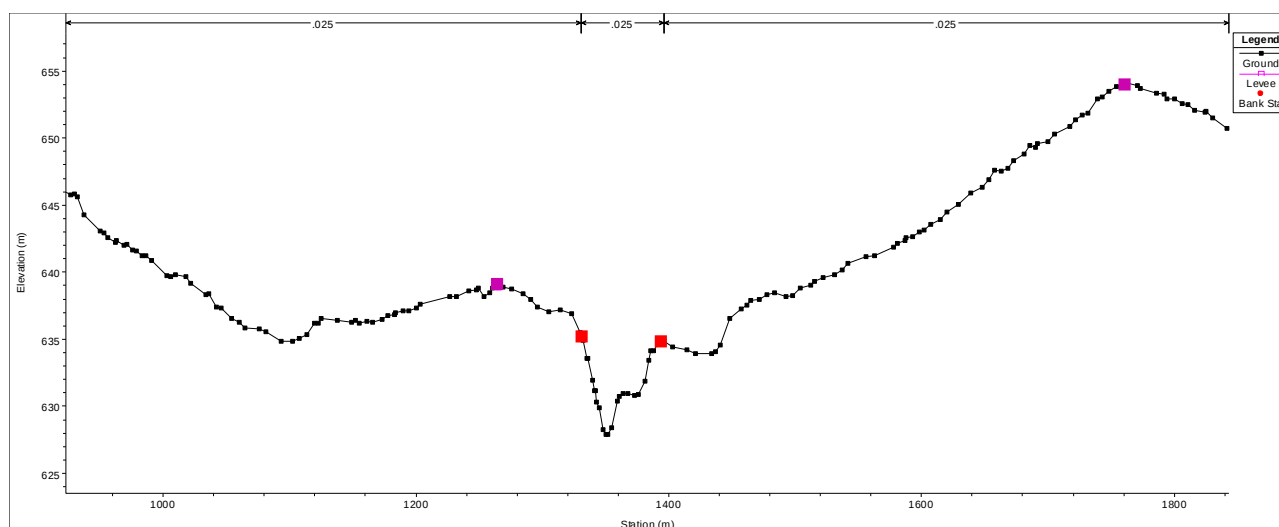


Figura 9. Seção 16979.79 com filtragem dos pontos (Fonte: Autores, 2021).

O último passo da edição de geometria é quanto a estrutura de barramento do reservatório, onde são inseridas as informações geométricas da barragem e do vertedouro. Os dados utilizados nessa etapa foram obtidos no relatório técnico preliminar e projeto básico para a implantação da barragem.

Os parâmetros da geometria da brecha estão entre os que apresentam maiores incertezas durante os estudos de ruptura (Brunner, 2014).

De acordo com Perini (2009), para se estimar os parâmetros da brecha geralmente utiliza-se da avaliação de casos similares; utilização de

equações de previsão, formuladas a partir de estudos de caso de rupturas; utilização de modelos reduzidos e a utilização de modelos matemáticos que se baseiam em princípios hidráulicos e de transporte de sedimentos.

A brecha na estrutura de barramento é determinada pelo HEC-RAS por meio de equações desenvolvidas através de metodologias empíricas em barragens de terra e de enrocamento. Dentre equações presentes no programa destacam-se as de MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), Von Thun e Gillette (1990), Froehlich (1995), Froehlich (2008), e Xu e Zhang (2009). Dentre as cinco

metodologias mencionadas, as de Froehlich estão entre as mais conhecidas. Na Tabela 2 estão apresentadas as suas equações, onde: $B_{méd}$ a largura média da brecha (m), h_b a altura da brecha

(m), V_w o volume do reservatório no momento da ruptura (m^3), K_0 uma constante que varia com o tipo de rompimento, g a aceleração da gravidade (m/s^2) e t o tempo de formação da brecha (s).

Tabela 2. Equações empíricas de Froehlich para a brecha de ruptura.

METODOLOGIAS	Nº DE CASOS	BRECHA	TEMPO DE FORMAÇÃO
Froehlich (1995)	63	$B_{méd} = 0,1803 * K_0 * V_w^{0,32} * h_b^{0,19}$	$t = 0,00254 * V_w^{0,53} * h_b^{-0,90}$
Froehlich (2008)	74	$B_{méd} = 0,27 * K_0 * V_w^{0,32} * h_b^{0,04}$	$t = 63,2 * \sqrt{\frac{V_w}{gh_b^2}}$

Fonte: Adaptado de Brunner (2014).

Como a metodologia de Froehlich (2008) possui o maior número de casos de estudo, ela foi utilizada para determinar brecha de ruptura para a simulação do rompimento da barragem da barragem no HEC-RAS.

Aplicando os parâmetros da configuração da Barragem São Bento do Una (Tabela 1) à metodologia de Froehlich (2008), foi obtida a estrutura de barramento e a brecha para simulação, destacada em vermelho, conforme apresentadas na Figura 10.

Simulação no HEC-RAS

Após a edição do modelo geométrico, foram determinadas as condições de contorno para a simulação. Considerou-se a declividade do canal de 0,00260 m/m, obtida no próprio software através do perfil longitudinal do rio, e a abertura do vertedor para cada intervalo de computação durante a simulação. Com as condições de escoamento determinadas, realizou-se a simulação para cheia deca milenar, situação mais crítica, onde a cota de água no reservatório atinge 689,69 m.

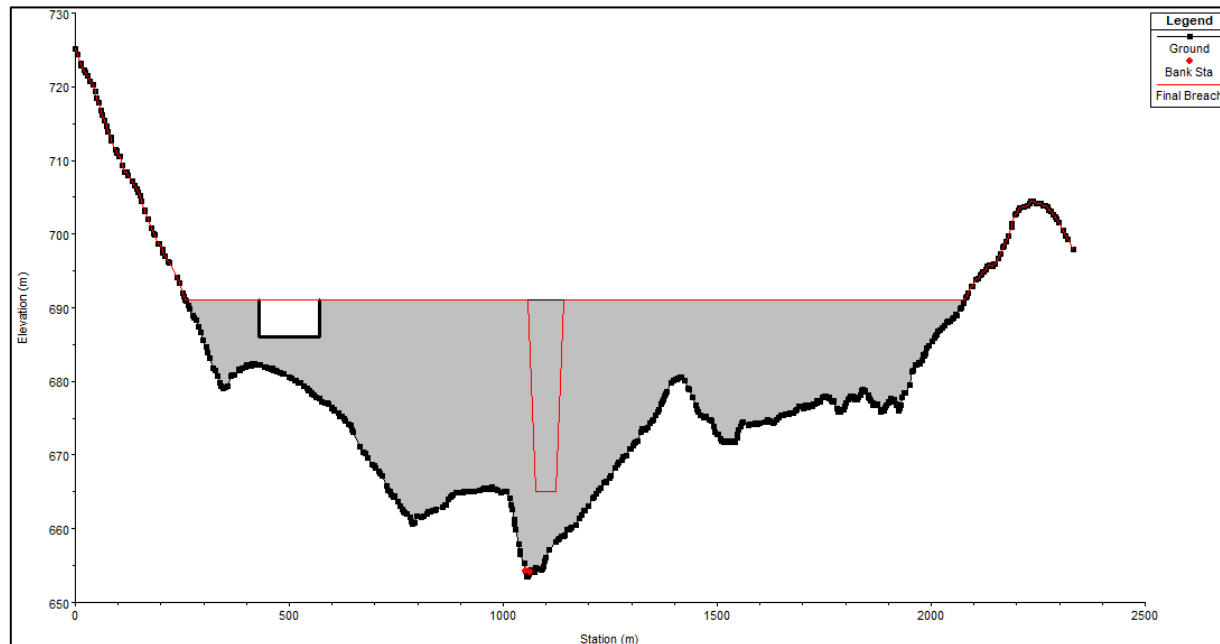


Figura 10. Estrutura de barramento e brecha de simulação.

Resultados

Após a simulação de rompimento da barragem São Bento do Una, veremos nesta seção os resultados obtidos. Inicialmente foi realizada a análise da seção longitudinal do rio (Figura 11).

Os resultados mostram que o nível d'água

máximo nas seções variou entre 12,85 m na seção 22875.70, e 6,39 m na seção 76.23, onde os valores mais altos se concentram nas proximidades da barragem e decrescem de acordo com a distância. Com relação a última seção, final da geometria do rio criada para a simulação, foi obtido um valor de

nível d'água máximo atingido de 6,73 m, isso quer dizer que a onda de propagação de inundação

continuará mesmo após atingir a cidade de São Bento do Una.

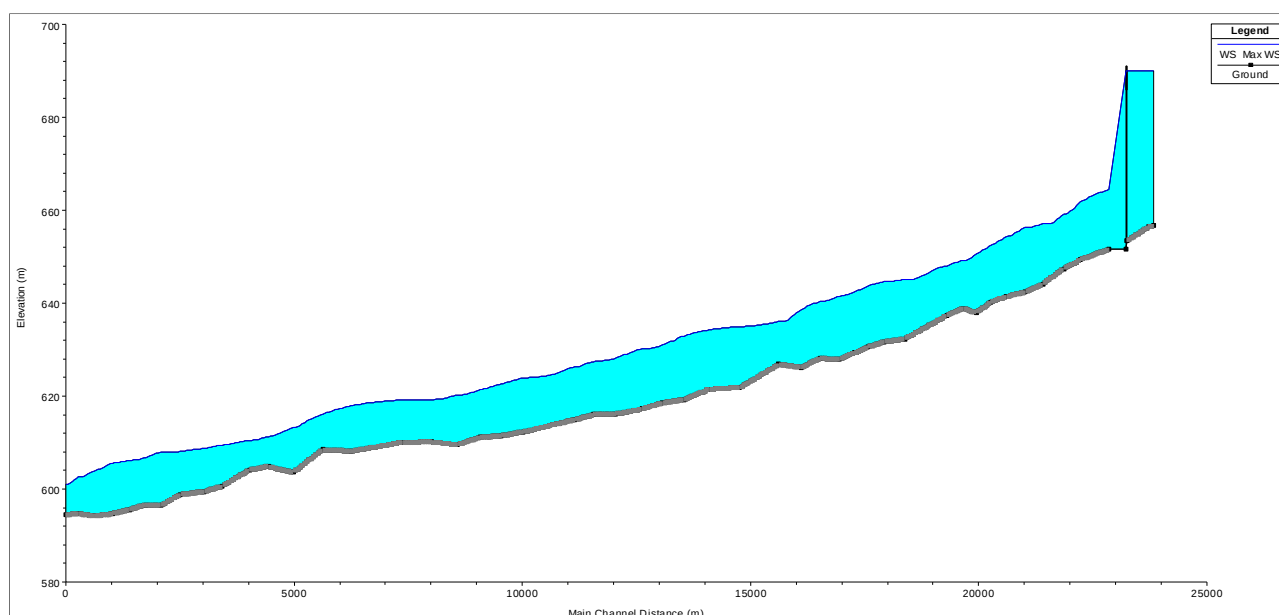


Figura 11. Perfil longitudinal do rio com o nível d'água máximo atingido na simulação.

Nas Figuras 12 e 13 estão apresentadas as seções com o maior e menor nível d'água máximo atingido, respectivamente. Analisando as demais seções, observou-se que em nenhuma delas houve o transbordamento do nível d'água, portanto a

largura adotada durante a vetorização das XSCutLines foi satisfatória, tendo em vista o problema enfrentado em simulações anteriores, onde diversas seções transbordaram e comprometeram os resultados.

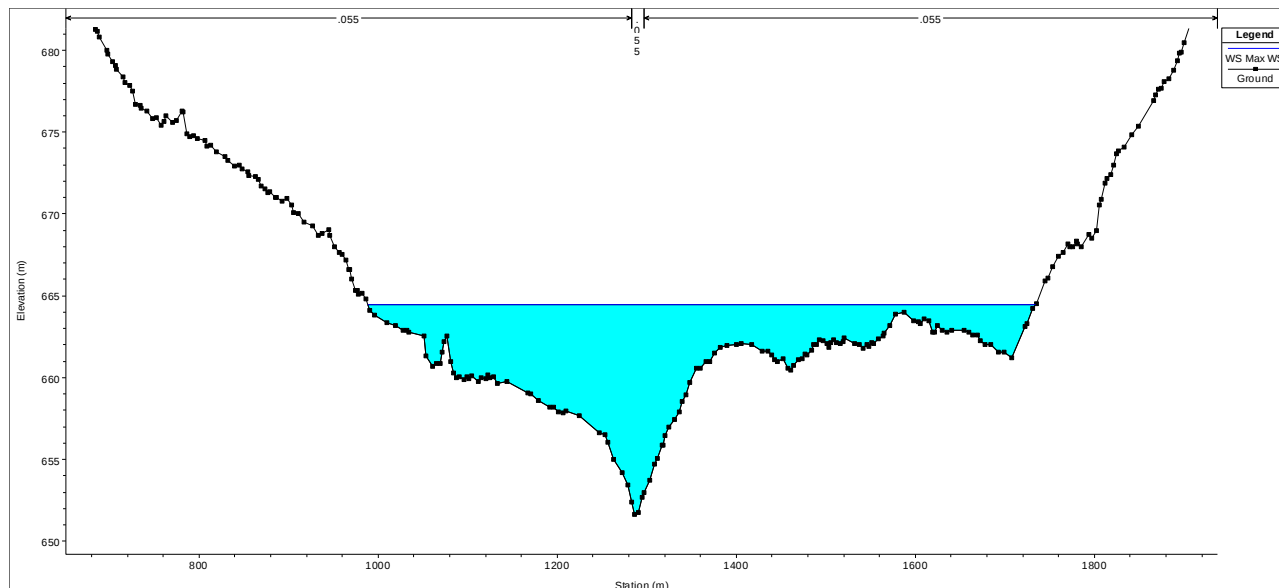
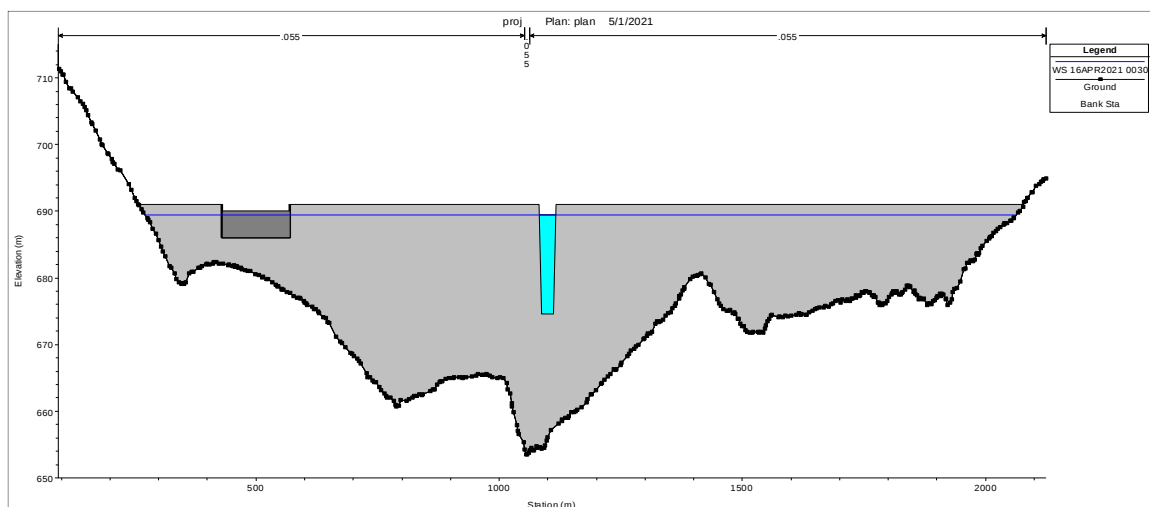
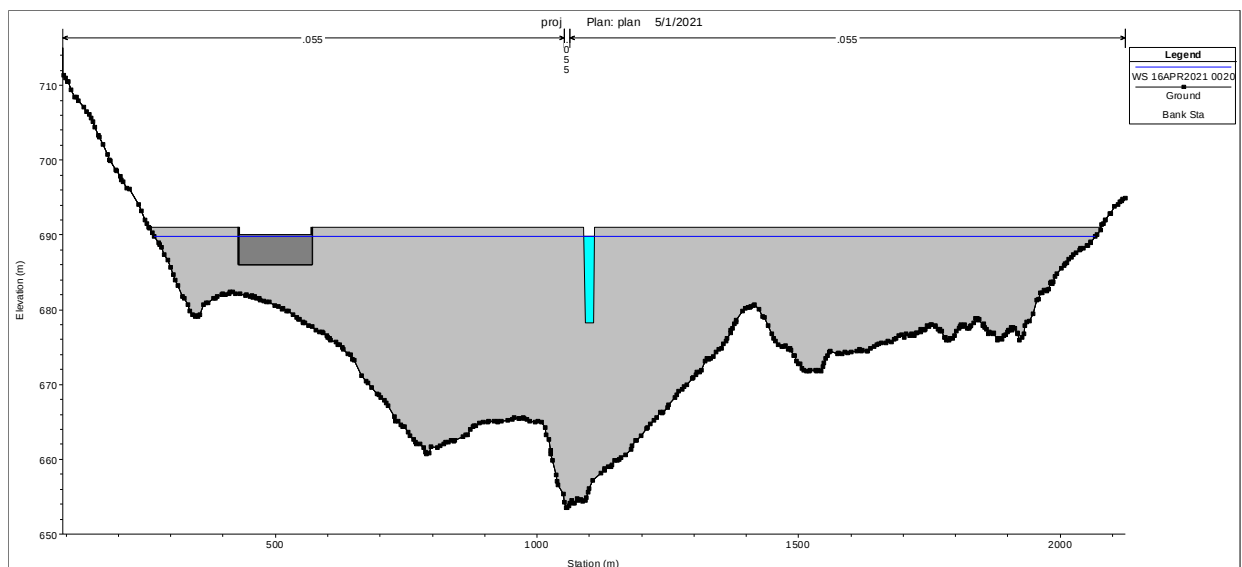
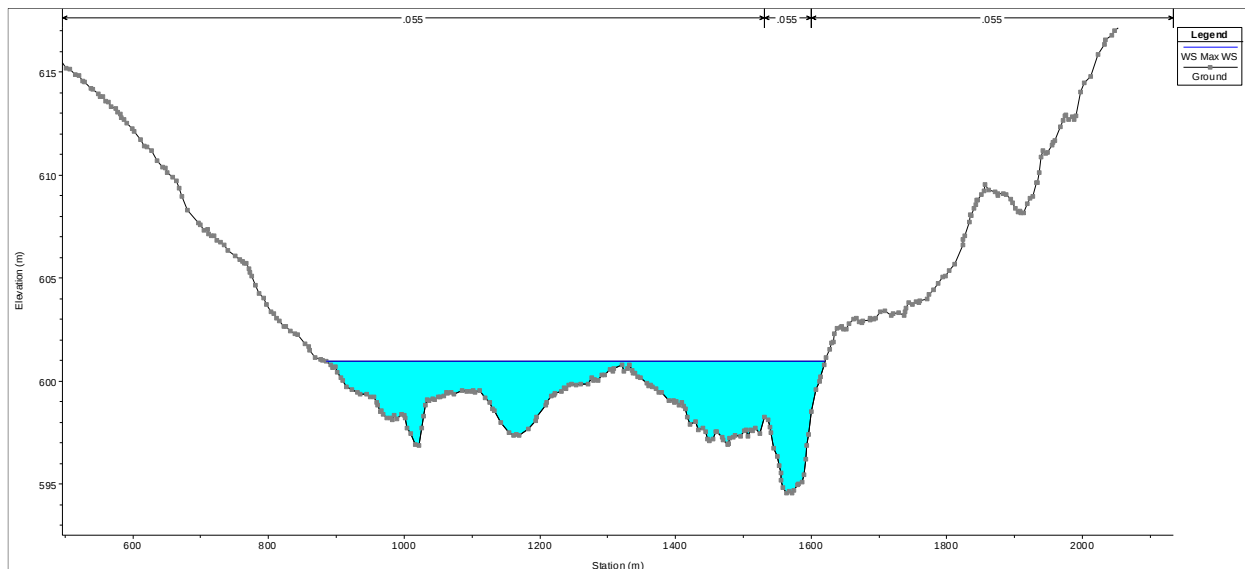


Figura 12. Resultado da simulação na seção de maior nível d'água máximo - Seção 22875.70 (Fonte: Autores, 2021).

Nas Figuras 14 a 16, estão apresentadas a progressão da ruptura da barragem em relação ao tempo de simulação decorrido, considerando um intervalo de tempo de 15, 30 e 45 minutos.

De acordo com os comportamentos apresentados foi possível verificar que o tempo

decorrido para que a ruptura atingisse sua geometria final foi de 56 minutos após o início da simulação (Figura 17). A linha do nível d'água, foi baixando de forma mais rápida de acordo com a área da brecha na barragem.



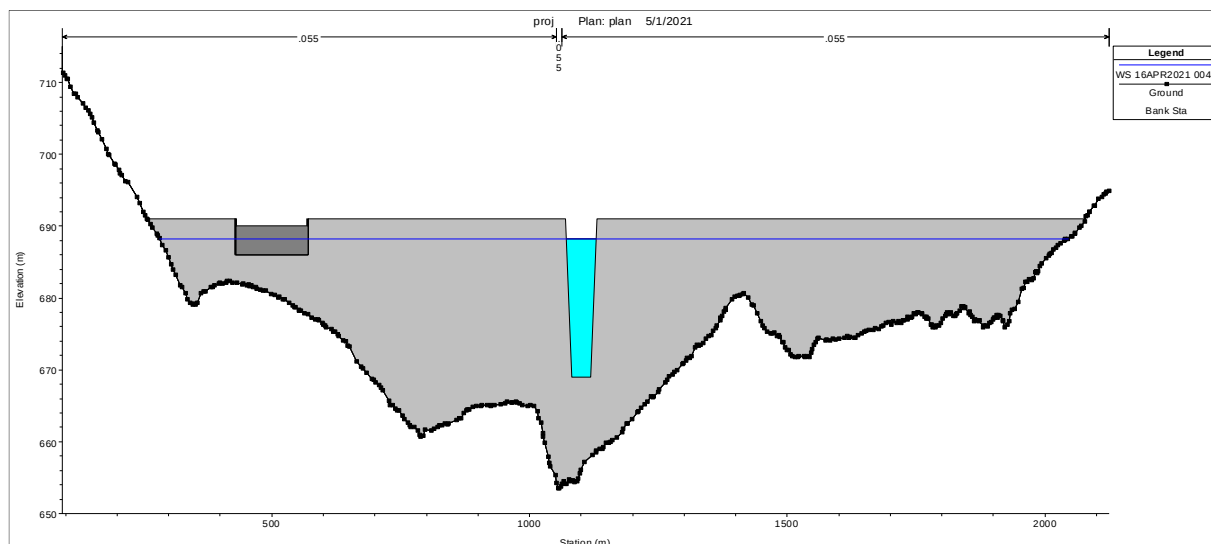


Figura 16. Progressão da ruptura com tempo decorrido de 45 minutos .

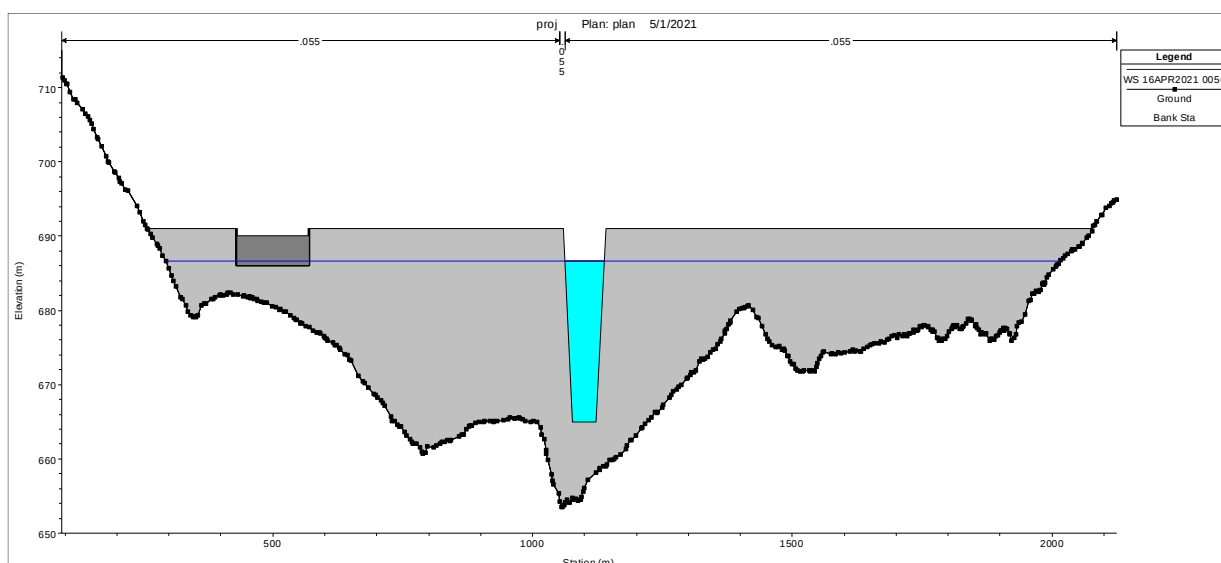


Figura 17. Geometria final da ruptura com tempo decorrido de 56 minutos.

Na Figura 18 está apresentada a variação no nível d'água no reservatório com relação ao tempo de simulação. Percebe-se, que a uma maior

variação quanto ao nível d'água no reservatório ocorre após 56 minutos do início da simulação.

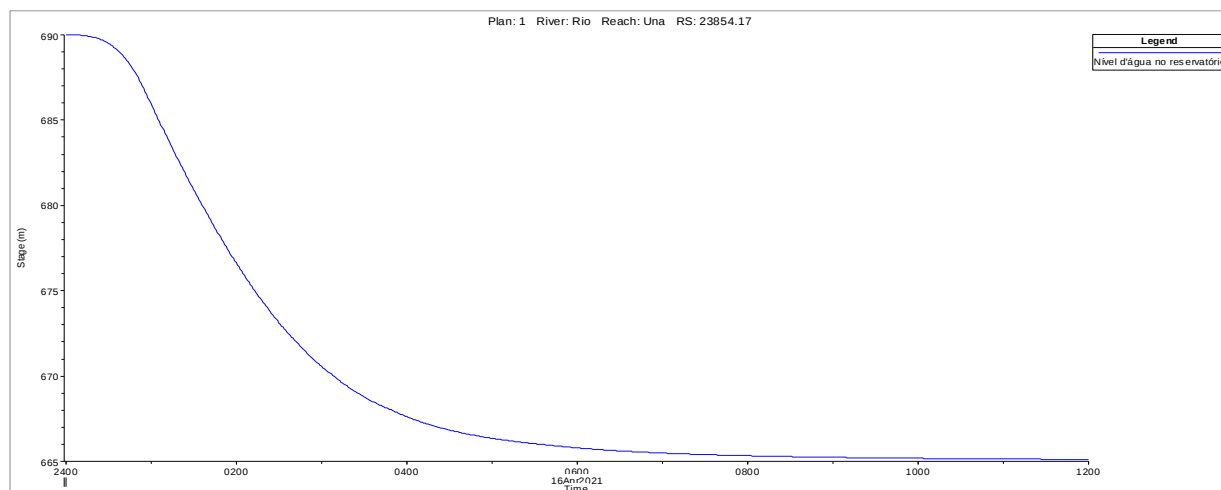


Figura 18. Variação do nível d'água da barragem em função do tempo de simulação (Fonte: Autores, 2021).

De acordo com os resultados no *HEC-RAS*, a maior vazão de saída do reservatório acontece justamente no minuto 56, onde 6672,72 m³/s de água são expelidos para fora do reservatório. Esse valor diminui de forma rápida, e à medida que o nível d'água se aproxima da cota inferior da brecha de ruptura, 665 m, a vazão de água lançada para fora do reservatório tende a 0.

Durante a análise dos resultados da

simulação, verificou-se que o tempo gasto pela água para atingir a cidade de São Bento do Una, situada a cerca de 17 km da barragem, foi de 1 hora e 50 minutos.

Na Figura 19 está apresentado o mapa com a mancha de inundação e com a legenda em relação ao nível d'água. Na Figura 20, estão apresentadas as áreas afetadas pela água, especificamente na cidade de São Bento do Una.

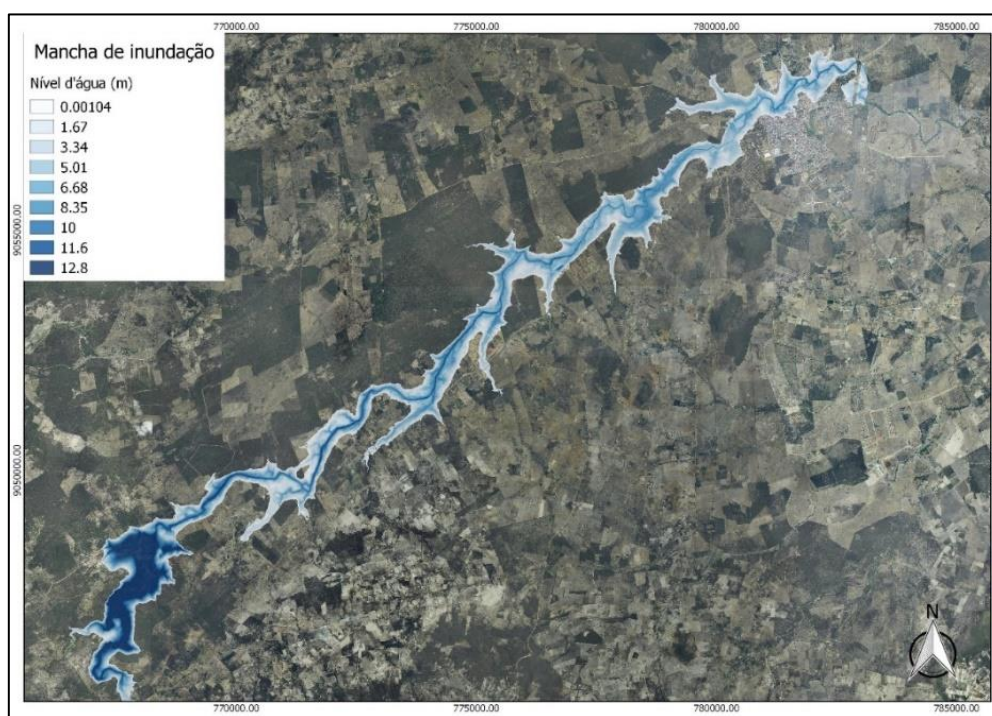


Figura 19. Mapa da mancha de inundação gerada pela simulação do rompimento da barragem.

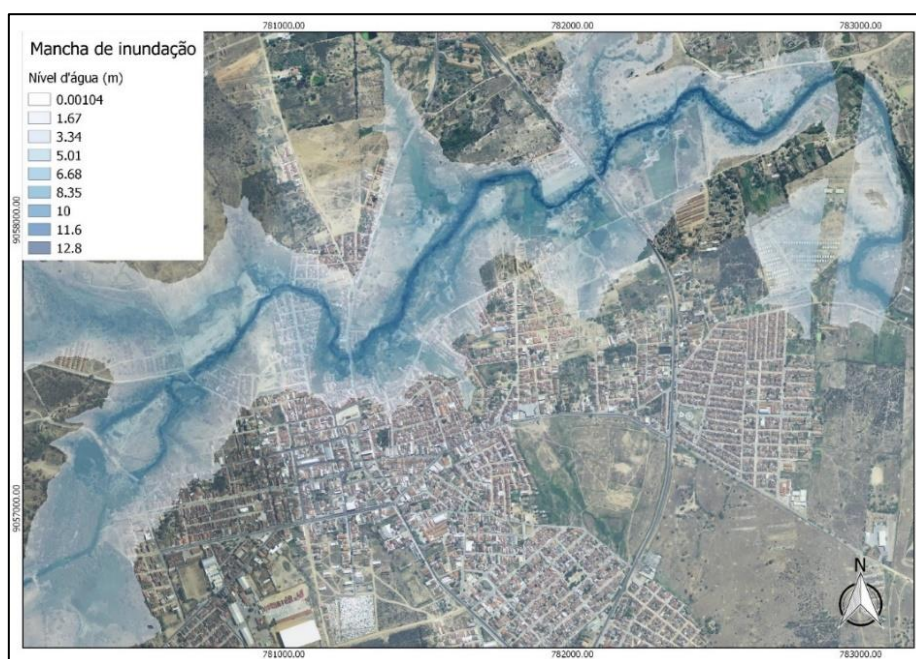


Figura 20. Área afetada pela inundação na cidade de São Bento do Una.

Conclusões

Os métodos computacionais são ferramentas muito importantes no avanço do estudo de simulações, já que possibilitam a obtenção de bons resultados de forma mais rápida e simples em relação a métodos empíricos. Através deles, foi possível estudar o caso de rompimento da Barragem São Bento do Una e obter resultados quanto a mancha de inundação, nível d'água ao longo do rio e vazões.

De acordo com o comportamento verificado da simulação pelo modelo unidimensional de fluxo não permanente, o tempo decorrido para que a ruptura atingisse sua geometria final foi de 56 minutos após o início da simulação.

A maior vazão de saída do reservatório acontece após 56 minutos do início da simulação, momento em que ela atinge o valor de 6672,72 m³/s, diminuindo na medida que o nível d'água se aproxima da cota inferior da brecha de ruptura de 665 m.

O tempo gasto pela água para atingir a cidade de São Bento do Una, situada a cerca de 17 km da barragem, foi de aproximadamente 1 hora e 50 minutos.

Tendo em vista os resultados apresentados pela mancha de inundação, recomenda-se que seja evitada a construção de novas residências nos locais afetados, e que a população já residente receba treinamento de evacuação, como medida efetiva para a diminuição de fatalidades em caso de rompimento.

Para trabalhos futuros, recomenda-se realizar a vetorização de mais seções transversais, a fim de obter uma geometria mais detalhada do rio, realizar a simulação considerando diferentes cotas do reservatório, e modelos de brecha de ruptura. Recomenda-se também analisar o rompimento em cascata da barragem do Gurjão, situada à montante do eixo da barragem São Bento do Una.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Geoprocessamento (GEOLAB) do Centro Acadêmico do Agreste (CAA) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), e ao Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) por disponibilizar Modelos Digitais do Terreno e Elevação utilizados nesse artigo.

Referências

Armada, C. A. S., 2021. Os desastres ambientais de Mariana e Brumadinho em face ao estado socioambiental brasileiro. *Territorium: Revista Internacional de Riscos*, 13-22.

- Agudelo-Otálora, L. M., Moscoso-Barrera, W. D., Paipa-Galeano, L. A. e Mesa-Sciarrotta, C., 2018. Comparación de modelos físicos y de inteligencia artificial para predicción de niveles de inundación. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(4), 209-235.
- Baltsavias, E. P., 1999. Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 54, 199-214.
- Brasil. Lei nº 12334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF, 2010.
- Brunner, G. W. Using HEC-RAS for Dam Break Studies, TD-39. U.S. Army Corps of Engineers. Davis, 2014. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/publications/TD-39.pdf>. Acesso: 21 abr. 2021.
- Carvalho, L.H. de. Curso de barragens de terra: com vista ao nordeste brasileiro. Fortaleza: DNOCS, 1983. v.1 173p. il.
- Cabral, S. L., Campos, J. N. B., Silveira, C. S., Teixeira, F. A. A., 2016. Integração do SIG, HEC/HMS e HEC/RAS no mapeamento de área de inundação urbana: aplicação à bacia do Rio Granjeiro-CE. *Geociências*, 35, 90-101.
- CIGB. Comissão Internacional de Grandes Barragens. Dam Failures Statistical Analysis. Boletim 99 Paris, 1995.
- Costa, D. P., Gonçalves, G., Furtado, A. S. O., 2019. Proposta de implantação do plano de ação de emergência em ciclos. *Revista Brasileira de Engenharia de Barragens*. Ano V, n.º 7, 33-38.
- Colucci, R., 2017. Veja como obter maior precisão em simulações de Rompimento de Barragens. Disponível em: <<http://geoeduc.com/blog/veja-como-obter-maior-precisao-em-simulacoes-de-rompimento-de-barragens/>>. Acesso em: 07 nov. 2020.
- Freitas, C. M., Silva, M. A. D., 2019. Acidentes de trabalho que se tornam desastres: os casos dos rompimentos em barragens de mineração no Brasil. *Revista Brasileira de Medicina do Trabalho*, 17, 21-29.
- Freitas, C. M., Silva, M. A., Menezes, F. C., 2019. O desastre na barragem de mineração da Samarco: fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres. *Ciência e Cultura* [online]. Vol.68, n.3, pp.25-30. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602016000300010>. Acesso: 12 jun. 2021.
- Faria, F. L. F., Silva, M. B., Reis, M. M., Amorim, J. C. C., 2019. Metodologia para obtenção do hidrograma para simulação de ruptura de

- barragens. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*. 36, 31-37.
- Governo do Estado de Pernambuco: Secretaria de Infraestrutura. Relatório do programa dos estudos hidrológicos, topográficos e geotécnicos/geológicos. SEINFRA/PE, 2014.
- Governo do Estado de Pernambuco: Secretaria de Infraestrutura. Relatório R02 - Relatório dos Estudos Hidrológicos. SEINFRA/PE, 2014.
- Governo do Estado de Pernambuco: Secretaria de Infraestrutura. Relatórios R03 e R04 - Relatório dos Estudos Topográficos e Relatório dos Estudos Geotécnicos/Geológicos. SEINFRA/PE, 2014.
- ITEP. Instituto de Tecnologia de Pernambuco. Relatório de Impacto Ambiental – RIMA: Barragem São Bento do Una. Recife, 2015.
- Lauriano, A. W. Estudo de ruptura da Barragem de Funil: Comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS. 2009. 251 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- Laschefschi, K. A., 2020. Rompimento de barragens em Mariana e Brumadinho (MG): Desastres como meio de acumulação por despossessão. *Ambientes: Revista de Geografia e Ecologia Política*. 2, 1, 98-143.
- Mello, V. F. B. Maciços e Obras de Terra: Anotações de Apoio às Aulas. São Paulo: EPUSP, 1975, 114 p.
- Neto, A. R. Cirilo, J. A. Dantas, C. E. O. Silva, E. R., 2015. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. Porto Alegre: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Disponível em: https://abrh.s3.amazonaws.com/Sumarios/157/028a94920a4052f5f14cd91b1a2e1872_b54f8549fb16f1dd4d83a5b1e75e4c8.pdf. Acesso em: 26 abr. 2021.
- Perini, D. S. Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- Pereira, F. G., Firme, P. H. C., Cotta, J. P. V., 2021. Plano de Ação de Emergência de barragens de mineração: evolução, conceito e discussões. *Territorium: Revista Internacional de Riscos*. 28, 53-66.
- Raman, A., Liu, F., 2019. An investigation of the Brumadinho Dam Break with HEC-RAS simulation, arXiv: Computational Physics. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-investigation-of-the-Brumadinho-Dam-Break-with-Raman-Liu/1344c7dd5212c4295997b13e5115eb9fdefc0c64#citing-papers>. Acesso: 12 jun. 2021.
- Silva, M. F., 2021. Análise espacial dos impactos socioambientais provocados pelo rompimento de duas barragens de rejeitos de mineração: Fundão, na cidade de Mariana e Córrego do Feijão, no município de Brumadinho (Minas Gerais – Brasil). *Territorium: Revista Internacional de Riscos*. 67-92.
- Silveira, J. F., Oliveira, K. D., 2019. Proposta de implantação do plano de ação de emergência em ciclos. *Revista brasileira de Engenharia de Barragens*. Ano 39-45.
- Visher, D. L., Hager, W. H. *Dam Hydraulics*. 1ª edição, ETH-Zentrum, Zürich. Switerland, 1997.
- Vieira, L. M. S. Fontes, A. S. Simões, A. L. A., 2019. Analysis of physical mechanisms of human body instability for the definition of hazard zones present in emergency action plans of dams. Case study: Santa Helena Dam, Bahia. *Revista brasileira de recursos hídricos [online]*. 2019, v. 24. e43. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180185>. Acesso: 16 jun. 2021.