



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE BARRAGEM E GESTÃO AMBIENTAL

ERICK ALEXANDRE DE OLIVEIRA FONTES

**MODELAGEM DO ROMPIMENTO E DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE
INUNDAÇÃO DA BARRAGEM DA UNIVERSIDADE FEDERAL
RURAL DA AMAZÔNIA EM CASTANHAL - PA.**

Tucuruí – PA
2023

ERICK ALEXANDRE DE OLIVEIRA FONTES

**MODELAGEM DO ROMPIMENTO E DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE
INUNDAÇÃO DA BARRAGEM DA UNIVERSIDADE FEDERAL
RURAL DA AMAZÔNIA EM CASTANHAL - PA**

Texto dissertativo com agregação de artigo, apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

F682m Fontes, Erick Alexandre de Oliveira.

Modelagem do Rompimento e Delimitação da Área de
Inundação da Barragem da Universidade Federal Rural da
Amazônia em Castanhal - Pa / Erick Alexandre de Oliveira Fontes.
— 2023.

52 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo
de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental,
Tucuruí, 2023.

1. Barragens. 2. Modelagem. 3. HEC-RAS. 4. Mancha de
inundação. I. Título.

CDD 627.83

ERICK ALEXANDRE DE OLIVEIRA FONTES

**MODELAGEM DO ROMPIMENTO E DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE
INUNDAÇÃO DA BARRAGEM DA UNIVERSIDADE FEDERAL
RURAL DA AMAZÔNIA EM CASTANHAL - PA**

Texto dissertativo com agregação de artigo, apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva

Tucuruí-PA, 29 de junho de 2023.

Aprovado por:



Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva – Orientador
Universidade Federal de Roraima - UFRR
Universidade Federal do Pará – UFPA/NDAE/PEBGA



Prof. Dr. Pedro Alves da Silva Filho – Membro Externo
Universidade Federal de Roraima - PROFÁGUA/UFRR



Prof. Dra. Débora Dias Costa Moreira – Membro Interno
Universidade Federal do Pará – UFPA/NDAE/PEBGA

Agradecimento

Agradeço aos meus conceituados orientadores Dr Adriano Frutuoso da Silva e Co-orientador Evandro Lopes dos Santos Junior, pelos ensinamentos e orientação desta pesquisa.

Aos professores Vitor Hugo Branco, Kleber Roberto Matos da Silva e Geovane Cruz pelos conhecimentos repassados, disponibilidade e apoio nos estudos.

À Universidade Federal do Pará, pelo apoio e incentivo à qualificação profissional.

À minha querida e amada esposa Daniele Lima da Rocha, aos familiares pelo amor, credibilidade transmitidos, sugestões valiosas durante a pesquisa.

RESUMO

As barragens possuem estruturas que com o passar dos anos, podem acarretar inúmeros riscos de rompimento, impactando assim diretamente vidas humanas, aquáticas, sistemas hidráulicos, biológicos, podendo romper de várias formas, como a partir de um processo de erosão interna, galgamento, deslizamento, derrubamento e outras, sendo que sua causa pode ser oriunda de fenômenos naturais ou provocados. Assim, o presente trabalho teve como objetivo analisar o rompimento hipotético de uma barragem de terra localizada na estação experimental de aquicultura da Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Castanhal – PA. Para tanto, foi usado o software HEC-RAS 5.0.3 (*Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System*), para modelagem da propagação da cheia e delimitação da mancha de inundação. Inicialmente foi feito um levantamento de informações sobre o barramento e realizado um cadastro junto a ANA. Após esse processo realizou-se uma inspeção e posteriormente um relatório de inspeção da barragem chegando conclusão de que ela se encontra em situação de perigo eminente. Os resultados da modelagem indicaram, portanto, conclui-se no referido estudo que a mancha de inundação realizada foi detectada prejuízos materiais e imateriais além de impactos ambientais severos a jusante, em virtude disso, diante do exposto, faz necessário a interdição do barramento para que seja realizado manutenção de emergência.

Palavras chave: Barragens. Modelagem. HEC-RAS. Mancha de inundação.

ABSTRACT

Dams have structures that can cause changes over the years, which can cause changes in change processes, impacts, changes, changes in change processes, changes in the internal change process, changes in the change process, changes in the internal change process, changes in the process of change, changes in the process of internal change, overturning and others, the cause of which may come from natural phenomena or also from mismanagement. Thus, the experimental work presented as objective the objective of analyzing the hypothetical land located in the aquaculture station of the Universidade Federal Rural da Amazônia, in the municipality of objective Castanhal - PA. No methodological approach was used to simulate the flooding of the floodplain of HEC-RAS 5.0.3 (Hydrologic Engineers Corps – River System). The model software is based on the solution of permanent or non-permanent or two-dimensional Saint-Ven solutions, in version 5.3, considering the permanent regimes. The research numbers were observed from the simulation of the effects of the dam of results that were carried out: Seven, an information survey was carried out about the dam and an information survey was carried out with the ANA. A hazard implementation process is carried out afterwards and a report that this dam is nearing completion. Therefore, it is concluded in that study that the maintenance carried out in a severe way of materials and immaterial makes the impacts downstream, in front of the exposed, necessary to maintain the interdiction of the dam so that the maintenance of materials and emergency is necessary.

Keywords: Dams. Simulation. HEC-RAS. Flood spot

LISTA DE TABELA

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Dados comparativos entre as áreas de inundação por meio dos modelos simplificados MS20S e MS-50S | 20 |
| Tabela 2 - Dada das áreas de inundação por meio do modelo simplificado MS-50S e Hec-Ras. | 21 |
| Tabela 3- Estimativa de vazão pelo método I PAI WU | 35 |
| Tabela 4- Cadastro técnico do barramento do Igarapé Sete Voltas. | 38 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1- Resultados de Seção imediatamente a montante da barragem | 18 |
| Figura 2 - Resultados de uma seção imediatamente a jusante da barragem..... | 19 |
| Figura 3- Mapa de Inundação..... | 19 |
| Figura 4 - Mapa de localização da barragem do Igarapé Sete Voltas | 23 |
| Figura 5 -Elementos constitutivos da barragem do Igarapé Sete Voltas..... | 24 |
| Figura 6 - Tanques de piscicultura da Fazenda Escola de Castanhal | 25 |
| Figura 7 - Precipitação Pluviométrica (mm) e Temperatura do Ar (°C) em anos de El Niño (2011), La Niña (2016) e Climatologia (1989 – 2019). | 26 |
| Figura 8– Mapa de declividade da área em estudo. | 27 |
| Figura 9 – Tela inicial do Hec-RAS | 30 |
| Figura 10– Janela “geometry data” | 31 |
| Figura 11– Janela de dados do rompimento..... | 31 |
| Figura 12– Hidrograma de ruptura..... | 32 |
| Figura 13– Detalhamento da simulação de ruptura..... | 33 |
| Figura 14– MDE da região | 33 |
| Figura 15– Velocidade do fluxo..... | 34 |
| Figura 16– Parâmetros de entrada de vazão - HEC RAS..... | 35 |
| Figura 17– Parâmetros de entrada de vazão - HEC RAS..... | 36 |
| Figura 18– Talude montante – Barragem Igarapé Sete Voltas/PA | 39 |
| Figura 19– Anomalias no talude de jusante – Barragem Igarapé Sete Voltas/PA | 40 |
| Figura 20– Crista da Barragem Igarapé Sete Voltas/PA..... | 40 |
| Figura 21– Vertedouro da Barragem Igarapé Sete Voltas/PA | 41 |
| Figura 22 – Reservatório da Barragem Igarapé Sete Voltas/PA..... | 41 |
| Figura 23 – Mancha de inundação – Nível d’água mínimo | 42 |
| Figura 24- Mancha de inundação no canal do Igarapé Sete voltas – Nível d’água máximo..... | 43 |

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIATURAS

| | |
|--------------|--|
| ABCP | Associação de Concreto Portland |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACI | <i>American Concrete Institute</i> |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| CBDB | Comitê Brasileiro de Barragens |
| CCR | Concreto Compactado com Rolo |
| CCV | Concreto Massa Convencional |
| ICOLD | <i>International Commission on Large Dams</i> |
| MMF | Método do Módulo de Finura dos Agregados |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |
| NM | Norma Mercosul |
| PNSB | Política Nacional de Segurança de Barragens |
| RAA | Reação Álcali-Agregado |
| RBS | Relatório De Segurança De Barragem |
| SNISB | Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens |
| UHE | Usina Hidrelétrica |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 11 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 12 |
| 1.2.1 Gerais..... | 12 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 12 |
| 1.3 Estrutura do Trabalho..... | 13 |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA | 14 |
| 2.1 Considerações gerais | 14 |
| 2.2 Caracterização de barragens segundo RSB DE 2021..... | 14 |
| 2.3 Causa de rompimento..... | 15 |
| 2.4 Modelagem hidrodinâmica..... | 16 |
| 2.4.1 Modelagem de ruptura de barragens usando HEC-RAS | 17 |
| 2.5 HEC-RAS..... | 21 |
| 3. METODOLOGIA..... | 22 |
| 3.1 Considerações gerais | 22 |
| 3.2 Coleta de dados e caracterização da área de estudo | 22 |
| 3.2.1 Definição das condições de ruptura na modelagem | 27 |
| 3.3 Escolha do modelo hidrológico..... | 28 |
| 3.4 Simulação do rompimento | 28 |
| 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 38 |
| 4.1 Considerações gerais | 38 |
| 4.2 Inspeção da barragem..... | 38 |
| 4.3 Mapas de inundação | 41 |
| 5. CONCLUSÕES | 45 |
| REFERÊNCIAS | 46 |

Anexo49

Ficha de Inspeção da barragem da UFRA/Castanhal (IN SEMAS N^o 02/2018)...49

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ao longo dos anos, os problemas decorrentes de excesso ou escassez de água tornaram os recursos hídricos uma alternativa indispensável para o desenvolvimento da sociedade, já que, em certas localidades, existem uma abundância de recurso como tal. Assim, a construção de barragens com o represamento de volume de água, foi e vem sendo considerada como um viés benéfico nos problemas relacionados à geração de energia, solução em muitos países, bem como outras finalidades (ALVES, 2018).

As barragens são megaestruturas utilizadas para controle de enchentes, geração de eletricidade, irrigação, abastecimento de água e recreação (SHHRIM e ROS, 2020). Em países como o Brasil, os tipos de barragens mais utilizadas são a de terra e enrocamento, seguidas a outros tipos de barragem como as de concreto.

As estruturas que envolvem barragens, por serem complexas, apresentam inúmeros riscos de rompimento, podendo ocasionar uma série de consequências devastadoras e perigosas para o ser humano, a biodiversidade aquática, sistemas hidráulicos e o ecossistema de uma forma geral (TAHMISCIOĞLU et al., 2016). As principais causas de rompimento destas barreiras hidráulicas são: erosão interna, galgamento, deslizamento, má gestão do sistema de barragem e fenômenos naturais (ZHANG; XU; JIA, 2007).

As causas mais comuns de rupturas em barragem são o rompimento de um dos taludes da barragem, montante ou jusante; ruptura da fundação, através da fratura da rocha e deslizamento de camadas; galgamento, referente a algum evento hidrológico extremo ou a partir de estudos inadequados; ruptura por entubamento, em função de falhas no corpo da barragem, e dentre outros (ELETROBRÁS, 2003).

A modelagem de rompimento e a delimitação de áreas de inundação de barragens são duas áreas críticas de estudo para a gestão de recursos hídricos e segurança de barragens. A primeira é definida como o processo de prever a magnitude e o alcance da inundação resultante de uma possível ruptura da obra hidráulica, enquanto a delimitação de áreas de inundação envolve o mapeamento das áreas que seriam afetadas pela inundação. A importância desses estudos reside no fato de que eles são essenciais para o planejamento de ações preventivas e de resposta em caso de acidentes com barragens.

A modelagem matemática é considerada como uma ferramenta essencial nas questões envolvendo o planejamento e segurança de uma barragem, já que pode contribuir na

simulação da ruptura hipotética de uma estrutura de barramento, bem como pela propagação da onda decorrente do acidente (VERÓL, 2010).

Xiong (2011) e Ackerman e Brunner (2016) desenvolveram pesquisas cujo objetivo foi à realização de uma modelagem a ruptura de uma barragem nos Estados Unidos da América. Ambos enfatizam a importância da avaliação da ruptura de barragens por meio da ferramenta HEC-RAS, devido modelar hidraulicamente o rio, a barragem e o com uso de GIS, juntamente a essas ferramentas, é possível prever danos, possibilitando ações de mitigação.

O HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) é um software desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE – United States Army Corp of Engineers), para modelagem hidrológica uni e bidimensionais, podendo ser aplicado para cálculo de perfis de superfície de água para fluxo variável gradualmente constante, simulação de fluxo instável, cálculos de transporte de sedimentos e análise da qualidade da água (LEON e GOODELL, 2016) simular a propagação e os níveis de inundação na planície de inundação (ABDESSAMED e ABDERRAZAK, 2019).

O presente trabalho propõe analisar o rompimento hipotético da barragem de terra localizada na estação experimental de aquicultura da Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Castanhal – PA, por meio das técnicas de modelagem de rompimento e inundação de barragem utilizando a ferramenta HEC-RAS, tendo em vista quantificar os impactos a jusante.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Gerais

Analisar o rompimento hipotético de barragem de terra localizada na estação experimental de aquicultura da Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Castanhal – PA.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar inspeção na barragem da Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Castanhal – PA;
- Classificar a barragem quanto ao risco ao dano potencial associado, analisar o impacto e identificar os problemas ambientais e o nível de risco que o rompimento da barragem pode causar;
- Gerar a mancha de inundação a jusante do barramento a partir de sua ruptura utilizando

softwares Hec-Ras.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, iniciando-se por esta introdução, que apresenta de forma concisa todo o trabalho. O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura, destacando a situação das barragens a partir do Relatório de Segurança de Barragens de 2021 da ANA, causa de rupturas de barragens, simulação hidrodinâmica e aspectos modelagem de rupturas usando Hec-Ras. No Capítulo 3, é apresentada a metodologia utilizada nessa pesquisa, com descrição da barragem objeto de estudo, coleta de dados, etapas e descrição da modelagem. O Capítulo 4 apresenta os resultados da inspeção e simulação da barragem, destacando os impactos a jusante. No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

De acordo com Almeida (2018), as barragens tinham como objetivo inicial o uso dos recursos hídricos em relação ao consumo humano e combate as secas. Em países como o Brasil, os tipos de barragens mais utilizadas são a de terra e enrocamento, seguidas a outros tipos de barragem como as de concreto.

As barragens possibilitam inúmeros benefícios econômicos, por isso elas estão sempre em constante desenvolvimento. Além disso, vale frisar que, para a construção de uma barragem é preciso utilizar tecnologias que consigam viabilizar o armazenamento suficiente e adequado de água, por isso, percebe-se que existem também alternativas a serem desenvolvidas como a barragem de terra ou açude simples (STEPHENS, 2011).

Diante disso, para compreender melhor como as barragens estão caracterizadas, bem como suas estruturas e finalidades, as informações serão detalhadas no tópico a seguir.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS SEGUNDO RSB DE 2021

De acordo com relatório de segurança de barragem (RSB) de 2021 o número de barragens com empreendedor identificado é de 9.685 (ou 44%), valor superior a 2020. É necessário que os fiscalizadores insiram as informações dos empreendedores no SNISB, para que possam ser analisadas com mais precisão as barragens nas quais ainda não foram identificados os respectivos empreendedores.

Houve avanço também mensurado pelo indicador de completude da informação, já que 65% das barragens cadastradas encontram-se na faixa mínima, 9% encontram-se na faixa baixa, 6% na faixa média, 10% na faixa boa e 10% estão na faixa ótima. Em 2019 os números eram, respectivamente: 67%, 7%, 8%, 12% e 6%.

De acordo com as informações enviadas pelos fiscalizadores, é possível afirmar que 5.591 barragens (ou 25% do total) submetem-se à PNSB, ou seja, apresentam pelo menos uma das características estabelecidas no art. 1º da Lei nº 12.334/2010. Outras 3.267 (ou 16%) não apresentam nenhuma das características, portanto não são submetidas à PNSB. Assim, pode-se dizer que 8.858 barragens estão devidamente regulares do ponto de vista do cadastro, o que representa um incremento de 1.237 barragens em relação ao RSB 2020, evidenciando o contínuo trabalho dos fiscalizadores acerca do cadastro das barragens ao longo de 10 anos.

Os dados e as análises sobre a implementação dos instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens têm como referência o total de barragens enquadradas na PNSB, conforme requisitos estabelecidos nos incisos do parágrafo único, do art. 1º, da Lei nº 12.334/2010, pois este é o conjunto de empreendimentos mais relevante para o Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2021).

Ao analisarmos dados básicos das barragens submetidas à PNSB, verificamos que mais da metade delas possui altura inferior a 15 metros, sendo que as barragens inferiores a 7,50 metros representam 28% do total. Outros 18% não possuem informação de altura, percentual inferior ao verificado no RSB 2019 (ANA, 2021).

Em relação ao material, 57% das barragens submetidas à PNSB foram construídas em terra, 6% em concreto convencional e 5% em terra-enrocamento. Em 24% das barragens não há informação sobre o material, percentual inferior aos 27% verificados em 2019 (ANA, 2021).

Além dessa configuração inerente às finalidades, as barragens apresentam também classificação conforme o tipo de construção e o material empregado, sendo detalhado melhor no tópico a seguir.

2.3 CAUSA DE ROMPIMENTO

A ruptura das barragens está relacionada a causas naturais e as ações humanas, conforme Eletrobrás (2003), analisando as causas mais comuns de rupturas em barragem, tem-se: o rompimento de um dos taludes da barragem, montante ou jusante; ruptura da fundação, através da fratura da rocha e deslizamento de camadas; galgamento, referente a algum evento hidrológico extremo ou a partir de estudos inadequados; ruptura por entubamento, em função de falhas no corpo da barragem, e dentre outros.

No caso da falência Hidráulica ou Galgamento (*overtopping*), Lauriano (2009) explica que a brecha ocorre sempre no ponto mais fraco na crista da barragem e com o passar do tempo em razão do processo de erosão, vai crescendo em ritmo acelerado dependente do tipo do material do barramento. No caso da falência estrutural ou erosão interna (*piping*), quando a erosão progride de jusante para montante, nota-se que há um expressivo aumento no diâmetro desse tubo, já que a água percola pelo solo compactado, fazendo com que haja o rompimento da barragem (MASCARENHAS, 1990; LADEIRA, 2007).

Assim, ao analisar os principais mecanismos físicos envolvidos de acidentes e/ou ruptura referentes a barragens, torna-se interessante identificar os principais dados presentes na literatura, tanto no aspecto da estatística global com a brasileira.

Sendo assim, em relação aos dados envolvendo as estatísticas globais, Foster *et al.* (2000) identificaram por meio de 128 casos, quais foram as causas que as barragens se romperam, tais dados apresentam informações que eram suficientes para classificar o modo de ruptura.

Nota-se ser recorrente no Brasil o registro anual de acidentes e rupturas relacionadas a obras como barragens, na maioria das vezes essas intercorrências surgem por eventos meteorológicos extremos que resultam em aumento de vazões. Até o presente momento, não existe um registro oficial que detalhe minuciosamente informações sobre o número e tipo de incidentes, causas prováveis ou dos danos causados. Todavia, alguns estudos, como de Menescal (2009), revelam que ao longo da última década houve aproximadamente 140 casos que foram noticiados pela imprensa local, dos quais metade são casos de ruptura.

Outros fatores também impedem que se tenham dados precisos sobre a frequência média de rupturas e acidentes envolvendo barragens no Brasil, refere-se ao total de barragens construídas no país também, onde muitas são desconhecidas. Contudo, por meio de dados levantados através de imagens captadas por satélite, foi possível classificar aproximadamente 7.000 espelhos d'água, com área superficial igual ou superior a 20 hectares como barragens em território brasileiro (MENESCAL, 2009).

2.4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A modelagem matemática é considerada como uma ferramenta essencial nas questões envolvendo o planejamento e segurança de uma barragem, já que pode contribuir na simulação da ruptura hipotética de uma estrutura de barramento, bem como pela propagação da onda decorrente do acidente (VERÓL, 2010).

Nesse sentido, os modelos hidrodinâmicos utilizam equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento, que regem a onda de cheia oriunda do colapso de uma barragem, no qual é descrito a variação do fluxo ao longo do canal (VERÓL, 2010). Um dos objetivos no uso de modelos hidrodinâmicos de propagação de um hidrograma de ruptura está no fato da simulação do movimento da onda de cheia ao longo do vale a jusante da barragem (LAURIANO, 2009). Sendo assim, torna-se possível conseguir identificar os reais impactos produzidos pela onda e o potencial risco associado a este evento.

Lauriano (2009) ressalta que o modelo deve proporcionar para qualquer ponto de interesse dentro da área atingida pela onda de cheia, precisa ter tempo de chegada da onda de ruptura; nível máximo de água; tempo até que se atinja este nível máximo; profundidade e velocidade da onda de cheia e a duração da inundação.

Vale frisar que a resposta dada acerca desse processo tem relação direta com a opção de modelo escolhido, já que os mesmos se encontram divididos em modelos simplificados, hidrológicos, hidrodinâmicos unidimensionais (1D), hidrodinâmicos quasi-bidimensionais (quasi-2D), hidrodinâmicos bidimensionais (2D) e modelos hidrodinâmicos tridimensionais (3D) (VERÓL; MIGUEZ; MASCARENHAS, 2012).

Diante disso, nota-se que além da simplificação nos cálculos, existe também a admissão da hipótese de ruptura total e instantânea que é um dos instrumentos que pode favorecer a segurança nesse âmbito, por isso que ao se analisar um evento como o rompimento de barragens, é recomendado que se tenha adoção de posturas conservativas (VERÓL, 2010). Veról, Miguez e Mascarenhas (2012) afirmam que há estudos comparativos entre modelos unidimensionais e bidimensionais, no qual a onda de cheia propaga-se em velocidade muito maior e menor amortecimento em modelos 1D, o que pode acarretar para cenários mais catastróficos do que se poderia imaginar.

2.4.1 Modelagem de ruptura de barragens usando HEC-RAS

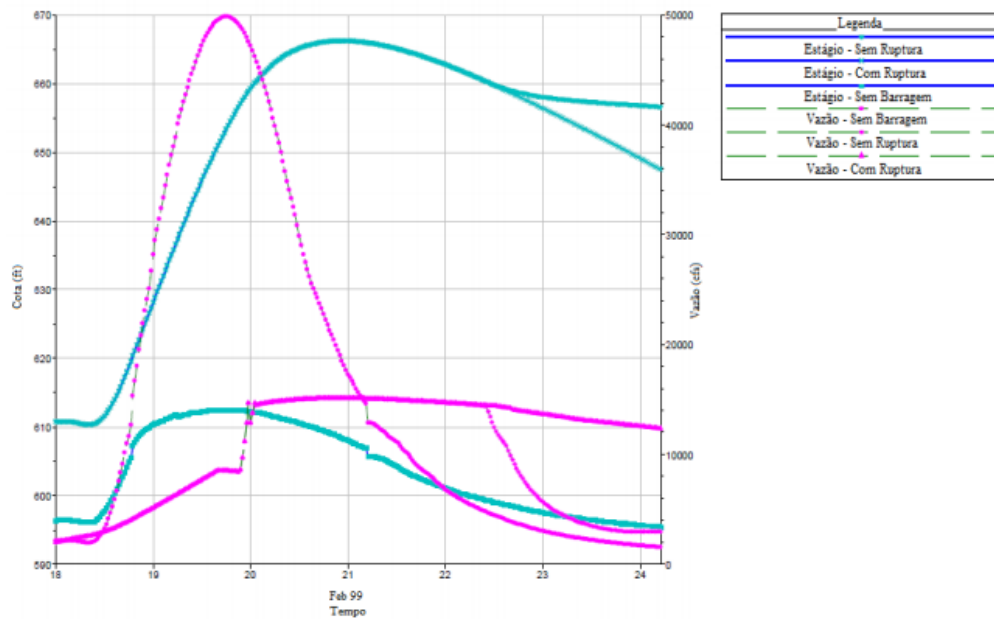
Alguns autores como Xiong (2011) e Ackerman e Brunner (2016) desenvolveram pesquisas cujo objetivo foi à realização de uma modelagem a ruptura de uma barragem nos Estados Unidos da América.

Assim, a fim de identificar a modelagem de ruptura de barragens usando o software HEC-RAS, Xiong (2011) realizou uma simulação através de três cenários para as condições da máxima vazão provável, ou seja: “*sem a barragem*”, com “*ruptura de barragem*” e a final “*sem ruptura*”. Dessa maneira, considerou-se a forma de ruptura o *piping*, e considerou regime permanente variado. Enquanto Ackerman e Brunner (2016) desenvolveram um tipo de modelagem hidráulica do rio que aflui para a barragem, sendo feita por intermédio do HEC-Geo RAS, que é caracterizada como uma interface do HEC-RAS no ArcGIS, e por isso, pode normalmente ser exportado para o Hec-Ras para o processo de modelagem de barragem, na simulação e bem como na obtenção os resultados.

Diante disso, os resultados do estudo Xiong (2011) e de Ackerman e Brunner (2016) enfatizam a importância da avaliação da ruptura de barragens por meio da ferramenta Hec-Ras, já que ela consegue modelar hidráulicamente o rio, a barragem e o com uso de GIS juntamente a essas ferramentas é possível à obtenção das consequências, para que assim seja possível antecipar criando ações de mitigação.

Na figura 1, os resultados da pesquisa de Xiong (2011) são descritos em uma seção imediatamente a montante da barragem.

Figura 1- Resultados de Seção imediatamente a montante da barragem

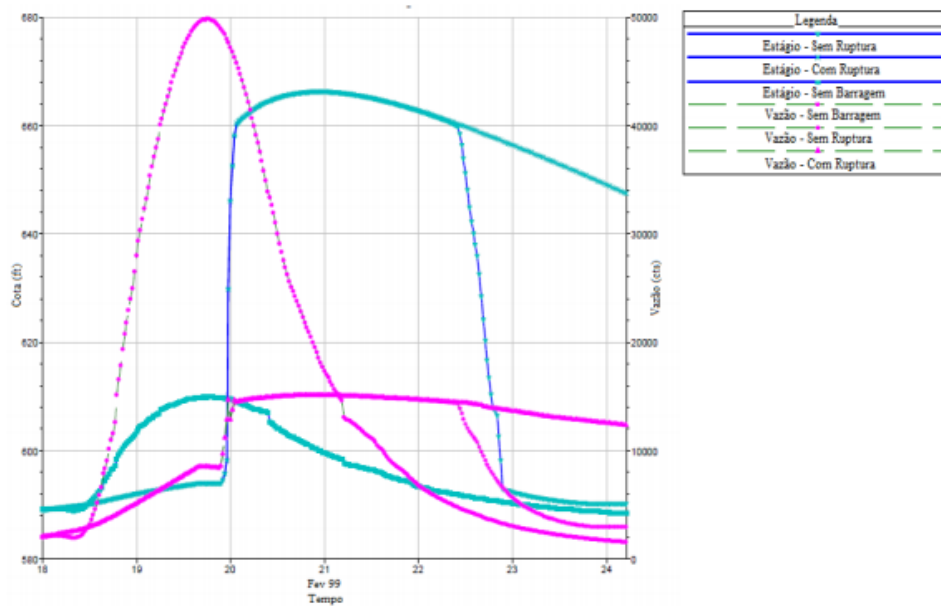


Fonte: Xiong, 2011.

Observa-se que a vazão de pico se encontra concentrada nos cenários de “sem ruptura” e “com ruptura”, diferente do cenário de “sem barragem” onde possuem valores bem abaixo. Percebe-se também que no período antes da data 21 fevereiro de 1999 a cota e a vazão estão sobrepostas nos cenários “com ruptura” e “sem ruptura”, sendo que após esse tempo, a vazão no cenário “sem ruptura” cai drasticamente, enquanto a cota do cenário “com ruptura” ficar menor que a cota no cenário “sem ruptura” o que se subentende um esvaziamento no cenário “com ruptura” (XIONG, 2011).

A figura 2 mostra os principais resultados oriundos de uma seção imediatamente à jusante da barragem, sendo que a vazão e a cota caem de modo notória no cenário “sem ruptura” depois da data de 21 de fevereiro de 1999 em relação ao cenário “com ruptura”. Analisando o cenário “com ruptura” o período de maior cota encontra-se por um longo período de tempo, o que gera como consequência um enfraquecimento da resistência da barragem e consequentemente um aumento da brecha, causando assim a ruptura na barragem (XIONG, 2011).

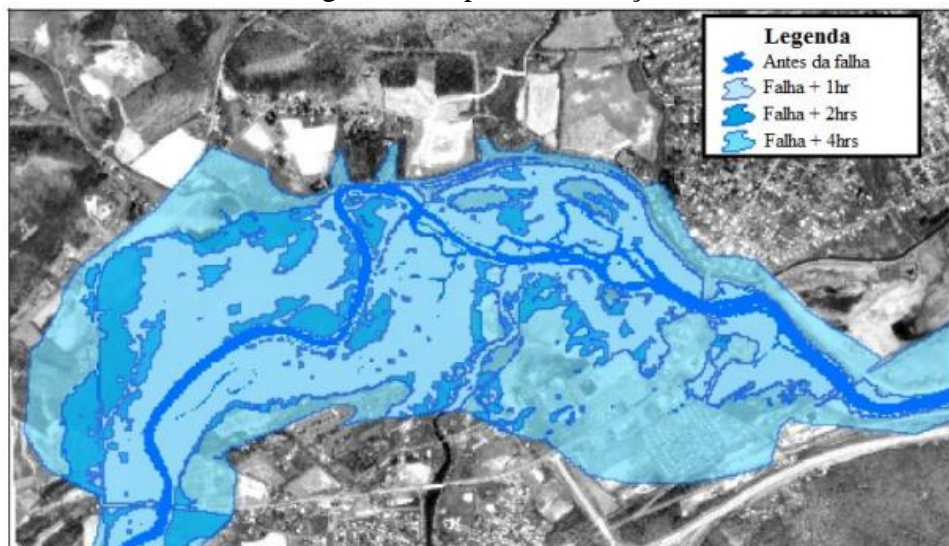
Figura 2 - Resultados de uma seção imediatamente a jusante da barragem



Fonte: Xiong, 2011

Na pesquisa desenvolvida por Ackerman e Brunner (2016) foi apresentado um mapa de inundação, conforme Figura 3, no qual foi possível identificar quais foram às áreas afetadas com a ruptura da barragem estudada.

Figura 3- Mapa de Inundação



Fonte: Ackerman e Brunner (2016).

Tanto na pesquisa realizada por Xiong (2011) como Ackerman e Brunner (2016) foi possível observar a relevância necessária acerca da avaliação da ruptura de barragens com o uso da ferramenta Hec-Ras, pois foi possível realizar de forma eficiente o modelamento hidráulico destas respectivas barragens. Além disso, ressalta-se que por meio uso de GIS juntamente a essas ferramentas, consegue-se a obtenção de várias informações referente às

consequências do rompimento das barragens, assim, com tais dados, é viável antecipar criando ações de mitigação.

O modelo MS-20S tem como finalidade realizar análise em curto prazo de várias barragens sob a jurisdição da Agência Nacional de Águas (ANA), sendo desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Portugal. Encontra-se pautada na definição de duas variáveis, que são a vazão de pico e a distância máxima de cálculo.

Enquanto, que o MS-50S (desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Portugal), contribui nas pesquisas por conseguir adotar uma metodologia mais correta para simular, o amortecimento do escoamento da onda de cheia a jusante da barragem, sendo que um dos métodos a ser utilizado é o Muskingam-Cunge para simular a propagação da onda da cheia a jusante da barragem. Uma das vantagens do uso desse método é o fato que não há a necessidade de dados hidrológicos para a sua calibração e os dados necessários para iniciar os cálculos são de fácil obtenção (PEREIRA *et al.*, 2017).

A tabela 1 apresenta dados comparativos entre as áreas de inundação por meio dos modelos simplificados MS20S e MS-50S

Tabela 1- Dados comparativos entre as áreas de inundação por meio dos modelos simplificados MS20S e MS-50S

| Barragem | Volume do Reservatório (hm³) | MS-20S(km²) | MS-50S(km²) |
|----------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|
| UHE Machado Mineiro | 202,16 | 30,062 | 35,107 |
| UHE Cajuru | 192,7 | 42,864 | 52,5 |
| PCH Peti | 43,58 | 9,025 | 8,71 |
| PCH Ivan Botelho III | 18,05 | 4,297 | 4,566 |
| PCH Areia Branca | 8,49 | 2,337 | 2,429 |
| PCH Pipoca | 8,2 | 2,252 | 2,363 |
| PCH Brito | 2,55 | 1,791 | 1,819 |
| PCH Melo Viana | 1,27 | 1,218 | 1,347 |

Fonte: Pereira, et al (2017)

A partir dos dados apresentados na Tabela 1, verifica-se que o modelo MS-50S provocou índices maiores nas áreas de inundação.

A seguir, a Tabela 2, demonstra informações entre os modelos MS-50S (com 50 seções) e o Hec-Ras para três barragens. Os valores expostos indicaram que o modelo MS-50S apresentou maior área de inundação que o modelo Hec-Ras.

Tabela 2 - Dados das áreas de inundação por meio do modelo simplificado MS-50S e Hec-Ras.

| Barragem | Hec-Ras (Km²) | MS-50S(km²) |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| UHE Machado Mineiro | 47,925 | 60,117 |
| PCH Peti | 24,132 | 31,098 |
| PCH Areia Branca | 8,657 | 11,538 |

Fonte: Pereira, et al (2017).

2.5 HEC-RAS

O HEC-RAS (Hydrologic. Engenheiros Corps – River Analysis System) é um software Desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (*Hidrológicas Engineering Center*) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE – *United States Army Corp of Engineers*), para modelagem hidrológica.

O HEC-RAS pode ser aplicado em diversas finalidades, como, por exemplo, para a simulação de transporte de sedimentos, modelação de temperatura da água, assim como a simulação de ruptura de barragens (VERÓL; MIGUEZ; MASCARENHAS, 2012). Por meio desse modo, torna-se possível observar a evolução da ruptura por meio de uma erosão interna (*piping*) ou por galgamento (*overtopping*), que são vistas como as principais causas de rupturas em estruturas como essas de barragens (SANTOS; FRANCA; ALMEIDA, 2007).

Desse modo as equações do modelo hidrodinâmico HEC-RAS são unidimensionais originais de fluxo não permanente em leitos fluviais, desenvolvidas por Adhémor Jean Claude Barre de Saint-Venant que, segundo Lauriano *et al.* (2009), as equações de Saint Venant, a partir do momento que são desenvolvidas no âmbito unidimensional, podem ser descritas pelas equações de Conservação da Massa (Equação 1) e Conservação da Quantidade de Movimento (Equação 2), conforme descrito abaixo:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (2)$$

t = variável independente relativa ao tempo (s);

x = variável independente relativa à direção do escoamento (m);

u = velocidade média do escoamento (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²); h = espessura da lâmina líquida (m);

S₀ = declividade média da calha fluvial ou do fundo do canal (m/m); e

S_f = declividade média da linha de energia (m/m), equivalente ao termo de perda de carga unitária por atrito.

As equações auxiliam no escoamento de forma unidimensional, além de trazer outras hipóteses simplificadoras, tais qual a distribuição hidrostática de pressões, sendo ausente de componentes de aceleração no sentido longitudinal.

Em casos como esses, Lauriano *et al.* (2009) reflete que, nas situações envolvendo o escoamento com um ressalto hidráulico negativo, é criada uma região com acelerações verticais, invalidando a hipótese em questão. Além do mais, o autor acima afirma que questões como, a perda de carga estimada pela equação de Manning, a declividade do fundo do canal pequena, o fluido como incompressível e homogêneo e a criação de um perfil uniforme de velocidade na seção transversal do canal, é oriundo das hipóteses da aplicação das equações (1) e (2) em pesquisas de propagação de uma onda de cheia referente da ruptura de uma barragem

3. METODOLOGIA

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A presente pesquisa se constitui em um estudo de caso, sendo definida como um estudo de fenômenos individuais relevantes para um grupo ou sociedade. Nesta estrutura metodológica, o fenômeno a ser estudado deve ser descrito e analisado de modo mais detalhado possível de maneira que se possa ter subsídios para a tomada de decisão em relação ao fenômeno analisado. A partir disso, foram estabelecidas as seguintes etapas no processo de modelagem:

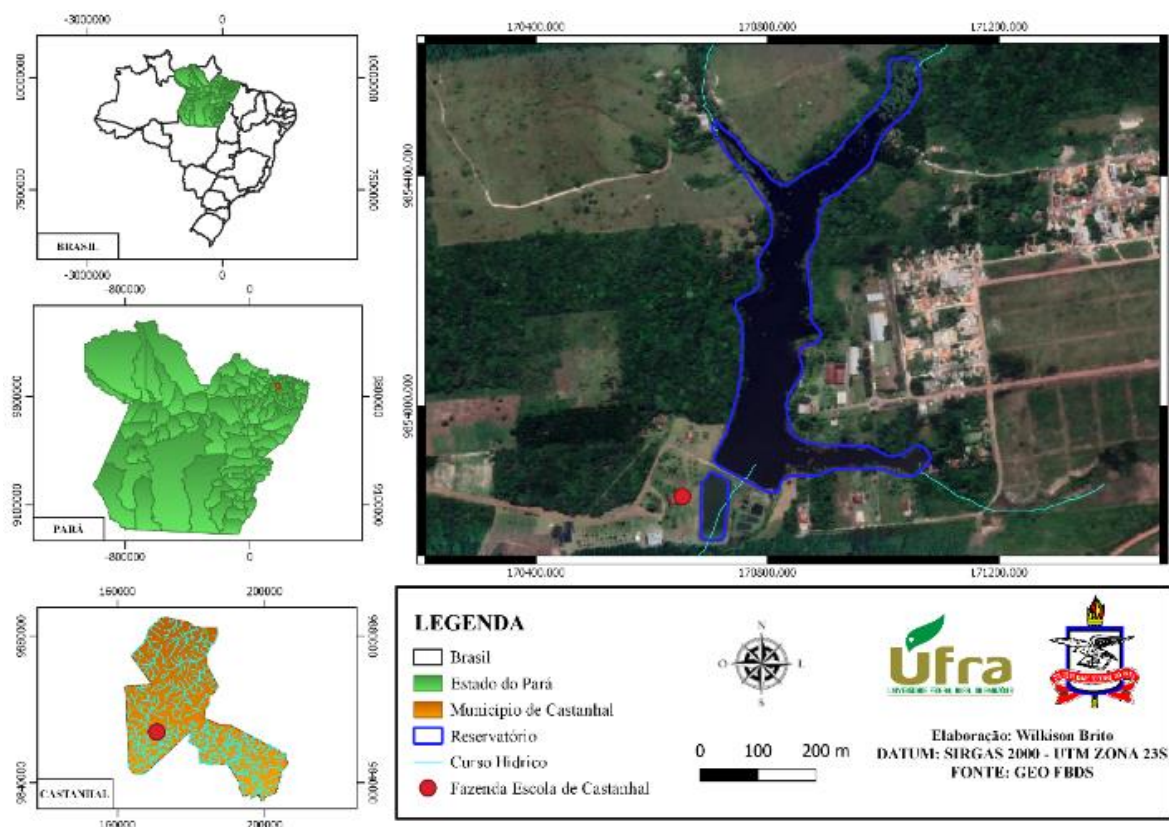
1. Coleta de dados e caracterização da área de estudo;
2. Definição das condições de ruptura;
3. Escolha do modelo hidrológico;
4. Simulação do rompimento.

3.2 COLETA DE DADOS E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A etapa de coleta se iniciou a partir de um levantamento bibliográfico sobre a barragem em estudo. Em seguida, foram realizadas algumas visitas técnicas, a fim de fazer uma inspeção e levantamento de informações relevantes ao longo do barramento com intuito de coletar informações para a caracterização da área em estudo, bem como, para serem inseridas na modelagem.

A barragem escolhida para a simulação da mancha de inundação foi a do Igarapé 07 Voltas. Ela encontra-se localizada na Universidade Federal Rural da Amazônia – Campus Castanhal ao longo da BR 230. Zona Rural do município de castanhal, tendo coordenadas 06°5’17,36” de Latitude Sul e 49°50’43,17” de longitude Oeste. Ela compõe a bacia hidrográfica Araguaia. – Tocantins, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Mapa de localização da barragem do Igarapé Sete Voltas



Fonte: Autor (2021)

A área do reservatório é de 157.599m², perímetro de 3.193,44m e volume aproximado de 240.000m³. Segundo informações dos servidores, a estrutura tem aproximadamente 43 anos de existência, onde foram feitas algumas ampliações a fim de atender a demanda da universidade. Ela corresponde a uma barragem de terra homogênea. Não foi detectado sistema de drenagem interna ao longo do talude. Ela possui um desnível de 3,00 m, comprimento de crista de 110,00 m e sua largura variando entre 12 e 18,00 m. Para os taludes de montante a inclinação varia de 1 na vertical para 3,0 na horizontal (1V: 3H) a 1 na vertical para 3,5 na horizontal (1V: 3,5H). Para os taludes de jusante a inclinação pode variar de 1 na vertical para 2,5 na horizontal (1V: 2,5H) a 1 na vertical para 3 na horizontal (1V: 3H). A Figura 5 apresenta uma imagem dos principais elementos constituintes da barragem.

O primeiro (01) e o segundo (02) correspondem ao talude de montante e talude de jusante. Já o terceiro (03), evidencia-se o vertedouro

Figura 5 -Elementos constitutivos da barragem do Igarapé Sete Voltas



Fonte: Autor (2021)

A barragem está localizada no Nordeste do Pará, região que possui um clima do tipo Equatorial Am, clima de monção, de acordo com a classificação de Koppen, apresentando uma temperatura média de 25°C e máxima de 40°C. A estação chuvosa ocorre predominantemente de dezembro a maio, enquanto a estação menos chuvosa ocorre de junho a novembro. A umidade relativa do ar varia entre 85% e 90%. O índice pluviométrico anual médio é de 2.604,4 mm, e a quantidade de dias chuvosos durante o ano chega a cerca de 208 dias (NASCIMENTO, SANTOS JÚNIOR PINHEIRO, 2020).

A Figura 6 apresenta os tanques de piscicultura da Fazenda Escola de Castanhal, à jusante do barramento, os quais correspondem a pouco mais de 40% da área imediatamente à jusante.

Figura 6 - Tanques de piscicultura da Fazenda Escola de Castanhal



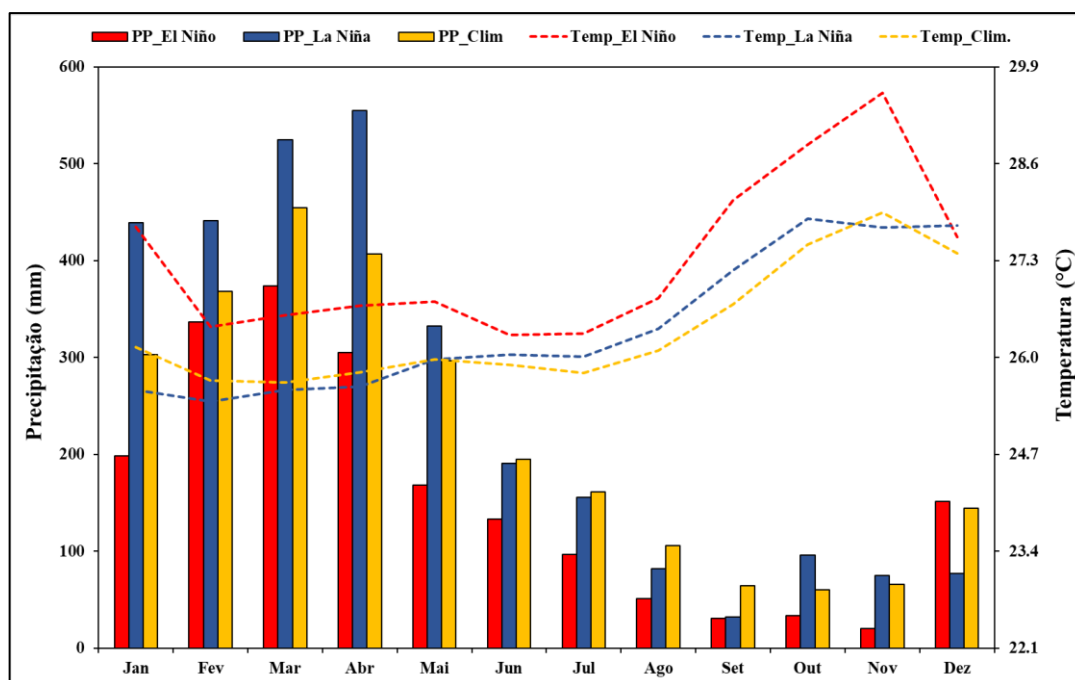
Fonte: Dados do Autor (2021) de Castanhal.

Este clima, caracterizado por alta precipitação e temperatura, favorece os processos de intemperismo. Isso resulta no desenvolvimento e aprofundamento dos perfis do solo, bem como no aumento da suscetibilidade à erosão. Os solos predominantes na região são formados pela alteração de sedimentos cenozoicos que se distribuem por uma área de relevo predominantemente plano ou ligeiramente ondulado (ORELLANA, ORELLANA e SEGOVIA, 2020).

Segundo Nascimento, Santos Júnior e Pinheiro (2020), a vegetação predominante na região é a floresta equatorial subperenifolia densa, caracterizada por sua variedade de fisionomia e estrutura, incluindo espécies que perdem parcialmente suas folhas durante a estação mais seca. Esse tipo de vegetação é comumente conhecido como floresta densa de terra firme ou floresta tropical úmida.

A série histórica do balanço hídrico climatológico da região com a influência dos fenômenos El Niño e La Niña até 2019 pode ser vista na Figura 7.

Figura 7 - Precipitação Pluviométrica (mm) e Temperatura do Ar (°C) em anos de El Niño (2011), La Niña (2016) e Climatologia (1989 – 2019).

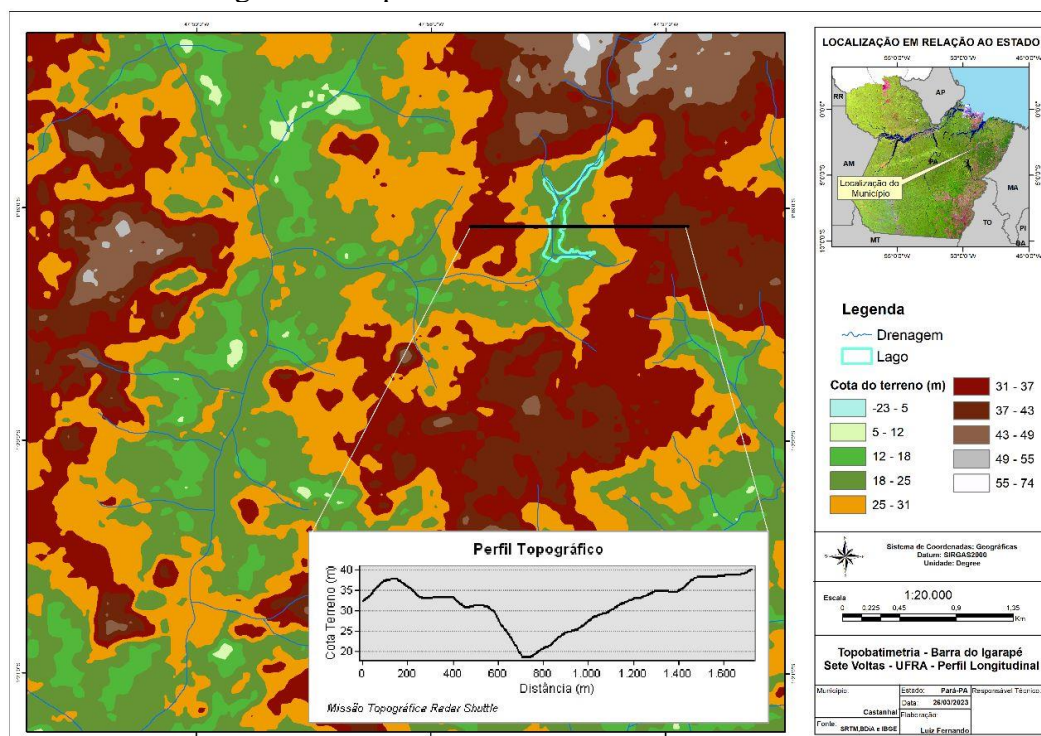


Fonte: (VIEIRA *et al.*, 2020)

Na área em estudo, os tipos de solos mais frequentes são o Argissolo Amarelo Distrófico, Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Concrecionário (SEGOVIA, ORELLANA e KANZAKI, 2020; NASCIMENTO, SANTOS JÚNIOR e PINHEIRO, 2020). Os primeiros são caracterizados como sendo solos profundos e com coloração amarelada, resultado da presença de óxidos de ferro e alumínio. São solos minerais bem desenvolvidos com textura arenosa ou franco-arenosa possuem baixa fertilidade química, apresentando fortemente e moderadamente ácidos com valores de pH em água variando de 4,6 a 5,8, valores relativamente baixos de alumínio trocável (Al^{3+}) e saturação por alumínio e valores muito baixos para soma de bases e capacidade de troca de cátions efetiva, denotando o caráter distrófico (SOARES, 2019). Já os segundos, são caracterizados pela presença de concreções, que são agregados de minerais endurecidos, geralmente de forma arredondada, com diâmetro variando de alguns milímetros até alguns centímetros. A presença de concreções nestes solos pode favorecer a infiltração de água no perfil do solo (SEGOVIA, ORELLANA e KANZAKI, 2020; NASCIMENTO, SANTOS JÚNIOR e PINHEIRO, 2020).

A topografia da cidade é caracterizada por uma superfície plana, com poucas elevações e uma altitude média de 17 metros acima do nível do mar. A Figura **Erro! Fonte de referência não encontrada.8** mostra o mapa de declividade da área em estudo.

Figura 8– Mapa de declividade da área em estudo.



Fonte: Dados do Autor (2021) de Castanhal.

3.2.1 Definição das condições de ruptura na modelagem

Na construção do modelo de simulação hidrodinâmica são necessárias as seguintes informações:

- Geometria: Caracterização topobatimétrica da região de estudo por meio de levantamentos de campo;
- Coeficientes de Rugosidade: para o desenvolvimento do modelo são utilizados coeficientes de perda de energia, como o coeficiente de Manning para avaliação das perdas por atrito, e coeficientes de contração e expansão;
- Condições de contorno: são condições introduzidas nos extremos dos trechos estudados, a montante e jusante do modelo, para que o modelo dê início aos cálculos da superfície da linha d'água;

- Condições de Cálculo: além das informações geométricas, de escoamento, condições de contorno e coeficiente de perda de energia é necessário que sejam informados os tempos de cálculo e de obtenção de resultados.

3.3 ESCOLHA DO MODELO HIDROLÓGICO

O software utilizado para a propagação da cheia foi o HEC-RAS 5.0.3 (Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System). Ele é amplamente utilizado em todo o mundo pela comunidade científica. Uma das principais vantagens do HEC-RAS é sua capacidade de lidar com uma ampla variedade de condições hidrológicas e hidráulicas, incluindo fluxo unidimensional e bidimensional, fluxo transiente e fluxo em regime permanente ou não permanente. Além disso, o software permite a modelagem de interações entre a água e a infraestrutura, como pontes, barragens e comportas. Outra vantagem do HEC-RAS é sua interface gráfica amigável e intuitiva, que facilita a construção e a visualização de modelos hidráulicos complexos. Também possui recursos avançados de visualização, incluindo animações de fluxo e mapas de elevação do terreno, além de uma ampla gama de recursos e vantagens em relação a outros softwares de modelagem hidráulica disponíveis no mercado (BRUNNER, 2016; US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2016).

3.4 SIMULAÇÃO DO ROMPIMENTO

Para a geração dos arquivos para a simulação, é seguido basicamente vetorização das informações geométricas das seções transversais no software ArcGIS. É necessário a definição da projeção que será utilizada e a inserção das curvas de nível para a geração do MDT - Modelo Digital de Terreno, que será o modelo de referência para extração das informações geométricas.

Após a geração do Modelo Digital do Terreno para a Referência e a inserção da imagem de satélite, a etapa seguinte consiste da vetorização dos elementos notáveis para a simulação. São os elementos que serão exportados do ArcMap e importados no software HEC-Ras. Os elementos são basicamente o rio, as margens do rio, as seções transversais topobatimétricas, pontes, reservatório e estrutura em linha que para o exemplo em questão será uma barragem.

O processo é semelhante para todos os elementos, sendo utilizadas linhas e polígonos para a definição dos arquivos. Inicialmente cria-se uma camada para cada um dos itens a serem vetorizados e posteriormente segue a etapa de vetorização propriamente dita. É necessário a execução da vetorização em ordem para cada elemento.

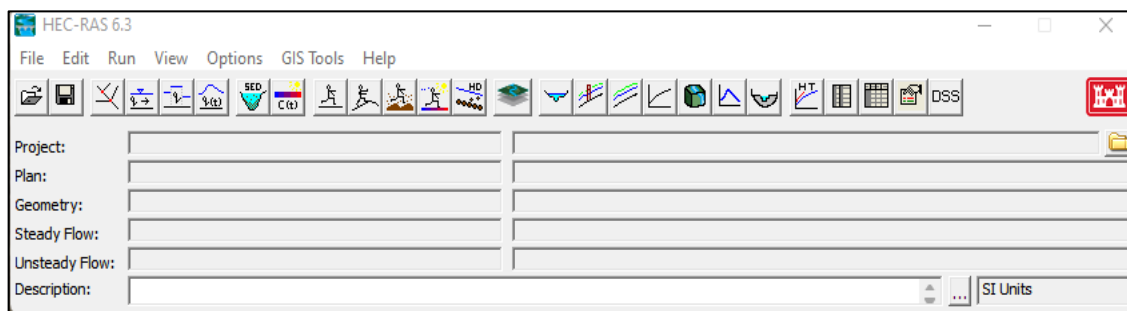
Primeiro é a representação da calha do rio, a vetorização do rio deve ser desenvolvida de montante para jusante utilizando as ferramentas de edição no ArcGis. A partir do layer criado com o HEC-GeoRAS, é criada uma polyline no eixo do rio efetuando-se cliques sucessivos. Após a vetorização o próximo passo consiste em identificar um nome para o rio com uso da ferramenta do HEC-GeoRas.

O segundo passo consiste na representação das margens do rio, o processo de vetorização das margens é semelhante ao processo descrito anteriormente para a vetorização do rio, onde é criada uma camada para cada elemento na opção *Create Ras Layer*, repetindo os passos descritos anteriormente. O terceiro passo é a representação das seções transversais, o processo de criação das seções deve respeitar algumas regras: 1 – As seções não podem cruzar; 2 – As seções são traçadas perpendicularmente ao fluxo, da margem esquerda para a margem direita e devem tocar apenas uma vez tanto as *bank lines* como as *flowpaths*. No entanto é possível a geração das seções transversais ser feita de maneira automática pelo programa. Após a geração das seções, é necessário a representação das *Flowpaths*, quarto passo da vetorização. As *Flowpaths* são as áreas por onde está previsto o fluxo de água, para o processo de criação devem ser desenvolvidas de montante para jusante, uma linha para cada lado do rio, incluindo o canal principal, mas como este já está feito, é recomendável aceitar a opção do programa de copiá-la automaticamente. O Quinto passo se refere à representação do reservatório. Para sua vetorização é utilizado o polígono, diferentemente dos itens anteriores, onde foram utilizadas linhas, o processo de vetorização é bem semelhante.

A próxima etapa é identificar, para todos os elementos, as topologias correspondentes: topologia do rio, topologia das seções transversais e verificações da área de armazenamento. Por último, após a verificação dos arquivos gerados o próximo passo, são exportados os dados geométricos clicando na opção *Export RAS Data*, no qual será gerado um arquivo *.SDF* no diretório selecionado, este arquivo será aberto no HEC-RAS para a geração da mancha de inundação.

A Figura 9 apresenta a tela inicial do programa, onde podem ser encontradas suas principais funções.

Figura 9 – Tela inicial do Hec-RAS



Fonte: autor (2023).

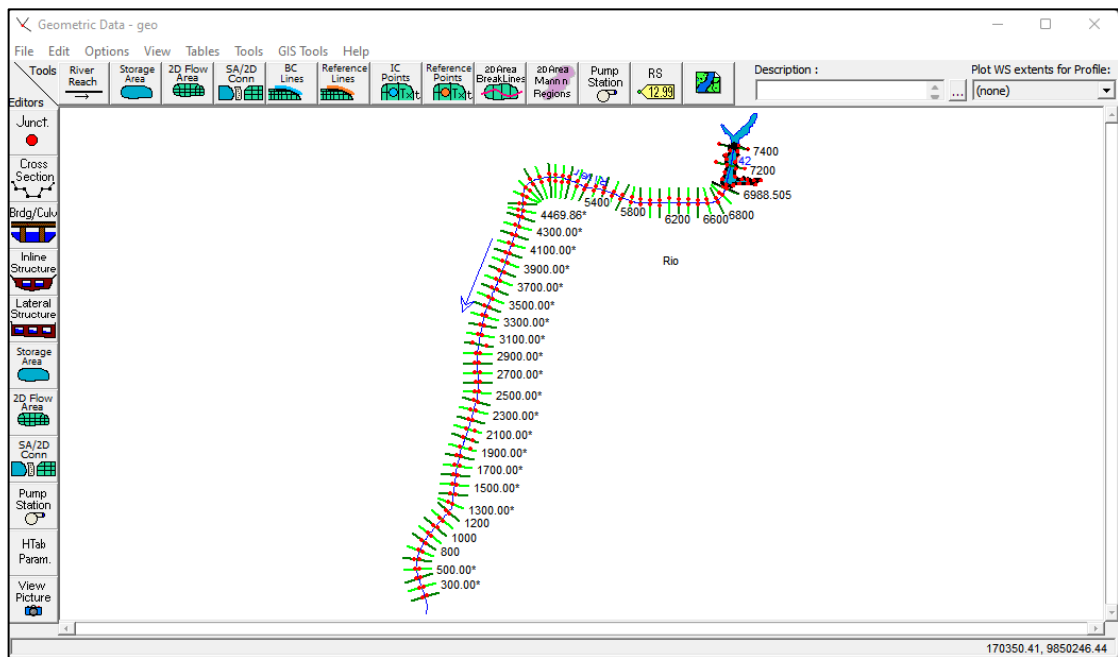
Para que fosse possível executar a simulação, foi elaborado um arquivo de topografia, onde constam o canal onde deverá ocorrer a inundação, o sentido do fluxo dele, a barragem e seções transversais contemplando a área de entorno do canal, possibilitando o melhor delineamento da mancha de inundação. O arquivo foi criado no software ArcGIS 10.5 e exportado na versão *SDF*. para criação do arquivo de geometria no HEC-RAS.

Em seguida, o arquivo de geometria foi importado para criação do arquivo de projeto no software HEC-RAS, com extensão *PRJ* e que contemplará todos os arquivos necessários para geração dos resultados da ruptura da barragem. Vale ressaltar que os arquivos que compõem a simulação final devem possuir títulos curtos e simples para não gerar erros no software.

Na janela “*Geometry Data*”, conforme Figura 10, pode-se realizar melhorias nas seções transversais criadas no ArcGIS para evitar erros na simulação e incluir informações como dimensões do barramento, tamanho da brecha, realizar interpolações para evitar mudanças bruscas no modelo e incluir o coeficiente de rugosidade do canal e margens direita e esquerda do rio principal.

O software HEC-RAS apresenta instabilidades quando as seções transversais possuem espaçamentos elevados isto ocorre, pois, dependendo da topografia, podem o comportamento da inundação varia muito em espaçamentos elevados e isto causa erros nos resultados. Para evitar estes problemas, foi executada uma interpolação na geometria, criando novas seções transversais, espaçadas em 100 metros.

Figura 10– Janela “geometry data”



Fonte: Elaborado pelo autor com o auxílio do aplicativo HEC-RAS (2021).

Após os ajustes na geometria, foram adicionadas informações sobre a barragem a romper, como dimensão, previsão do tamanho da brecha e tipo de rompimento, por *pipping* ou galgamento. Assim que estas informações são adicionadas, é possível ajustá-las conforme as equações apresentadas na Figura 11. A equação adotada foi a de Froehlich (2008) e o tipo de rompimento adotado foi o galgamento.

Figura 11– Janela de dados do rompimento

Dam (Inline Structure) Breach Data

Inline Structure: River Rio 6988.505

Breach This Structure

Breach Method: User Entered Data

Center Station: 150

Final Bottom Width: 6

Final Bottom Elevation: 24

Left Side Slope: 1

Right Side Slope: 1

Breach Weir Coef: 1.44

Breach Formation Time (hrs): 0.37

Failure Mode: Overtopping

Piping Coefficient: 0.5

Initial Piping Elev:

Trigger Failure at: WS Elev

Starting WS: 25.57

Breach Plot | Breach Progression | Simplified Physical | Physical Breaching (DLBreach) | Parameter Calculator | Breach Repair (optional) |

Input Data

Top of Dam Elevation (m): 26 Breach Bottom Elevation (m): 24

Pool Elevation at Failure (m): 25.57 Pool Volume at Failure (1000 m3): 17.16

MacDonald

Dam Crest Width (m): 4 Slope of US Dam Face Z1 (H:V): 0.7

Earth Fill Type: Fine homogeneous Slope of DS Dam Face Z2 (H:V): 0.7

Xu Zhang (and Von Thun)

Dam Type: Homogeneous/zoned-fill dam Dam Erodiability: Medium

| Method | Breach Bottom Width (m) | Side Slopes (H:V) | Breach Development Time (hrs) | |
|--------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------------|--------|
| MacDonald et al | 5 | 0.5 | 0.08 | Select |
| Froehlich (1995) | 4 | 1.4 | 0.24 | Select |
| Froehlich (2008) | 6 | 1 | 0.37 | Select |
| Von Thun & Gillete | 9 | 0.5 | 0.28 | Select |
| Xu & Zhang | 4 | 1.23 | 0.60 * | Select |

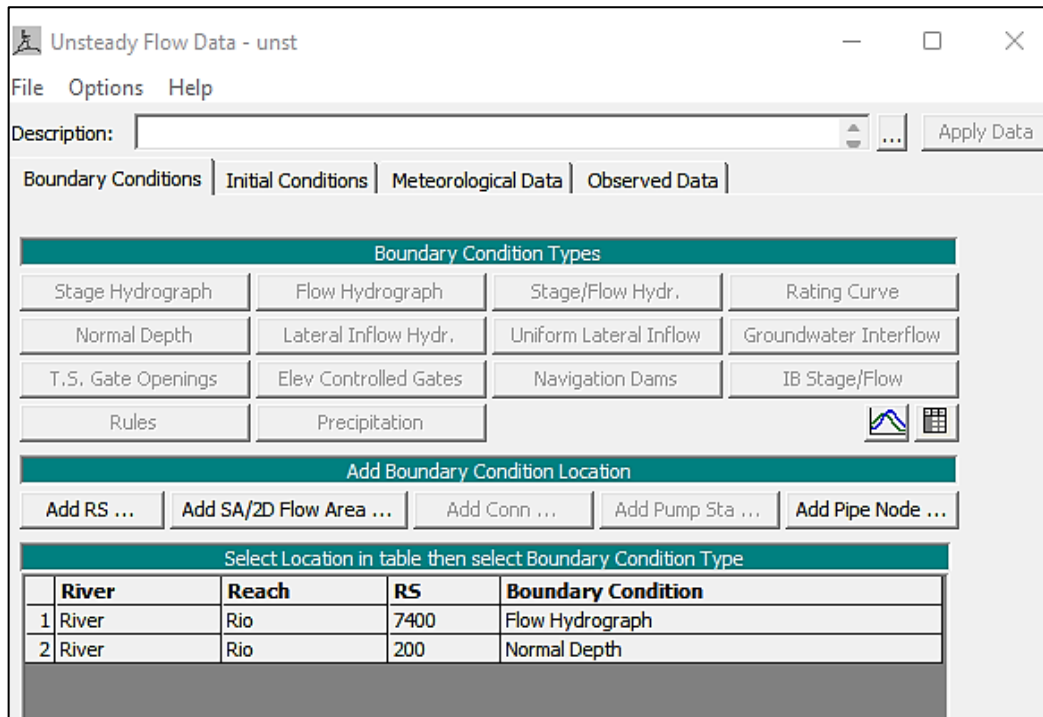
* Note: the breach development time from the Xu Zhang equation includes more of the initial erosion period and post erosion than what is used in the HEC-RAS breach formation time.

OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor com o auxílio do aplicativo HEC-RAS (2021)

O próximo passo consistiu em definir condições de contorno para ocorrência da inundação, considerando o regime de escoamento não permanente (*unsteady flow*), tendo sido adotada a declividade do canal e o hidrograma de ruptura, conforme na Figura 12.

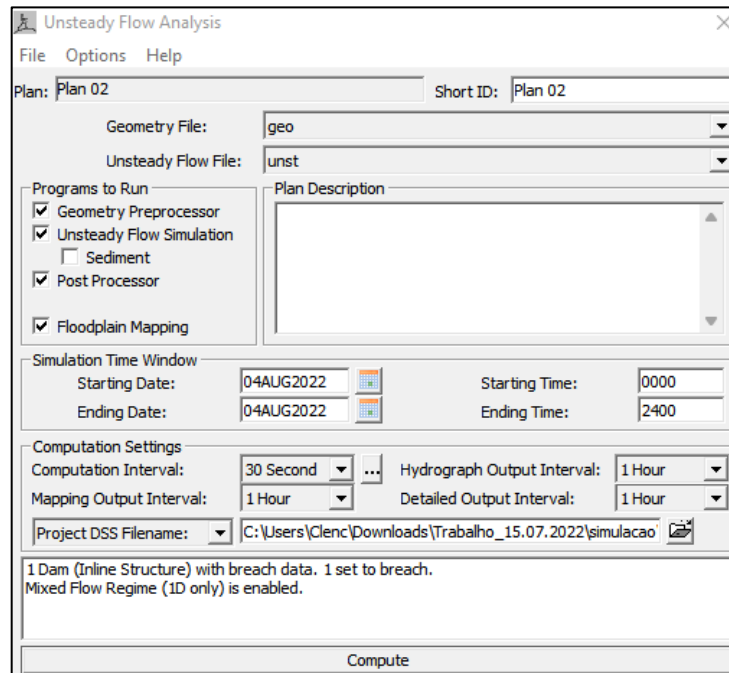
Figura 12– Hidrograma de ruptura



Fonte: Elaborado pelo autor com o auxílio do aplicativo HEC-RAS (2021)

Por fim, foi executada a simulação para todas as seções transversais criadas, adotando o tempo de duração do hidrograma de ruptura, tendo sido adotado um evento de 24 horas, para melhor acompanhamento das variações ocorridas na Figura 13.

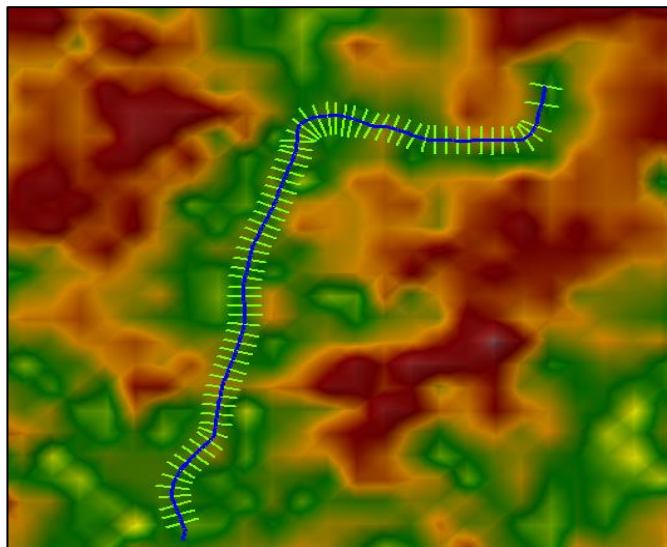
Figura 13– Detalhamento da simulação de ruptura



Fonte: Elaborado pelo autor com o auxílio do aplicativo HEC-RAS (2021).

Para criação dos mapas de inundação foi utilizado novamente o software ArcGIS 10.5. Vale ressaltar que a principal limitação encontrada neste estudo ocorreu devido ao comprimento das seções transversais, como é possível observar no Modelo Digital de Elevação (MDE), a superfície de entorno do canal principal possuía algumas áreas com desníveis pouco significativos, conforme Figura 14.

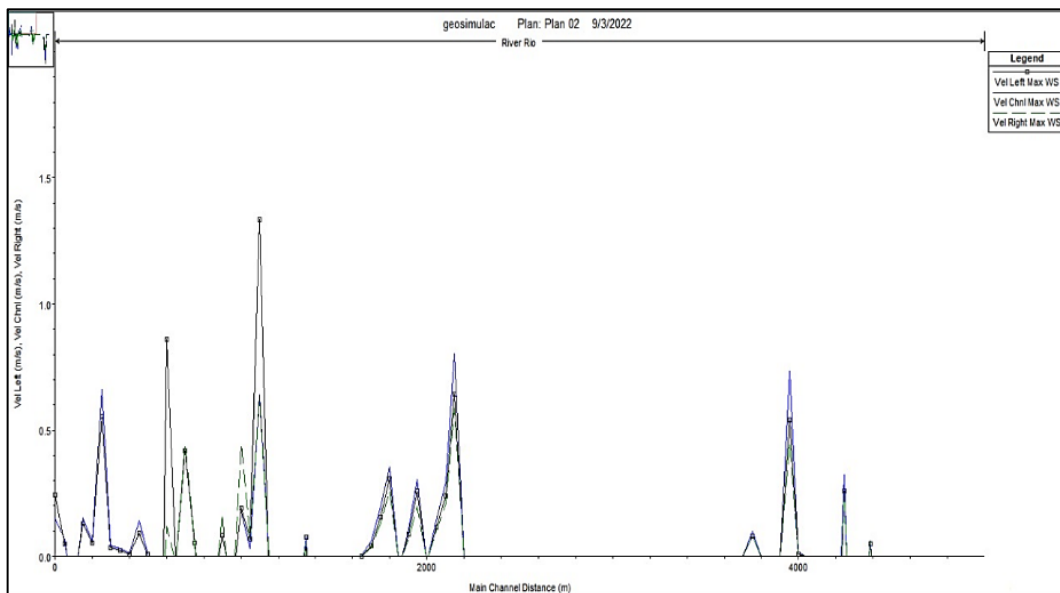
Figura 14– MDE da região



Fonte: Elaborado pelo autor com o auxílio do aplicativo HEC-RAS (2021).

Desta forma, verificou-se que em algumas regiões seria necessário estender as *cross sections* para contemplar toda a mancha de inundação. Contudo, para isto seria necessário reiniciar toda a modelagem, bem como, o estudo seria mais complexo devido a maior área contemplada. Embora tenham sido encontradas estas limitações, a inundação seguiu o curso pré-determinado durante a etapa de definição da geometria do canal e correspondeu ao esperado. A velocidade do fluxo variou de 0 a 1,40 m/s, o que corresponde com a declividade pouco elevada do canal principal e o volume de água mobilizado em conformidade com o volume do reservatório conforme Figura 15.

Figura 15– Velocidade do fluxo



Fonte: Elaborado pelo autor com o auxílio do aplicativo HEC-RAS (2021).

Com as informações obtidas foi verificada junto ao SNISB (Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens) 01 de maio 2022, que o barramento não foi cadastrado. A lei de Segurança de Barragens do Brasil, Lei nº 12.334 de 2010 e, da Resolução nº 696 de 2015 da ANEEL estabelece que tais barragens precisa estarem cadastrada junto a ANA. Desta forma foi realizado o preenchimento das informações referente ao reservatório junto a ANA. Em seguida, foi realizada uma inspeção no dia 03/09/2022, foi gerado um relatório de inspeção.

Para estimar a vazão foi utilizado o método I PAI WU. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3- Estimativa de vazão pelo método I PAI WU

| Parâmetro | Valor |
|----------------------------------|--------|
| Área da Bacia (Km ²) | 18.14 |
| Talvegue (Km) | 7.45 |
| Cota da Crista (m) | 262.75 |
| Cota da Base (m) | 202.00 |
| Tempo de Retorno (anos) | 100.00 |
| Coefficiente de Runoff (C) | 0.50 |
| Tempo de Concentração (min) | 119.22 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A partir da determinação dos coeficientes na Tabela 3, foi possível obter a estimativa de vazão de cheia, que totalizou 168,36 m³/s, ponderando-se o valor de 170m³/s.

O gráfico extraído do HEC RAS é uma cópia dos dados de vazão, a partir do qual verificou-se que uma chuva de 2h demora 1h para atingir a vazão máxima de 170m³/s, mostrado na Figura 16.

Figura 16– Parâmetros de entrada de vazão - HEC RAS

| No. Ordinates | Date | Simulation Time (hours) | Flow (m³/s) |
|---------------|----------------|-------------------------|-------------|
| 1 | 03Aug2022 2400 | 0:00:00 | 0.3 |
| 2 | 04Aug2022 0100 | 1:00:00 | 0.35 |
| 3 | 04Aug2022 0200 | 2:00:00 | 0.5 |
| 4 | 04Aug2022 0300 | 3:00:00 | 0.6 |
| 5 | 04Aug2022 0400 | 4:00:00 | 0.65 |
| 6 | 04Aug2022 0500 | 5:00:00 | 0.67 |
| 7 | 04Aug2022 0600 | 6:00:00 | 0.72 |
| 8 | 04Aug2022 0700 | 7:00:00 | 0.78 |
| 9 | 04Aug2022 0800 | 8:00:00 | 0.85 |
| 10 | 04Aug2022 0900 | 9:00:00 | 0.87 |
| 11 | 04Aug2022 1000 | 10:00:00 | 0.97 |
| 12 | 04Aug2022 1100 | 11:00:00 | 1.1 |
| 13 | 04Aug2022 1200 | 12:00:00 | 1.5 |
| 14 | 04Aug2022 1300 | 13:00:00 | 1.8 |
| 15 | 04Aug2022 1400 | 14:00:00 | 2 |
| 16 | 04Aug2022 1500 | 15:00:00 | 1.6 |
| 17 | 04Aug2022 1600 | 16:00:00 | 0.74 |
| 18 | 04Aug2022 1700 | 17:00:00 | 0.71 |
| 19 | 04Aug2022 1800 | 18:00:00 | 0.65 |

Fonte: Elaborado pelo autor com o auxílio do aplicativo HEC-RAS (2021).

O programa realizou automaticamente a interpolação da vazão com intervalo de 10, mostrado na Figura 17.

Figura 17– Parâmetros de entrada de vazão - HEC RAS

Flow Hydrograph

River: River Reach: Rio RS: 7400

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

Enter Table Data time interval: 1 Hour

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 04AUG2022 Time: 0000

Fixed Start Time: Date: Time:

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

| Hydrograph Data | | | |
|-----------------|----------------|----------------------------|----------------|
| | Date | Simulation Time (hours) | Flow (m3/s) |
| 7 | 04Aug2022 0600 | 6:00:00 | 0.72 |
| 8 | 04Aug2022 0700 | 7:00:00 | 0.78 |
| 9 | 04Aug2022 0800 | 8:00:00 | 0.85 |
| 10 | 04Aug2022 0900 | 9:00:00 | 0.87 |
| 11 | 04Aug2022 1000 | 10:00:00 | 0.97 |
| 12 | 04Aug2022 1100 | 11:00:00 | 1.1 |
| 13 | 04Aug2022 1200 | 12:00:00 | 1.5 |
| 14 | 04Aug2022 1300 | 13:00:00 | 1.8 |
| 15 | 04Aug2022 1400 | 14:00:00 | 2 |
| 16 | 04Aug2022 1500 | 15:00:00 | 1.6 |
| 17 | 04Aug2022 1600 | 16:00:00 | 0.74 |
| 18 | 04Aug2022 1700 | 17:00:00 | 0.71 |
| 19 | 04Aug2022 1800 | 18:00:00 | 0.65 |
| 20 | 04Aug2022 1900 | 19:00:00 | 0.62 |
| 21 | 04Aug2022 2000 | 20:00:00 | 0.58 |
| 22 | 04Aug2022 2100 | 21:00:00 | 0.45 |
| 23 | 04Aug2022 2200 | 22:00:00 | 0.38 |
| 24 | 04Aug2022 2300 | 23:00:00 | 0.32 |
| 25 | 04Aug2022 2400 | 24:00:00 | 0.3 |

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line: TW Check

Plot Data OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor com o auxílio do aplicativo HEC-RAS (2021).

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste item são apresentados e comentados os resultados sobre a simulação de rompimento da barragem da Universidade Federal Rural da Amazônia, bem como a área de inundação a jusante. Através dos dados coletados e análises realizadas, é possível identificar quais são as áreas de maior risco e os possíveis impactos de um eventual rompimento da barragem. Além disso, a apresentação dos resultados também permite avaliar a eficácia das medidas de prevenção e mitigação adotadas, bem como propor novas estratégias para garantir a segurança da população e do meio ambiente em torno do reservatório em estudo.

4.2 INSPEÇÃO DA BARRAGEM

A inspeção da barragem foi realizada de acordo com a Instrução Normativa SEMAS Nº 02, de 07 de fevereiro de 2018, Anexo VII - Ficha de Inspeção de Rotina (Regulares).

A Barragem modelada não apresenta quaisquer documentos bem como projetos, licenciamentos, outorga, plano de manutenção, relatório de inspeção ou cadastro junto aos órgãos competentes. Contudo, foi realizado o cadastro da barragem junto a Agência Nacional de Água e Saneamento Básico, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4- Cadastro técnico do barramento do Igarapé Sete Voltas.

| | |
|---|--|
| Código SNISB: | 3798 |
| ID da barragem – Fiscalizador: | Sem informação |
| Nome da Barragem: | Igarapé Sete Voltas |
| Nome Secundário: | - |
| Altura – Fundação: | - |
| Altura – Terreno: | 3 |
| Capacidade Total (hm³): | 0,24 |
| Uso Principal: | Psicultura |
| Latitude: | -6,09 |
| Longitude: | -49,85 |
| Categoria de Risco: | Alto |
| Dano Potencial Associado: | Alto |
| Regulada: | Sim |
| Empreendedor: | UFRA – Faculdade Federal Rural da Amazônia |
| UF: | PA |
| Município: | Castanhal |
| Fiscalizador: | - |

| | |
|-----------------------------------|---|
| Autorização: | 2697/2016 |
| Bacia: | Araguaia Tocantins |
| Região Hidrográfica | Região Hidrográfica do TOCANTINS-ARAGUAIA |
| Possui PAE: | - |
| Possui Plano de Segurança: | - |
| Data da Última Inspeção: | 03/09/2022 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A seguir são apresentadas algumas ocorrências observadas durante a inspeção da barragem. O Relatório de Inspeção encontra-se no Anexo 1.

A Figura 18 apresenta o talude de montante da barragem, inspecionado em 03 de março de 2022. Observa-se que o talude não apresenta proteção com *rip-rap*, portanto susceptível desenvolvimento de processos erosivos e escorregamento. Nota-se também a ocorrência de árvores e arbustos num trecho do talude, esse fato pode contribuir para o desenvolvimento de um processo de *piping*, podendo leva a ruptura da barragem.

Figura 18– Talude montante – Barragem Igarapé Sete Voltas/PA



Fonte: O autor (2022)

Na Figura 19 são apresentadas imagens do talude de jusante, onde foi observado a surgências d'água, junto ao pé da barragem, havendo a necessidade de monitoramento dessa vazão, pois, esse tipo de ocorrência pode levar a instabilidade estrutural do talude, carreamento de solo, podendo resultar na ruptura da barragem. Também foram encontrados arbustos e até árvores de médio porte. Apesar da cobertura vegetal ser importante para proteção do talude, o desenvolvimento de plantas com raízes profundas, é indesejável, pois: reduz a capacidade de visualização de anomalias (percolações, trincas, afundamentos) no processo de inspeção; pode gerar danos estruturais devido ao crescimento das raízes, que encurtam o caminho para a percolação, bem como, vazios no maciço pela decomposição de raízes. Desse modo, é

recomendável retirar todas as árvores e arbustos, exceto a grama, para manter a segurança da barragem.

Figura 19 – Anomalias no talude de jusante – Barragem Igarapé Sete Voltas/PA



Fonte: O autor (2022)

Na Crista da barragem foi observado desalinhamento, defeitos de drenagem e processo erosivo superficial, localizado, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20– Crista da Barragem Igarapé Sete Voltas/PA



Fonte: O autor (2022)

A Figura 21 apresenta a estrutura do vertedouro apresenta uma estrutura estável, com ocorrência de processo erosivo na ombreira direita da calha.

Figura 21– Vertedouro da Barragem Igarapé Sete Voltas/PA



Fonte: O autor (2022)

A Figura 22 apresenta uma vista do reservatório, o qual apresentou em alguns pontos escorregamentos nas ombreiras e ocorrência de algas.

Figura 22 – Reservatório da Barragem Igarapé Sete Voltas/PA

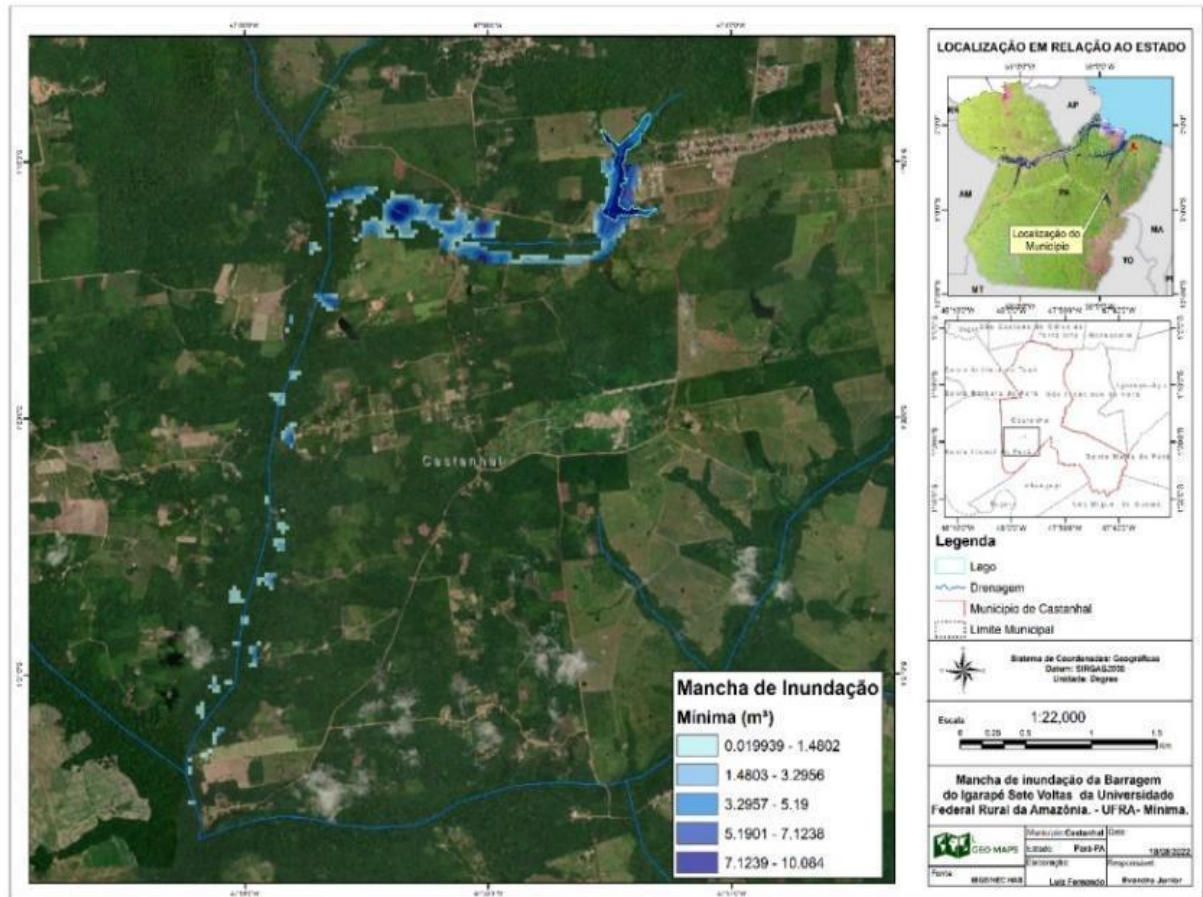


Fonte: O autor (2022)

4.3 MAPAS DE INUNDAÇÃO

A figura 23 apresenta a mancha de inundação mínima gerada após o rompimento da barragem. Observa-se que, em algumas regiões, pode ser encontrado um volume máximo de $10,08 \text{ m}^3$ e a mancha se localiza nas proximidades do canal principal, com espraiamento reduzido.

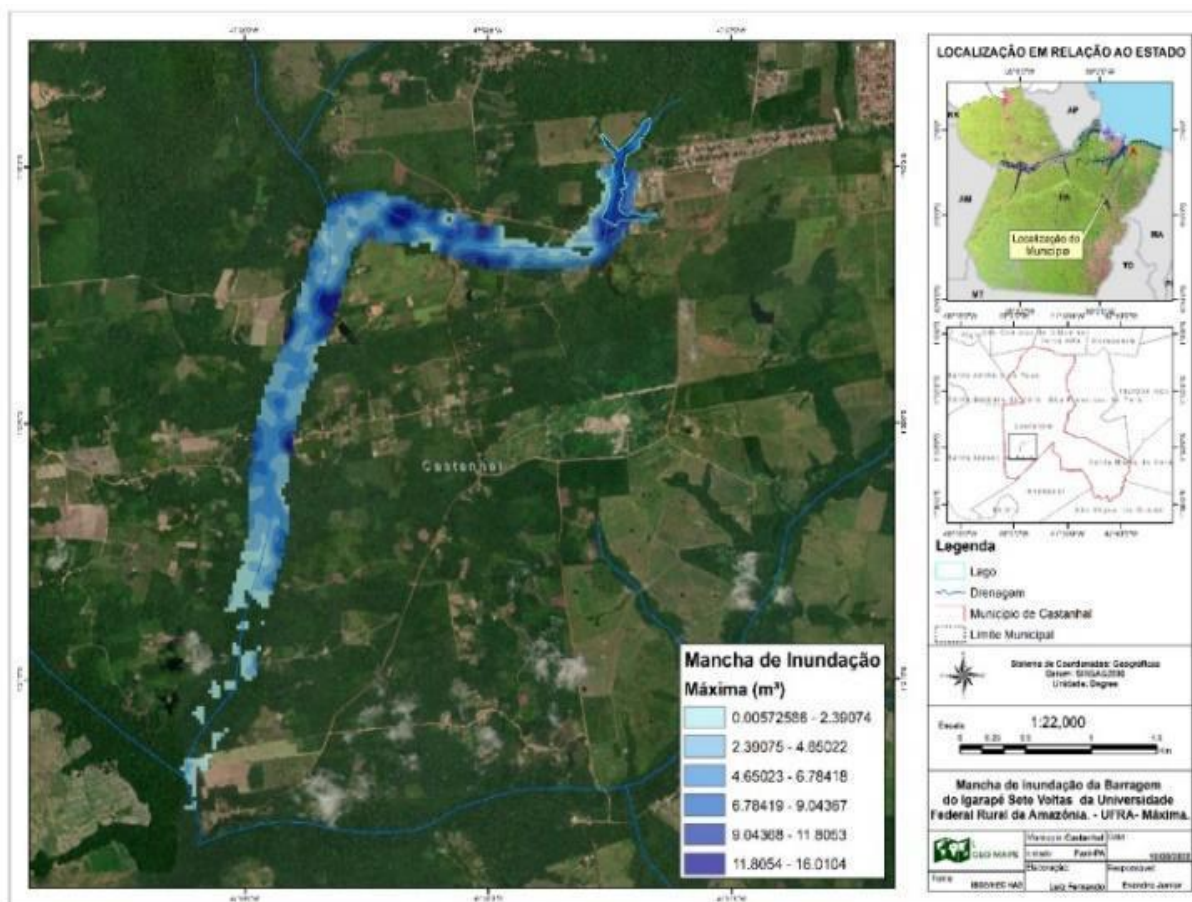
Figura 23 – Mancha de inundação – Nível d'água mínimo



Fonte: Elaborado pelo autor com o auxílio do aplicativo HEC-RAS (2021).

A Figura 24 mostra o estágio de inundação máxima, onde ocorre o pico do evento de ruptura da barragem.

Figura 24- Mancha de inundação no canal do Igarapé Sete voltas – Nivel d'água máximo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Neste caso, observa-se que em várias regiões o volume mobilizado chega a 16,01 m³. Além disso, a mancha se estende ao longo do canal principal e possui espraiamento considerável, podendo ser ainda mais extensa do que os resultados encontrados devido às limitações impostas pelo tamanho das seções transversais.

A área agrícola, a jusante, que foi inundada após o rompimento da barragem, poderá enfrentar uma série de impactos ambientais. Esses impactos podem ser observados tanto na fauna e flora local quanto na qualidade do solo e da água.

O aumento no fluxo de água pode provocar aceleração dos processos erosivos, além de destruir os habitats naturais de espécies e causar prejuízos às classes mais sensíveis. Muitas espécies que vivem no subsolo usam passagens subterrâneas para abrigo e armazenamento de alimentos. O possível rompimento da barragem em estudo, bem como o processo de inundação afetará todos os animais em áreas submersas, podendo levar até a extinção de espécies locais, reduzindo assim a biodiversidade das áreas submersas.

No segundo caso de simulação, onde ocorre a inundação máxima, o impacto sobre a fauna local apresentará maiores proporções e perdas, uma vez que a extensão destes impactos é diretamente proporcional à temperatura e a duração da inundação (WOODMAN, 2015; ZHANG et al., 2021).

A área atingida pela inundação sofrerá um forte escoamento superficial, o que levará ao arraste da serapilheira do solo. De acordo com Santos, Vasconcelos e Raiol (2022), a serapilheira é a camada que se localiza acima do solo, constituída de folhas, galhos, flores, frutos e miscelânea, sendo responsável por grandes processos no ecossistema florestal, como proteção do solo, retenção hídrica e ciclagem de nutrientes. Ela protege o solo contra o impacto direto da água da chuva e seus fragmentos vegetais presentes no solo realizam transportes de solutos através de carreadores e canais acumulando íons na estrutura deste, por meio do processo natural de lixiviação (SILVA *et al.*, 2020). Portanto, a violenta remoção da serapilheira, motivada pela mancha de inundação, diminuirá a disponibilidade hídrica do solo, bem como a disponibilidade de nutrientes neste. Além disso, a presença de serapilheira impede a remoção das partículas argilosas e da matéria orgânica no solo. Estas duas últimas são responsáveis por fornecerem locais de ligação negativa para cátions, aumentando a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) no solo. Cabe ressaltar ainda que, o rompimento da barragem em estudo, bem como o processo de inundação a jusante desta, acarretará um empobrecimento do solo em relação à disponibilidade de nutrientes para a flora local. Isso é confirmado por Campos Mantovanelli *et al.* (2016), que afirmaram que isso acarretará um aumento da acidez potencial (soma de H^+ e Al^{3+}) no solo em profundidade, levando à limitação da expansão do sistema radicular das plantas, dificultando assim o acesso à água e aos nutrientes que se encontram nas camadas mais profundas do solo.

A inundação acelerará o processo de erosão do solo, retirando destes sedimentos, minerais e nutrientes de sua constituição, podendo levar a uma diminuição de sua fertilidade e, por conseguinte, uma redução na produção agrícola familiar. Cardoso et al. (2021) ressaltam que, no geral, os solos no município de Castanhal são do tipo flanco arenosos, ou seja, sua textura apresenta maior suscetibilidade a processos erosivos devido ao elevado índice de areia que apresenta alta porosidade e baixa resistência dos seus agregados, sendo essa fração mais fácil de ser removida pela erosão hídrica superficial.

Os arrastamentos de terra podem cobrir terrenos férteis com materiais áridos e transportar sedimentos até as águas. Assim, além de terras menos produtivas, a erosão provoca a morte da fauna e flora do fundo dos rios e lagos por soterramento e turbidez nas águas (o que dificulta a ação da luz solar na fotossíntese de algas), essencial para a purificação e oxigenação

dos cursos hídricos. A grande quantidade de sedimentos, resíduos orgânicos, como restos de plantas e animais que são arrastados, são posteriormente depositados no fundo de rios e córregos. Isso pode levar à diminuição do oxigênio dissolvido na água, o que pode matar as espécies que habitam essa área. O processo também contribuiria para o assoreamento dos rios e lagos.

A erosão hídrica também pode levar defensivos agrícolas e adubos até os corpos de água, o que pode provocar o desequilíbrio na fauna e flora desses ecossistemas.

Por fim, a inundação pode ocasionar um impacto científico e no desenvolvimento econômico local, pois a jusante da barragem se encontra em diversos tanques de pesca, utilizados para estudos científicos feitos pela UFRA, que seriam perdidos no rompimento da barragem.

5. CONCLUSÕES

As barragens possuem estruturas que com o passar dos anos, podem acarretar inúmeros riscos de rompimento, impactando assim diretamente vidas humanas, e o ecossistema em torno do reservatório, provocando alterações nos cursos d'águas, no solo, na fauna e a flora local.

O processo de rompimento da barragem em estudo pode advir de um processo de erosão interna, galgamento, deslizamento, derrubamento e outras, sendo que sua causa pode ser oriunda de fenômenos naturais ou também por má gestão. Assim, foi realizada um relatório de inspeção como preconiza o manual do empreendedor sobre segurança de barragens.

Vale ressaltar a lei nº 14.066/2020, que preconiza as inspeções de segurança regular e especial com suas periodicidades, a qualificação da equipe responsável, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento definidos pelo órgão fiscalizador em função da categoria de risco e do dano potencial associado à barragem. No entanto, devido a total ausência de manutenção e inspeção do barramento assim como estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens recomenda-se que a inspeção seja realizada mensalmente e seja enviada os relatórios ao órgão fiscalizador e ao empreendedor para que sejam tomadas as providencias.

O barramento em estudo não possuía classificação quanto a categoria de risco (CRI) e ao dano potencial associado (DPA). Importante salientar que a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelece normativas, responsabilidades e instrumentos com o intuito de fornecer a gestão do risco. Os critérios para a classificação do barramento baseiam-se em sua Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA). Assim, foi realizado essa respectiva classificação evidenciando uma CRI alta e um DPA também alto.

Por fim, foi simulado a mancha de inundação a jusante do barramento a partir de sua ruptura utilizando o software Hec-Ras. O resultado obtido através dos mapas de inundação permite inferir que as áreas imediatas a jusante como o conjunto de tanques de piscicultura utilizados para pesquisa da Universidade, mata ciliar, e alguns empreendimentos sofreriam sérios danos, além da possibilidade de vidas humanas correrem risco de morte.

REFERÊNCIAS

ABDESSAMED, D.; ABDERRAZAK, B. Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in rainfall-runoff modeling and evaluating floodplain inundation maps in arid environments: case study of Ain Sefra city, Ksour Mountain. SW of Algeria. *Environ Earth Sci* 78, 586 (2019).

ACKERMAN, Cameron T.; P.E.; BRUNNER, Gary W. **Dam failure analysis using hec-ras and hec-georas.** Disponível em: http://acwi.gov/hydrology/mtsconfwshops/conf_proceedings/3rdFIHMC/11F_Ackerman.pdf. Acesso em: 22 abr. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DO ÁGUAS. **Relatório de segurança de barragens 2017.** Brasília: ANA, 2018. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2017/rsb-2017-versao-enviada-ao-cnrh.pdf> Acessado em: 15 de fev 2021.

ALVES, Maria Eduarda Pereira. **Simulação de rompimento de barragens em cascata com o modelo MGB.** 2018. Trabalho de Conclusão (Engenheiro Ambiental) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2018.

BRASIL, L. S. S. **Utilização de Modelagens Uni e Bidimensional para a Propagação de Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem. Estudo de Caso: Barragem Rio de Pedras.** 203f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

BRUNNER, G. W. (2016). **HEC-RAS: River channel hydraulics, User manual.** Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, Davis, CA.

Disponível em: <<http://veja.abril.com.br/noticia/brasil/relatorio-final-do-ministerio-publicoculpa-obras-pela-tragedia-de-mariana>>. Acesso em 10 mar. 2021.

ELETOBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S. A. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas.** Brasília, 2003, 279 p.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents. **Canadian Geotechnical Journal**, 25: 1000-1024, 2000.

Globo. 2015. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/brasil/acidente-em-mariana-omaiorda-historia-com-barragens-de-rejeitos-18067899>>. Acesso em 3 mar. 2021.

LAURIANO, A. W. **Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: Comparação Entre os Modelos FLDWAV e HEC-RAS.** 2009. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/REPA-82THXE>. Acesso em: 12 fev 2021.

LEON, Arturo S.; GOODELL, Christopher. Controlling HEC-RAS using MATLAB. *Environmental Modelling & Software*, Volume 84, 2016, Pages 339-348. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.026>.

MELO, Alexandre Vaz de; Teresa Cristina FUSARO. **Avaliação de métodos de análise de risco aplicados a barragens**. Em Seminário Nacional de Grandes Barragens, 30, Foz do Iguaçu, 2015.

MENESCAL, R. A. Risco e Segurança em engenharia – Problemas enfrentados pelo Ministério da Integração com obras de infra-estrutura hídrica. **Debate: O momento atual da engenharia brasileira**. Instituto de Engenharia. São Paulo, 7 mar. 2007. Transparência eletrônica

MENESCAL, R. D. **A Segurança de Barragens e a Gestão de Recursos Hídricos no Brasil**. Distrito Federal: ProÁgua, 2005.

MI. **Levantamento de Espelhos D'água no Brasil. Relatório Técnico**. Ministério da Integração Nacional. Brasília-DF, 2008.

Nascimento N.M. G; ET E TAL. **Diagnóstico de sustentabilidade ambiental de uma unidade produtiva na Vila de São Raimundo no município de Castanhal/PA**. Revista v. 13 n. 3 (2020): Nature and Conservation - Jun, Jul, Ago 2020

PEREIRA, Carlos Eugênio et al. Comparação entre modelos simplificados e o modelo HECRAS no estudo de áreas de inundação para o caso de Minas Gerais, Brasil. **Revista Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 38, n. 1, p.75-90, mar. 2017.

SANTOS, J. Brito dos; FRANCA, M. J.; ALMEIDA, A. Betâmio de. Risco Associado À Ruptura por Galgamento de Barragens em Aterro. **Ingeniería del Agua**, Barcelona, v. 14, n. 4, p.269-278, dez. 2007.

SEGOVIA, J. F. O.; ORELLANA, J. B. P.; KANZAKI, L. I. B. **Características físico-químicas dos principais solos na Amazônia**. In: SEGOVIA, J. F. O. (Ed.). Floricultura tropical: técnicas e inovações para negócios sustentáveis na Amazônia. Brasília, DF : Embrapa, 2020. cap. 3, p. 43-66.

SHAHRIM, M; ROS, F. C. **Dam Break Analysis of Temenggor Dam Using HEC-RAS**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 479, 2020. 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/479/1/012041>.

STEPHENS, T. F. **Manual sobre pequenas barragens de terra**: guia para localização, projeto e construção. Roma: Organização das Nações Unidas para a alimentação e agricultura, p.120, 2011.

TAHMİSCİOĞLU, M. Sait et al. **Positive and negative impacts of dams on the environment**. Disponível em: <<http://www.creditvalleyca.ca/wp:content/uploads/2011/02/60.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2016.

US Army Corps of Engineers. (2016). **HEC-RAS River Analysis System**. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>. Acesso em: 06 jul. 2016.

VERÓL, Aline Pires. **Simulação da propagação de onda decorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional**. 2010. 217 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

WORLD COMMISSION ON DAMS. **A new framework for decision-making**. Earthscan Publications. Disponível em: <http://www.dams.org/report/contents.html>. Acesso em: 10 fev. 2021.

XIONG, Yi. **A Dam Break Analysis Using HEC-RAS**. Jwarp, [s.l.], Scientific Research Publishing, Inc, v. 03, n. 06, p.370-379, 2011.

ZHANG, L. M.; XU, Y.; JIA, J. S. **Analysis of earth dam failures - A database approach**. Isgsr2007- First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, Shanghai, v. 1, n. 1, p.293-302, 18 out. 2007.

ANEXO

Ficha de Inspeção da barragem da UFRA/Castanhil (IN SEMAS N^o 02/2018)

| ANEXO VII | | | | |
|--|-----|-----|-------------------------|---|
| FICHA DE INSPEÇÃO DE ROTINA (Regulares) | | | | |
| Barragem: Barragem do Igarapé 07 Voltas | | | Data: 23/06/2022 | |
| Equipe: Inspeção | | | | |
| Talude de Montante | Sim | Não | Nº da Foto | Comentários. |
| Proteção contra erosão | () | (x) | | |
| Evidência de erosão | () | (x) | | |
| Evidência de movimentos | () | (x) | | |
| Evidência de escorregamentos | () | (x) | | |
| Evidência de trincas | () | (x) | | |
| Marco do nível máximo do lago | () | (x) | | |
| Rejeito adjacente à barragem | () | (x) | | |
| Vegetação | (x) | () | 1 | |
| Talude visualmente uniforme | () | (x) | 2 | |
| Outras não-conformidades | () | (x) | | |
| Evidência de reparos. | () | (x) | | |
| Crista | Sim | Não | Nº da Foto | Comentários |
| Aberturas / lavagem | (x) | () | 3 | |
| Deslocamentos laterais | () | (x) | | |
| Evidência de recalques | () | (x) | | |
| Evidência de trincas | () | (x) | | |
| Erosão nos contatos c/ ombreiras | () | (x) | | |
| Largura reduzida | () | (x) | | |
| Visualmente horizontal | (x) | () | 3 | |
| Existência de Instrumentação | () | (x) | | |
| Outras não conformidades | (x) | () | | Falta de limpeza e manutenção. |
| Evidência de reparos | () | (x) | | Sem manutenção preventiva ou periódica. |
| Talude de Jusante | Sim | Não | Nº da Foto | Comentários |
| Proteção contra erosão | (x) | () | 4 | Gramíneas distribuída por todo corpo |
| Evidência de erosão | () | (x) | | |
| Evidência de movimentos | () | (x) | | |
| Evidência de escorregamentos | () | (x) | | |
| Evidência de trincas | () | (x) | | |

| | | | | |
|--------------------------------------|-----|-----|---|---|
| Sinal de superfície freática | () | (x) | | |
| Evidência de percolação (Surgências) | (x) | () | | |
| Fluxo limpo, s/ resíduos sólidos | () | (x) | | |
| Evidência de contaminação | (x) | () | | |
| Vegetação | () | (x) | | |
| Talude visualmente uniforme | (x) | () | | |
| Existência de Instrumentação | () | (x) | | |
| Sistema de drenagem superficial | () | (x) | | |
| Outras não conformidades | (x) | () | 5 | Postes fincado sem previsão em projeto/ |
| Evidência de reparos | () | (x) | | |

| Ombreiras Esquerda e Direita | Sim | Não | Nº da Foto | Comentários |
|-------------------------------------|------------|------------|-------------------|----------------------|
| Evidência de percolação | () | (x) | | |
| Fluxo limpo, sem sólidos | () | (x) | | |
| Evidência de contaminação | () | (x) | | |
| Evidência de erosão | () | (x) | | |
| Evidência de trincas | () | (x) | | |
| Evidência de movimentos | () | (x) | | |
| Evidência de recalques | () | (x) | | |
| Existência de Instrumentação | () | (x) | | |
| Outras não conformidades | (x) | () | | Falta de manutenção. |
| Evidência de reparos | () | (x) | | |

| Pé do Talude de Jusante | Sim | Não | Nº da Foto | Comentários |
|-----------------------------------|------------|------------|-------------------|--------------------|
| Existência de dreno de pé | () | (x) | | |
| Dreno de pé operante | () | (x) | | |
| Existência de valeta/canaleta | () | (x) | | |
| Fluxo na valeta/canaleta | () | (x) | | |
| Evidência de percolação | (x) | () | 6 | |
| Fluxo limpo s/ resíduos sólidos | () | (x) | | |
| Evidência de contaminação | (x) | () | | |
| Evidência de contaminação vegetal | () | (x) | | |
| Material fofo no pé | () | (x) | | |
| Evidência de escorregamentos | () | (x) | | |
| Evidência de surgência de água | (x) | () | | |
| Existência de instrumentação | () | () | | |

| | | | | |
|--------------------------|-----|-----|--|--|
| Outras não conformidades | (x) | () | | |
| Evidência de reparos | () | (x) | | |

| Sistema Extravasor | Sim | Não | Nº da Foto | Comentários |
|--|------------|------------|-------------------|-----------------------------|
| Superfícies de concreto | (x) | () | | |
| Deslocamentos laterais | (x) | () | | |
| Evidência de recalques | () | (x) | | |
| Evidência de trincas/fissuras | (x) | () | | |
| Erosão nos contatos com ombreiras | (x) | () | | |
| Erosão na bacia e canal de restituição | () | (x) | | |
| Perda de borda livre | (x) | () | 7 | |
| Funcionamento de comportas | () | (x) | | |
| Obstruções para passagem d'água | (x) | () | 8 | |
| Conservação / manutenção | () | (x) | | |
| Outras não conformidades | (x) | () | 8 | Presença de lixo e sucatas. |
| Evidência de reparos | () | (x) | | |

| Reservatório | Sim | Não | Nº da Foto | Comentários |
|-------------------------------------|------------|------------|-------------------|---------------------------------------|
| Assoreamento | () | (x) | | |
| Enchimento além do N.A licenciado | (x) | () | 9 | |
| Desmatamento irregular | () | (x) | | |
| Estab. de taludes/margens/voçorocas | (x) | () | | |
| Plano de desmatamento da área | () | (x) | | |
| Plano/controlado de rebaixamento | () | (x) | | |
| Qualidade da água | () | (x) | | |
| Outras não conformidades | (x) | () | | Falta de documentos bem como outorgas |
| Evidência de reparos | () | (x) | | |

| Informações Gerais | Sim | Não | Nº da Foto | Comentários |
|---------------------------------|------------|------------|-------------------|--------------------|
| Associação c/ barr. de rejeitos | () | (x) | | |
| SCF(s) nesta barragem | () | (x) | | |
| Estrutura de decantação | () | (x) | | |
| Estruturas enterradas/submersas | () | (x) | | |
| Vertedouro próximo a barragem | (x) | () | 7 | |
| Tubulações nesta barragem | () | (x) | | |
| Evidência de AMD | () | (x) | | |
| Rejeito Próximo a barragem | () | (x) | | |

| | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Crista acessível a caminhões | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Acesso público à barragem | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Outras observações | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Barragem sem manutenção e com indícios de rompimento. |