



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL  
EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**TALITA CINTRA BRAGA**

**SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDA DE CHEIA  
DECORRENTE DO ROMPIMENTO DE UMA BARRAGEM  
DE REJEITOS INDUSTRIAIS DE FERTILIZANTES EM  
ARRAIAS, TOCANTINS**

**Palmas, TO**

**2022**

**Talita Cintra Braga**

**Simulação da propagação de onda de cheia decorrente do rompimento de uma barragem de rejeitos industriais de fertilizantes em Arraias, Tocantins**

Artigo apresentado à Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Universitário de Palmas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador (a): Dr. Ricardo Ribeiro Dias

**Palmas, TO**

**2022**

# FOLHA DE APROVAÇÃO

TALITA CINTRA BRAGA

SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDA DE CHEIA DECORRENTE DO  
ROMPIMENTO DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS INDUSTRIAIS DE  
FERTILIZANTES EM ARRAIAS, TOCANTINS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental,  
Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca  
Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

## BANCA EXAMINADORA



---

Dr. Ricardo Ribeiro Dias (Presidente)  
Universidade Federal do Tocantins



---

Dr. Girlene Figueiredo Maciel (Membro Titular Interno)  
Universidade Federal do Tocantins



---

Dra. Rose Mary Gondim Mendonça (Membro Titular Externo)  
Universidade Federal do Tocantins

Aprovada em: 21 de outubro de 2022.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

- BS13s Braga, Talita Cintra.  
Simulação da propagação de onda de cheia decorrente do rompimento de uma barragem de rejeitos industriais de fertilizantes em Arraias, Tocantins. / Talita Cintra Braga. – Palmas, TO, 2022.  
61 f.  
Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2022.  
Orientador: Ricardo Ribeiro Dias  
1. HEC-RAS. 2. HEC-HMS. 3. Rompimento de Barragem. 4. Rejeito de Mineração. I. Título

**CDD 628**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

Dedico este trabalho aos meus pais, por investirem em minha formação a qualquer custo e aos meus avós, por me ensinarem que mais vale o caminhar

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal do Tocantins (UFT), à Avaliação do Ensino de Pós-Graduação (CAPES) e ao orientador Prof. Dr. Ricardo Ribeiro Dias.

Agradeço aos meus colegas Gabriel Marinho e Luiza Virgínia por todas as sugestões no desenvolvimento do trabalho e pela disposição em ajudar.

Por fim, agradeço as minhas irmãs e ao Guilherme Queiroz pela força, incentivo e otimismo, independente das circunstâncias e por estarem comigo em todos os momentos.

## RESUMO

Barragens são estruturas versáteis utilizadas para diversas finalidades, inclusive a contenção de rejeitos decorrentes da atividade de mineração. Nos últimos anos o rompimento destas estruturas se tornou um fato recorrente no Brasil, com destaque para os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), que acarretaram impactos ambientais irreversíveis e perda de centenas de vidas. Isso vem mostrando o quanto a aplicação de modelos computacionais para prever cenários ocasionados pelo rompimento de barragem é apropriada por permitir antecipar as consequências do rompimento de barragens e balizar os planos de ação de emergência de barragens. No estudo utiliza-se o HEC-RAS versão 6.1., que incorpora a modelagem do rompimento de barragens de fluidos não newtonianos, combinado com o ArcGIS, modelo digital de elevação ALOS PALSAR e outros dados biofísicos da área e como foco de observação foi definida a barragem da Itatós Arraias Mineração e Fertilizantes. A simulação do comportamento da onda de cheia foi por rompimento do tipo piping, com os resultados mostrando uma área de inundação 484,02 ha, profundidade máxima de 19,78 m, velocidade máxima de propagação da onda de 13 m/s e vazão máxima 2.619,25 m<sup>3</sup>/s (Seção 1), e as possíveis interferências/impactos em paisagens naturais, áreas de uso antrópico e obras públicas.

**Palavras-chaves:** HEC-RAS, HEC-HMS, rompimento de barragem, rejeitos de mineração, simulação de onda de cheia.

## **ABSTRACT**

Dams are versatile structures used for various purposes, including tailings containment resulting from mining activities. In recent years, the rupture of these structures has become a recurring fact in Brazil, especially the disasters in Mariana (2015) and Brumadinho (2019), which caused irreversible environmental impacts and loss of hundreds of human lives. This demonstrates the relevance of computer models for predicting dam failure scenarios, which can be very useful in anticipating the consequences of dam breaks and guiding emergency action plans of dams. In the study conducted for the Itafós Arraias Mineração e Fertilizantes S.A. tailings dam in Tocantins, the HEC-RAS version 6.1 software, which incorporates non-Newtonian fluid dam break modeling, combined with ArcGIS, ALOS PALSAR digital elevation model and other biophysical data regarding the area affected by the dam were used. Simulation of the flood wave behavior was by piping-type break, with the results indicating a flood area of 484.02 ha, maximum depth of 19.78 m, maximum wave propagation velocity of 13 m s<sup>-1</sup> and maximum flow of 2,619.25 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (Section 1), in addition to possible interference/impacts on natural landscapes, areas of anthropic use and public works.

**Key-words:** HEC-RAS, HEC-HMS, dam break, mining tailings, flood wave simulation..



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Caracterização da Bacia Hidrográfica. ....	30
Tabela 2 - Dados de entrada para metodologia de distribuição de chuva de Huff. ....	31
Tabela 3 - Cálculo de CN para bacia hidrográfica analisada .....	34
Tabela 4 - Valores de coeficiente de Manning utilizados (CHOW, 1959). ....	40

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Breve histórico de ruptura de barragem de rejeitos .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Barragem de rejeito.....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 Formas de rompimento de barragem .....</b>	<b>21</b>
3.3.1 Erosão interna (piping) .....	21
3.3.2 Galgamento.....	22
3.3.3 Deslizamento .....	22
<b>3.4 Modelagem hidrológica utilizando o HEC-HMS.....</b>	<b>22</b>
<b>3.5 Modelagem hidráulica utilizando o HEC-RAS .....</b>	<b>23</b>
<b>3.6 Segurança de barragem .....</b>	<b>25</b>
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 Barragem de rejeitos da Indústria Itafós .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2 Delimitação da bacia hidrográfica a montante.....</b>	<b>27</b>
<b>4.3 Uso e tipo de solo no entorno da barragem.....</b>	<b>30</b>
<b>4.4 Balanço hídrico na área de estudo .....</b>	<b>30</b>
<b>4.5 Obtenção do hidrograma de entrada do reservatório.....</b>	<b>32</b>
<b>4.6 Determinação da onda de cheia a jusante da barragem .....</b>	<b>37</b>
<b>4.7 Características do rompimento .....</b>	<b>39</b>
<b>4.8 Obtenção do mapa de inundação .....</b>	<b>42</b>
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>43</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As rochas fosfáticas são amplamente utilizadas como matérias-primas para produção de fertilizantes, produção de detergentes, suplementos alimentares de animais, etc. Durante o processamento de minérios fosfatos, cerca de 30-40% da massa de minério é descartada como rejeito após operação de beneficiamento (GNANDI et al., 2005). As barragens de rejeitos são estruturas utilizadas por mineradoras como forma de armazenamento dos resíduos extraídos após este beneficiamento (SANTOS et al., 2020).

De acordo com Cardozo, Pimenta e Zingano (2016), juntamente com pilhas de estéril, as barragens são as maiores estruturas geotécnicas construídas pelo homem, que há milênios já utilizavam desta técnica para diversos fins: armazenamento de água, controle de vazões, geração de energia hidrelétrica, entre outros. No entanto, estas construções apresentam risco e potencial de dano elevado, dependendo de sua alocação.

Azam e Li (2010), que apresentam para os últimos cem anos um histórico mundial das falhas em barragens de mineração, expõe outro aspecto significativo: cerca de 1,2% das barragens de mineração apresentaram algum tipo de falhas, contra 0,01% das barragens para outras finalidades, isto para os 100 anos antecessores à publicação.

Para Amaral (2017), a ruptura é um impacto negativo que traz consequências drásticas a todos os envolvidos no entorno de uma barragem. Independente se o rompimento ocorreu devido à má inspeção, falha nos materiais ou métodos construtivos, os transtornos são inevitáveis quando não há um plano de evacuação da população ou medidas mitigatórias para combater tal ação. Se a barragem vier a se romper, há danos irreversíveis às comunidades, cidades e ao meio ambiente. No caso de barragem de rejeito, este dano é intensificado graças aos contaminantes presentes no fluído que acarretam outros prejuízos ambientais, como alterações na qualidade do solo e da água (NUNES, 2019). Apesar da classificação deste tipo de resíduo segundo a NBR 10.004 da ABNT ser IIB – inerte, Gnandi, Boroon e Edorh (2009) constataram que os rejeitos de fosfato contêm níveis altos de metais potencialmente tóxicos, como Cr, Cd, V, Ni, U e Zn. Os elementos pesados poderiam poluir o solo e a superfície/águas subterrâneas. Moradores a jusante da instalação de rejeitos estão sujeitos a riscos de saúde devido ao consumo de água contaminada com elevadas concentrações de metais pesados ou pela cadeia alimentar.

Com o aumento de número de barragens, cresce também a preocupação quanto à segurança de suas estruturas, que consiste em manter a sua integridade estrutural e operacional, e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente (BRASIL, 2010). O tema

passou a constar na pauta da política brasileira somente em 2010, embora já fosse objeto de discussão entre os profissionais de engenharia e geotecnia desde os anos 1980 (FRANCO, 2008). Entretanto, de acordo com Sampaio (2016), a engenharia não conseguiu ainda desenvolver técnicas que assegurem totais seguranças às barragens, já que há uma série de variáveis relacionadas ao projeto e fundações, ao material utilizado e à velocidade ou condições de enchimento, que, isolada ou conjuntamente, tornam a imunidade ao risco um desejo irrealizável.

Diante do potencial danoso de barramentos em geral, foi aprovada a Lei 12.334 de 2010 (BRASIL, 2010), que traz definições, atribuições, delega responsabilidades e determina exigências para instalação destas obras hidráulicas. Entre as exigências, está a elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE), que deve ser elaborado de acordo com o órgão fiscalizador competente. No caso de barragens de rejeito, a Agência Nacional de Mineração (ANM) é responsável pela fiscalização, sendo ela a entidade outorgante de direitos minerários para fins de disposição final ou temporária de rejeitos.

O PAE referido como Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM) na Portaria DNPM n. 526, Seção 1, Art. 2 (BRASIL, 2013), deverá contemplar pelo menos:

XII - estudo de cenários: estudo realizado capaz de caracterizar adequadamente os possíveis cenários que ocorrerão em virtude de uma eventual ruptura da Barragem onde os métodos para tal estudo devem ser explicitados no PAEBM, sendo de responsabilidade do empreendedor; e XIII - mapa de cenários: produto do estudo de cenários, compreendendo a delimitação geográfica georreferenciada das áreas potencialmente afetadas por uma eventual ruptura da Barragem e seus possíveis cenários associados.” (BRASIL, 2013).

De modo geral, no PAE são informadas diversas características do barramento, apresentando orientações que devem ser tomadas para situações emergenciais, buscando reduzir danos ocasionados por ruptura de barramentos (JUNIOR, 2013). Quanto melhor a compreensão dos prejuízos que estes desastres podem vir a causar, mais as ações preventivas certas se tornam acessíveis, minimizando impactos ambientais. Assim, a modelação matemática contribui para enriquecer estes estudos, gerando importantes dados para diferentes situações de rompimento de barragens, podendo ser facilmente programadas a partir de dados de entrada que caracterizem o empreendimento.

Observando o quadro atual brasileiro sobre estudo de barragens de rejeito de mineração e a importância das simulações de rompimento dessas barragens, dedicou-se, então a um estudo de caso da Barragem de Contenção de Rejeito da Indústria Itafós, em Arraias, Tocantins, por

ser a maior barragem de rejeito localizada no estado. Barragens dessa natureza exigem a aplicação de modelos capazes de simular seus rompimentos, contemplando a previsão da mancha de inundação, áreas de risco e potenciais danos, a fim de se ter medidas documentadas previamente para caso de acidentes, contidas no Plano de Ações Emergenciais (PAE).

Para o estudo da barragem, na simulação do rompimento utiliza-se o software HEC-RAS - *Hydrologic Engineering Centers River Analysis Systems* (USACE, 2022), do Centro de Engenharia Hidrológica do *U.S. Army Corps of Engineers*. O objetivo do estudo de caso é prever o alcance da mancha de inundação, a profundidade e velocidade máxima da lâmina de água e, conseqüente, os potenciais impactos causados na área.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral é do simular o rompimento da Barragem de Contenção de Rejeito da Indústria Itafós situada no município de Arraias-TO com a avaliação do comportamento da onda de cheia gerada a partir do software HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Centers River Analysis Systems*) e seus prováveis impactos ambientais.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Realizar levantamento de dados ambientais da área de influência do empreendimento para estruturar e gerar banco de dados geográficos do projeto em *geodatabase* (ArcGIS) para permitir a combinação com o HEC-RAS;

2. Realizar estudo hidrológico da área para a compreensão das características da bacia onde está contida a barragem de rejeitos de mineração;

3. Realizar modelagem hidrológica no HEC-HMS para verificar a possível ocorrência dos prováveis tipos de rompimento;

4. Aplicar o modelo de simulação HEC-RAS para a geração da mancha de inundação a partir da onda de cheia gerada e, conseqüentemente, identificação das possíveis interferências ambientais.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Devido ao grande potencial hídrico, o Brasil apresenta inúmeras barragens, estrutura que desempenha relevante papel nos usos múltiplos da água, o que pode impactar o equilíbrio de um ecossistema e ainda, quando ligada a possibilidade de falha, historicamente apresenta consequências catastróficas, dado o aumento da vazão, velocidade e profundidade do escoamento ao longo da planície de inundação (NETO, 2016).

Para que se desfrute dos benefícios desta estrutura sem grandes consequências, deve-se analisar os riscos devido a possibilidade de sua ruptura das barragens, sendo a avaliação dos impactos provocados pelo colapso desta estrutura um estudo preventivo. Esta possibilidade é uma preocupação de órgãos públicos e da população em geral, pois os impactos gerados são drásticos. Os estudos hipotéticos devem ser realizados para que o monitoramento das barragens seja preciso, reduzindo as possibilidades de ocorrências desses eventos e subsidiando melhor gestão por parte dos responsáveis (COLLISCHONN; TUCCI, 1997).

Assim, o uso de geoprocessamento e modelos matemáticos são ferramentas necessárias, pois permitem levantar dados hídricos e cartográficos, que juntamente com informações operacionais, geram estimativa de vazão de pico, tempo de esvaziamento, propagação da onda de cheia, entre outros. Ou seja, estes instrumentos são imprescindíveis para auxiliar em casos de rompimento da barragem, informando a população que poderá ser atingida e áreas inundadas pelo rompimento.

#### 3.1 Breve histórico de ruptura de barragem de rejeitos

Conforme mencionado anteriormente, as barragens de rejeitos podem causar impactos ambientais significantes, principalmente em caso de rompimento ou falha estrutural.

As barragens de Velha El Cobre e Nova El Cobre localizada no Chile romperam, liberando cerca de 1.9 milhões de m<sup>3</sup> e 350.000 m<sup>3</sup> de rejeito da mineração de cobre, devido ao fenômeno de liquefação ocasionado pelo terremoto de 1965, tal acontecimento provocou a morte de mais de 200 pessoas e a destruição da cidade de El Cobre (WISE URANIUM PROJECT, 2021). Além dessas, mais quatro barragens de cobre (Nova La Patagua, Los Maquis, Bellavista e Cerro Negro N.3) romperam no Chile devido ao abalo causado pelo terremoto de 1965 e liberaram em conjunto cerca de 211.000 m<sup>3</sup> de rejeito no meio ambiente (WISE URANIUM PROJECT, 2021).

Na cidade de Derbyshire no Reino Unido, em 1966, cerca de 30.000 m<sup>3</sup> de rejeito proveniente da mineração de carvão percorreu em média 300 metros de sua origem devido à uma falha na fundação da barragem que resultou em seu rompimento (WISE URANIUM PROJECT, 2021).

Em 1971, na cidade de Fort Meade localizada na Flórida nos Estados Unidos da América, uma barragem de fósforo operada pela companhia Cities Serice Co. entrou em colapso por motivos desconhecidos, lançando 9 milhões de m<sup>3</sup> de lama no meio ambiente. Os rejeitos viajaram 120 km rio abaixo no Peace River, o que causou a morte de milhares de peixes e animais aquáticos (WISE URANIUM PROJECT, 2021).

Em 1972, após fortes pancadas de chuva, a estrutura de contenção de rejeito de mineração de carvão, operada pela sociedade Pittston Coal em Buffalo Creek, no oeste da Virginia, Estados Unidos da América, rompeu, aproximadamente 500.000 m<sup>3</sup> de rejeito foi disposto no meio ambiente, atingindo áreas situadas à 27 km de sua montante. Houve 125 mortes e 500 casas foram destruídas ao longo da trajetória do rejeito, além da destruição das rodovias (WISE URANIUM PROJECT, 2021).

Em julho de 1985, em Val di Stava, na Itália, a estrutura de duas barragens de contenção de rejeitos provenientes de atividades minerárias da Prealpi Mineraria entrou em colapso, derramando cerca de 180 mil m<sup>3</sup> de lama, água e areia sobre a comunidade de Stava, o que resultou em 268 mortes, vários danos ambientais e econômicos. As possíveis causas apontadas foram a adoção de um fator de segurança inaceitavelmente baixo e o bloqueio de um tubo de decantação (CHANDLER; TOSATTI, 1995).

Em abril de 1998 na cidade Aznalcóllar, na Espanha, uma falha na barragem de rejeitos de mineração de pirita resultou na liberação de cerca de 5 milhões de m<sup>3</sup> de água ácida e de lama rica em zinco e cádmio, contaminando mais de 10.000 ha de terras agrícolas e alagando um trecho de 40 km do Rio Guadiamar, que percorre o lado leste do Parque Nacional de Doñana. Além disso, estima-se que houve a contaminação de aproximadamente 900 ha da reserva de Doñana (PAIN et al., 1998). De acordo com Pain et al.(1998), após o rompimento da barragem, o pH da água dos pântanos situados no Parque Nacional caiu de 8,5 para valores inferiores a 4,5, e o nível de Zn chegou a 270 mg.L<sup>-1</sup>, Pd a 2500 µg.L<sup>-1</sup>, Fe a 40,2 mg.L<sup>-1</sup> e Cd a 881 µg.L<sup>-1</sup>, desencadeando assim a morte de grande parte da fauna aquática local.

Em agosto de 2014 na Província da Colúmbia Britânica, no Canadá, a barragem de rejeitos da extração de cobre e ouro de Mount Polley, operada pela corporação Imperial Metals, rompeu-se e lançou mais de 24 milhões de m<sup>3</sup> de resíduos perigosos (arsênio, chumbo, mercúrio, selênio, fósforo, dentre outros) ao longo do Córrego Hazeltine até atingir o Lago



Quesnel. Tal acontecimento provocou danos irreparáveis ao povo Secwepemc e ao meio ambiente (MASHALL, 2017).

No Brasil em 2019 existiam cerca de 19.388 barragens de usos múltiplos registradas no Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de Barragens (SNISB), das quais 156 foram classificadas pelos órgãos fiscalizadores na categoria de risco alto com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH (ANA, 2019). Deste total 427 barragens estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens e são utilizadas para contenção de rejeitos de mineração (ANA, 2019).

O processo de automonitoramento brasileiro vem sendo adotado com o intuito de transferir o custo do serviço para o poluidor, no entanto, este sistema sem auditoria do Estado tem colocado em risco a saúde humana e o meio ambiente visto que o setor privado tende a priorizar a maximização dos lucros (HELLER, 2019).

Nos últimos anos, o país tem presenciado uma série de desastres envolvendo barragens de rejeitos provenientes de lavra de minério, os quais são possivelmente resultantes de falhas durante o processo de licenciamento ambiental e a fiscalização de tais estruturas. A principal causa de acidentes e de incidentes em barragens é a negligência dos proprietários e dos operadores das barragens na adoção de procedimentos de segurança para a minimização de riscos potenciais (CASTRO; ALMEIDA, 2011).

Em novembro de 2015, o rompimento da barragem de rejeitos do Fundão da empresa Samarco Mineração S.A em Mariana, Minas Gerais, provocou perdas de vidas humanas e animais, a destruição de dois povoados e danos irreparáveis ao meio ambiente (LASCHEFSKI, 2020). A negligência da empresa e do órgão fiscalizador foi o motivo apontado como desencadeador do ocorrido (LASCHEFSKI, 2020; ZHOURI et al., 2016).

Alguns anos mais tarde, em janeiro de 2019, apesar de ser classificada de baixo risco (NEVES; SILVA; HELLER, 2020), a barragem de rejeitos da mina Córrego do Feijão da mineradora Vale S.A localizada em Brumadinho, Minas Gerais, entrou em colapso e rompeu-se, lançando 13 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos no meio ambiente, levando consigo mais de 300 vidas humanas e causando uma série de impactos ambientais, culturais, sociais e econômicos (FREITAS et al., 2019). A remoção destes rejeitos do meio natural é inviável (PEREIRA et al., 2019).

### 3.2 Barragem de rejeito

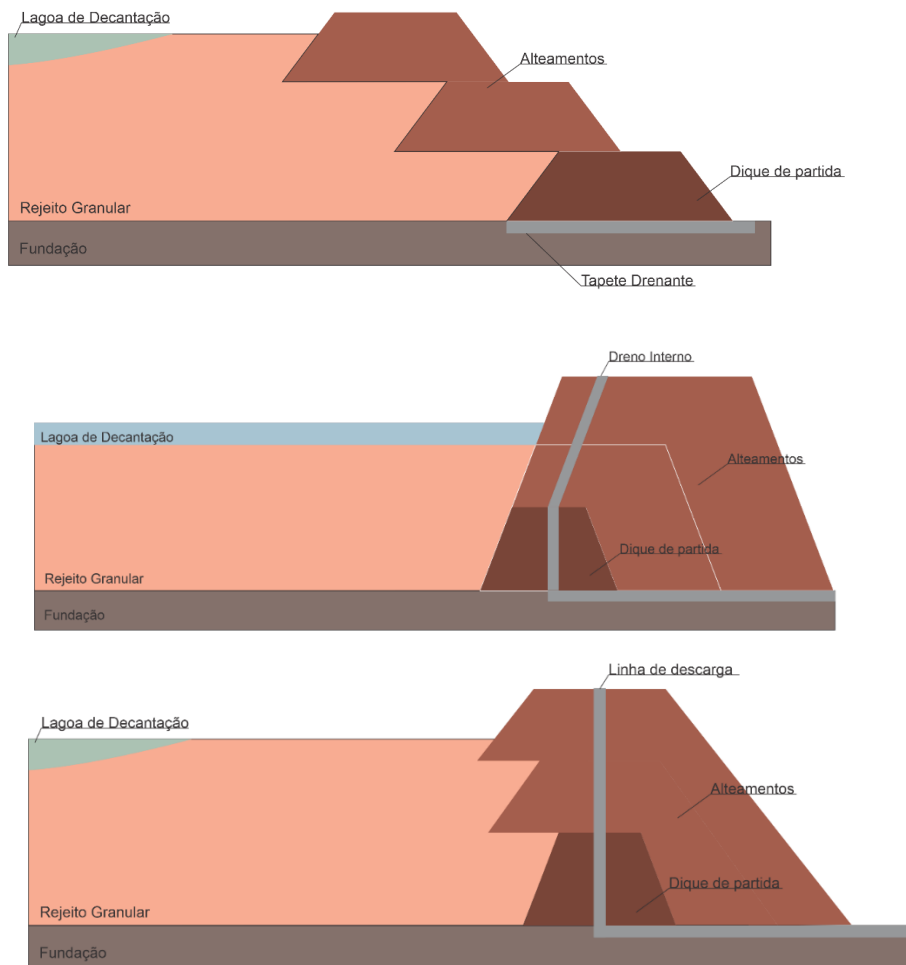
A construção e o cuidado de uma barragem de rejeitos é um fenômeno relativamente novo para a sociedade e para a mineração (CHAMBERS; HIGMAN, 2011). São vários os fatores que diferenciam barragens de rejeito oriundas da mineração e barragens para obra civil em geral, como a vida útil do projeto de barragem e o projeto de construção de barragem.

Um importante contraste se dá em relação a finalidade dos barramentos, já que para contenção de rejeito muitas vezes não enquadra em uma estrutura lucrativa, ao contrário daquelas destinadas para outros fins, como barragem para geração de energia (MARTIM et al., 2002), e por isso, é comum se utilizar de métodos construtivos mais baratos. Vale ressaltar que barragens com a finalidade de conter rejeito devem ser projetadas para serem perpétuas, exigindo projetos bem concretizados e monitorados, considerando especialmente eventos sísmicos e hidrológicos que podem ocorrer e sucumbir a desastres ambientais (CHAMBERS; HIGMAN, 2011).

O método construtivo se dá de forma específica e a barragem de rejeito é feita por etapas, acompanhando o ritmo de lavra, à medida que há extração do minério, novos alteamentos são concretizados. Desta forma, há a diluição de custos no processo de extração mineral (DUARTE, 2008). Outro ponto importante, é o próprio método produtivo, que por muitas vezes, envolve processos de beneficiamento, e portanto, reações químicas. A consequência é que os rejeitos podem ter características diversificadas, desde materiais arenosos não plásticos àqueles solos de granulometria mais fina e elevada plasticidade, e ainda, possuir características geoquímicas nocivas ao meio ambiente e saúde humana (DAVIES et al., 2002).

Dentre os métodos construtivos, um dique de partida é construído inicialmente e a barragem passa por alteamentos sucessivos. Tem-se o método de alteamento à jusante (**Erro! fonte de referência não encontrada.**a) método de alteamento à montante (1b) e barragem de linha de centro (Figura 1c).

Figura 1- Método de alteamento à jusante (a) Método de alteamento à montante (b). Método de alteamento por linha de centro (c).



Fonte: Adaptado de Zingano et al. (2016).

O método de montante é o mais antigo, simples e econômico para a construção de barragens. A etapa inicial na execução deste tipo de barragem consiste na construção de um dique de partida, normalmente de material argiloso ou enrocamento compactado. Após realizada esta etapa, o rejeito é lançado por canhões em direção a montante da linha de simetria do dique, formando assim a praia de deposição, que se tornará a fundação e eventualmente fornecerá material de construção para o próximo alteamento, apesar de prático, é difícil estabelecer um sistema de drenagem (DUARTE, 2008).

Graças ao mecanismo construtivo, ou seja, os alteamentos são feitos sobre camadas previamente depositadas e não consolidadas, dependendo da estabilidade do próprio rejeito, o método de construção a montante é o menos seguro (DAVIES, 2002). Neste sentido, o método de alteamento à jusante e método de linha de centro são mais seguros, particularmente quando sujeitos à terremotos.

Quanto ao método de jusante, os alteamentos do barramento são construídos sucessivamente à jusante do dique inicial, que por sua vez é frequentemente estabelecido de solo ou enrocamento compactado (CARDOSO; PIMENTA; ZINGANO, 2016). De acordo com Passos (2009), as vantagens envolvidas no processo de alteamento para jusante consistem na resistência à carregamentos dinâmicos, pois a construção é escalonada sem interferir na segurança, já que nenhuma parte do alteamento é construído sobre o rejeito previamente depositado. Assim, o barramento apresenta baixa suscetibilidade de liquefação, simplicidade na operação e sistema de drenagem bem estabelecido, podendo ser instalado durante a construção da barragem (DUARTE, 2008). Entretanto, barragens alteadas pelo método de jusante necessitam de maiores volumes de material para construção, apresentando maiores custos associados ao processo de ciclonagem ou ao empréstimo de material. Além disto, com este método, a área ocupada pelo sistema de contenção de rejeitos é muito maior, devido ao progresso da estrutura para jusante em função do acréscimo da altura (ARAÚJO, 2006).

O método de construção central tornou-se uma alternativa atraente para os projetistas de barragens na indústria de mineração, uma vez que permite a otimização do armazenamento disponível, minimizando o volume de material da barragem. Em áreas sismicamente ativas do mundo, o projeto da barragem é frequentemente regido pelo carregamento de terremotos (PRETELL; DISMUKE, 2018). Para Duarte (2008), o método de construção central apresenta uma solução intermediária entre os dois citados anteriormente, contendo vantagens dos dois métodos anteriores, tentando minimizar suas desvantagens.

Segundo Assis e Espósito (1995), o comportamento geotécnico do método de linha de centro assemelha-se mais ao de barragens alteadas para jusante, constituindo uma variação deste método, onde o alteamento da crista é realizado de forma vertical, sendo o eixo vertical dos alteamentos coincidente com o eixo do dique de partida. Neste método, torna-se possível a utilização de zonas de drenagem internas em todas as fases de alteamento, o que possibilita o controle da linha de saturação e promove uma dissipação de poropressões, tornando o método apropriado para utilização inclusive em áreas de alta sismicidade. O Quadro 1 apresenta um resumo comparativo entre os principais métodos construtivos de barragens de rejeito:

Quadro 1- Resumo comparativo entre os métodos construtivos de barragem de rejeito.

	<b>MONTANTE</b>	<b>JUSANTE</b>	<b>LINHA DE CENTRO</b>
<b>TIPO DE REJEITO</b>	Baixa densidade para que ocorra segregação	Qualquer tipo	Areias de lamas de baixa plasticidade
<b>ARMAZENAMENTO DE ÁGUA</b>	Não recomendável para grandes volumes	Bom	Aceitável
<b>RESISTÊNCIA A ABALOS SÍSMICOS</b>	Baixa	Boa	Aceitável
<b>ALTEAMENTOS</b>	Ideal menos de 10m/ano	Nenhuma restrição	Pouca restrição
<b>VANTAGENS</b>	Menor custo, utilizado onde há restrições de área	Maior Segurança	Maior Segurança
<b>DESVANTAGENS</b>	Baixa segurança suscetibilidade a liquefação e piping	Grande quantidade de material requerido proteção do talude a jusante apenas na configuração fina	Necessidade de eficiente sistema de drenagem

Fonte: Adaptado de Cardoso, Pimenta e Zingano (2016).

### 3.3 Formas de rompimento de barragem

A ruptura de uma barragem pode se dar de modo gradual ou quase instantâneo. No caso de rupturas graduais pode não ocorrer a formação de ondas de frente abrupta, sendo a cheia resultante gradual e progressiva, resultado de um lento processo de desenvolvimento da brecha. É uma ruptura típica em barragens de aterro, podendo variar de 15 minutos até cerca de 12 horas, tendo atingido, em alguns casos, 48 horas sem ter destruído a totalidade do corpo da barragem. Quanto à ruptura quase instantânea, forma-se uma onda de frente abrupta (*shock wave*) com propagação para jusante, com velocidades e alturas de água muito superiores ao escoamento de base da linha de água (FRANCA, 2002).

De modo geral, barragens de aterro estão suscetíveis às seguintes formas de ruptura: erosão interna (*piping*), galgamento e deslizamento (ATALLAH, 2002). Segundo Serafim (1981), as principais causas de ruptura de barragens são o galgamento, em geral devido à ocorrência de cheias excepcionais ou a falha dos mecanismos de abertura de comportas.

#### 3.3.1 Erosão interna (piping)

O piping ocorre quando a água se infiltra no solo compactado ou pela fundação, ocasionando em forças erosivas que carregam partículas do solo através da percolação da água, desenvolvendo um canal (canículos) no interior da barragem. Os canículos, por sua vez,

aumentam suas dimensões a medida em que há percolação, gerando a retroerosão tubular e por fim, ruptura do barramento (JÓNATAS, 2013).

Para Foster (2000) barragens com baixo controle de infiltração e poropressão no aterro e fundação, geralmente têm experimentado mais problemas associados à erosão interna comparado com outros tipos de barragens.

De acordo com Singh (1996), o tempo de falha, ou seja, formação da brecha, é igual ou inferior a 3 horas, sendo que a probabilidade do tempo de falha ser inferior à 90 minutos é equivalente à 50%.

### 3.3.2 Galgamento

O galgamento do coroamento de uma barragem de aterro provoca a formação de uma brecha resultante da ação erosiva do escoamento sobre o corpo da barragem, sem localização previamente previsível, mas que em geral tem o seu início em pontos fracos do coroamento da barragem (FRANCA, 2002). Este fenômeno se dá quando o nível d'água no reservatório se eleva acima da cota da crista da barragem (normalmente devido a chuvas intensas), produzindo arraste de materiais com posterior ruptura. Em casos de barragem de terra e em barragens de concreto produz uma sobrecarga que pode submetê-las a ruptura (BRASIL, 2012).

### 3.3.3 Deslizamento

Este tipo ruptura é frequentemente relacionado com falhas no sistema de drenagem, que não consegue reduzir a subpressão e aumento do peso da barragem, a elevação rápida do nível de água no reservatório gera um desequilíbrio de forças e, conseqüente, transporte de áreas da barragem para regiões à jusante, podendo deslizar tanto no corpo da barragem como na fundação (SANTOS, 2019).

## 3.4 Modelagem hidrológica utilizando o HEC-HMS

O Sistema de Modelagem Hidrológica (HEC-HMS) é um *software* livre desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA do Centro de Engenharia Hidrológica (HEC), é uma ferramenta integrada para modelagem de processos hidrológicos de sistemas de bacias hidrográficas. Este modelo contém vários componentes para o processamento do balanço hídrico, considerando perdas de chuva por infiltração, evapotranspiração, interceptação,

armazenamento e também, o escoamento em resposta às características da bacia, como forma, cobertura da terra. É possível processar os dados por uma gama de métodos, como Puls e Muskingum Modificado, Racional e SCS (USACE, 2022).

O modelo HEC-HMS tem sido amplamente utilizado, por exemplo, em muitos estudos hidrológicos devido à sua simplicidade e capacidade de ser usado em comum métodos (HAMDAN; ALMUKTAR; SCHOLZ, 2021). Além disso, tem a capacidade de simular as inundações e o escoamento natural da bacia hidrográfica, bem como fenômenos meteorológicos como evapotranspiração, derretimento da neve e precipitação (KAZEZYILMAZ-ALHAN et al., 2021).

O software conta com uma extensão geoespacial (HEC-GeoHMS) para uso integrado ao sistema de informação geográfica (SIG), ArcGIS (ArcMap) e Análise Espacial capaz de desenvolver diversos elementos de modelagem hidrológica, como delimitação da bacia e trechos de drenagem a partir de um modelo digital de elevação (USACE, 2022). A interface do HEC-HMS permite definir bacias, sub-bacias, trechos, reservatórios e com as junções é possível conectar cada componente e modelar esta rede de dados hidrológicos.

O modelo auxilia a entender diferentes comportamentos no mesmo sistema a partir de diferentes perspectivas provenientes da alteração de alguns parâmetros. Esta previsão de mudanças possibilita planejamento e otimização de resultados, como exemplo, a modelagem de uma bacia que terá extensa área pavimentada permite prever o aumento da vazão no talvegue, possíveis enchentes e com isso, pode-se planejar alternativas para mitigar danos no entorno do trecho hídrico a partir do uso de dissipadores de energia ou outros mecanismos.

### **3.5 Modelagem hidráulica utilizando o HEC-RAS**

Existem diferentes tipos de softwares que empregam modelos hidrodinâmicos e estão disponíveis para análise de rompimento de barragens e manchas de inundação, no qual cada um apresenta suas vantagens e desvantagens sobre casos específicos e disponibilidade de dados (GILDEH et al., 2020). Neste âmbito, o HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Centers River Analysis Systems*), software livre disponibilizado pela *US Army Corps of Engineers* – que também permite a modelagem para fluídos newtonianos em regime permanente e não permanente, unidimensionais, transporte de sedimentos, modelagem de cabeceiras, análise de temperatura e qualidade da água – tem se demonstrado uma importante ferramenta de estudos sobre este tema.

Na análise de rompimento de barragens, o HEC-RAS permite o roteamento de fluxo bidimensional instável usando todas as equações de Saint-Venant e é frequentemente usado para calcular e exibir efeitos a jusante resultantes de falhas hipotéticas de barragens (DYHOUSE et al., 2007). Assim, com os dados os parâmetros de entrada, como a geometria da ruptura final e o tempo para a ruptura, o HEC-RAS é capaz de gerar o hidrograma da ruptura da barragem e, em seguida, simular a onda de inundação resultante e as consequências a jusante (GILDEH et al., 2020). Além do mais, o HEC-RAS pode ser utilizado em associação de ferramentas de sistemas de informação geográficas (SIG), o que permite uma melhor análise geoespacial da macha de inundação simulada (HUTANU et al., 2020).

Derdous et al. (2015) e Psomiadis et al. (2021), por exemplo, simularam o rompimento da barragem de Zardezas (Argélia) e da barragem de Bramianos (Grécia), respectivamente, através do uso de modelo digital de elevação (MDE), obtidos por meio de imagens satélites, em consonância com a simulação realizada com uso do HEC-RAS. Se tratando de barragens de rejeitos, Raman e Liu (2019) aplicaram esta mesma metodologia sobre o rompimento da barragem de rejeito do Feijão, em Brumadinho-MG, e obtiveram resultados de mancha de inundação muito próximos ao observados na tragédia. Já Lee e Liu (2020) analisaram o rompimento da barragem de rejeito de ferro de Minnesota, Estados Unidos, e, também por meio de SIG, contataram que o rompimento da barragem impõe uma séria ameaça ao sistema de água estadunidense em função do envelhecimento das estruturas e da falta de manutenção adequada.

Existem diferentes softwares disponíveis para estudos e trabalhos em SIG em associação com HEC-RAS, como QGIS, ArcMap, RasMapper. Neste caso, o software ArcMap e HEC-HMS é uma das alternativas capazes de complementar os estudos com HEC-RAS, já que permitem a obtenção de dados de entrada para caracterização do barramento e o levantando características hidromorfológicas da área de estudo (AKSOY et al., 2016). No entanto, no que se refere a modelagem, Tschiedel e Paiva (2018) concluíram que entrada de dados na simulação impactam de forma variada na onda de cheia gerada, mas que a topografia nem sempre é o dado de entrada de maior importância.

O mais recente lançamento do HEC-RAS, a versão 6.1, permite a simulação para fluídos não newtonianos, isto é, hiperconcentrados e viscosos. O'Brien e Julien (1985) define o fluxo como newtoniano para o caso de líquidos sem resíduos ou baixas concentrações de sólidos em suspensão, em até cerca de 20% de teor de sólidos em volume. Simulações para fluído não newtoniano através do HEC-RAS foram validadas e verificadas em laboratório e em escalas meso (GIBSON; SANCHEZ, 2022). Gibson et al. (2022), realizaram um estudo de caso para as tragédias ocorridas em Santa Barbara (Califórnia) e Brumadinho (Minas Gerais). Quando



ocorrem falhas na barragem de rejeitos, esta pasta tende muitas vezes a liquefazer e fluir por uma longa distância (ou às vezes viajar ao longo dos rios), o que pode acarretar perda de vidas e danos ambientais (RAMAN et al., 2019).

### **3.6 Segurança de barragem**

No Brasil, a Lei nº. 12.334 DE 2010 (BRASIL, 2010) estabelece que a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) deve garantir padrões de segurança quanto a acidentes e seus impactos, adotar meios de prevenção em todas as fases (planejamento, projeto, construção, operação e desativação), monitorar as medidas de segurança adotadas pelos responsáveis das barragens, além de universalizar a fiscalização das barragens brasileiras pelo poder público e gerenciar os riscos.

Para regulamentar as ações de segurança a serem adotadas e compilar informações que auxiliem no gerenciamento da segurança de barragens pelos governos, a PNSB atribui ao órgão fiscalizador a responsabilidade de exigir do empreendedor o cumprimento das recomendações de segurança, de reportar à ANA qualquer não conformidade que implique em risco imediato à segurança e, ainda, de implantar e manter o cadastro atualizado da situação das barragens localizadas sob sua jurisdição. Os agentes fiscalizadores devem classificar as barragens por risco, volume e dano potencial associado. Esta última está relacionada em função do potencial de mortes e impactos em geral decorrentes do rompimento da barragem (BRASIL, 2010).

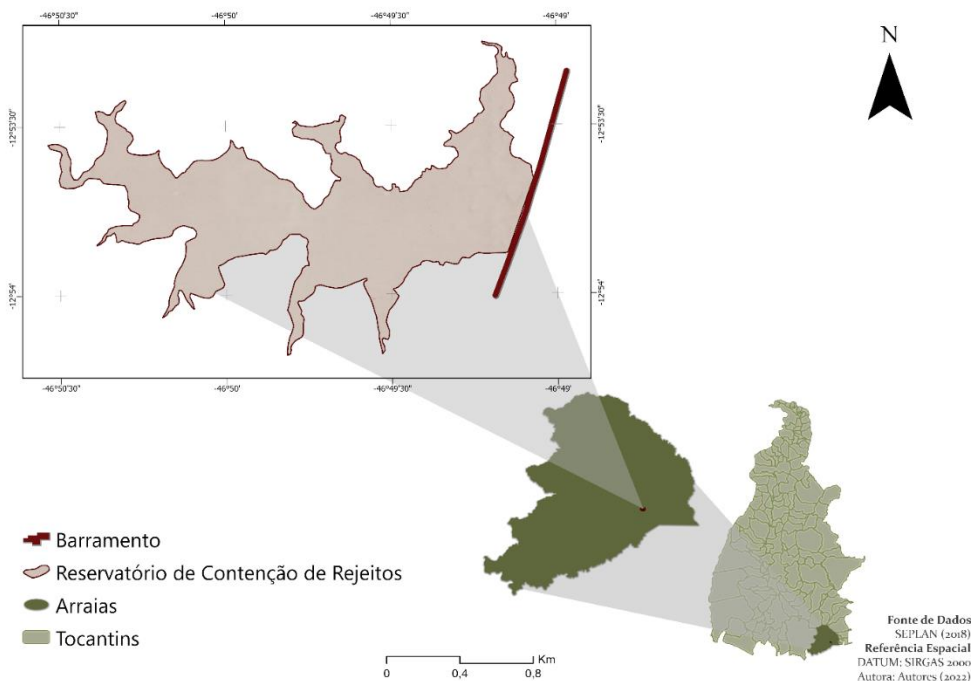
Por sua vez, ao empreendedor atribui-se a responsabilidade de manutenção das condições de segurança, a elaboração e atualização do Plano de Segurança de Barragem (PSB) e, para barragens de alto risco, o Plano de Ação Emergencial. Neste plano, devem ser apresentados mapas de inundação do alcance de ondas de cheia, bem como sua altura e velocidade de propagação em cada trecho, e tempo e chegada (ANA, 2016), além de sistemas de alerta como forma de soluções de evacuação da população se necessário (BRASIL, 2010). No geral, estabelece-se as ações a serem executadas em caso de acidentes ou incidentes que aumentem o risco associado, contemplando os mecanismos de alerta às comunidades potencialmente afetadas do vale de jusante (ANA, 2016). A Resolução ANM N°95/2022 define as medidas regulatórias aplicáveis para as barragens de mineração. Entre várias definições, apresenta em seu inciso LI, a Zona de Autossalvamento (ZAS). Este corresponde ao trecho do vale à jusante da barragem em que se considera que os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor. É delimitado pela distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a 30 (trinta) minutos ou 10 km (dez quilômetros).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Barragem de rejeitos da Indústria Itafós

A barragem de rejeitos da indústria Itafós, fica completamente instalada no município de Arraias-TO, entre as coordenadas de longitude Oeste 46 50' 00" e 46 48' 00" e latitudes Sul 12 55' 00" e 12 52' 00". Ela tem como finalidade a disposição controlada de rejeitos gerados na concentração do minério fosfático. A Figura 2 apresenta a localização do barramento.

Figura 2 - Localização da Barragem.



Fonte: Autores (2021).

De acordo com a ANM (2022), a barragem está ativa desde 2013 e tem uma vida útil prevista de trinta anos. Ela foi construída no vale do córrego Bezerra com uma altura inicial de 20 m podendo atingir uma altura máxima de 30 m. A altura atual barragem é de 22 m, com o reservatório tendo uma área de 710.000 m<sup>2</sup> e volume de 4.136.059,54 m<sup>3</sup> e o projetado de 7.500.000 m<sup>3</sup>. O tipo de barragem é de terra homogênea, com fundação em solo residual/aluvião, e método construtivo de alteamento à jusante, sendo contínuo o tipo de alteamento. Em termos de estado de conservação, ainda conforme BRASIL (2022), as estruturas civis são bem mantidas e em operação normal, com percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem, não havendo deformações e recalques com potencial de

comprometimento da segurança da estrutura. Há falhas na proteção dos taludes e paramentos, e presença de vegetação arbustiva.

O tipo de rejeito armazenado no reservatório é decorrente do beneficiamento do minério fosfático, matéria-prima para a produção de superfosfato simples (SSP), usado como insumo na atividade agropecuária.

A barragem possui plano de ação emergencial, porém segundo ANM (2022), ainda não foram entregues cópias do PAEBM para as prefeituras e defesas civis e estaduais, conforme exigido pela Portaria nº. 70.389/2017. Em termos de avaliação de impactos ambientais, o empreendimento apresenta impacto significativo, de média intensidade, e afeta a jusante, em caso de rompimento da barragem, um número abaixo de 100 pessoas (ANM, 2022). De acordo com o EIA (2013) o barramento foi construído em aterro compactado com sistema de drenagem interna de areia, apresenta taludes de montante e de jusante, com inclinação de 2:1 (horizontal: vertical), proteção por rip-rap de um metro de espessura no talude de montante. Quanto ao reservatório, na configuração final, apresentava 50,8 milhões de metros cúbicos e uma área de cerca de 625 hectares. Há também sistemas extravasores de soleira livre, sendo estes dimensionados com os mesmos parâmetros hidrológicos e físicos do barramento. Na primeira fase a soleira do vertedouro estava na cota de elevação 646 m e a crista da barragem na cota 650 m. Já para a configuração final da barragem de rejeitos, a soleira do vertedouro deverá se situar na cota 657 m, com crista da barragem na cota 660 m. As duas etapas da construção da barragem de rejeitos contaram com os seguintes dispositivos de drenagem superficial: trechos de canaletas meia-cana com trechos de descidas d'água em degraus, trechos de descidas d'água periféricas dimensionada de acordo com os mesmos parâmetros do sistema de drenagem superficial da barragem de captação de água.

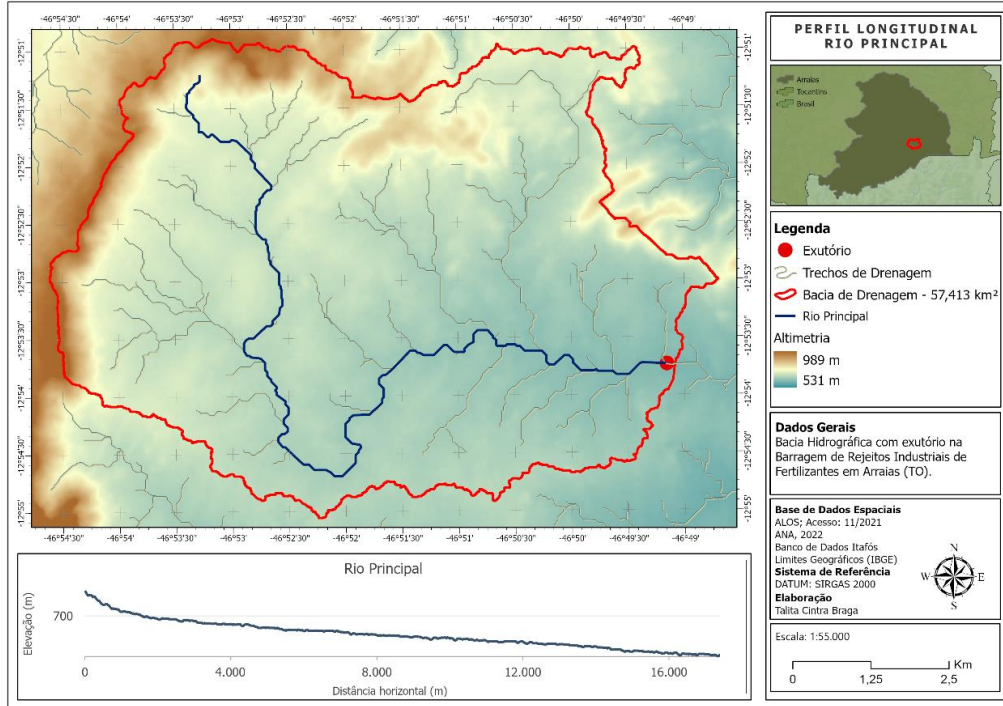
#### **4.2 Delimitação da bacia hidrográfica a montante**

Para iniciar estudo hidrológico e obter vazão para tempo de retorno de 10000 anos, será considerado a contribuição da bacia hidrográfica tendo o exutório a crista da barragem.

Inicialmente, foi feito download do modelo digital de elevação do ALOS PALSAR 12,5 m de toda bacia a montante para dados iniciais de entrada. As imagens de satélite foram adquiridas por meio do *Alaska Satellite Facility* e será utilizado a ferramenta HEC-HMS, que gera microbacias de todos os cursos, permitindo análise de contribuição delas. Por fim, será gerado um mapa de altimetria, com os cursos hídricos definidos a partir de sua ordem hierárquica, apresentando as regiões hidrográficas e microbacias a montante da Barragem de

Rejeitos. A Figura 3 apresenta o perfil longitudinal do Córrego Bezerra e a altimetria da bacia de drenagem e região ao entorno.

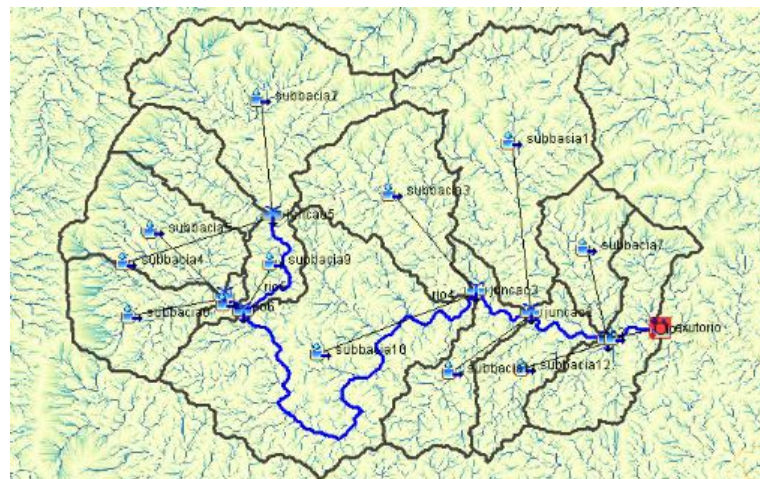
Figura 3 - Mapa de declividade para bacia de drenagem considerando a barragem como exutório.



Fonte: Autores (2021)

A Figura 4 apresenta a delimitação da bacia, sub-bacias, trechos de drenagem e talvegue a partir do HEC-HMS. A área, o perímetro e os comprimentos da bacia e do rio principal são elementos fundamentais para a caracterização de uma bacia hidrográfica (BH), todos estes dados são obtidos como resultado do HEC HMS.

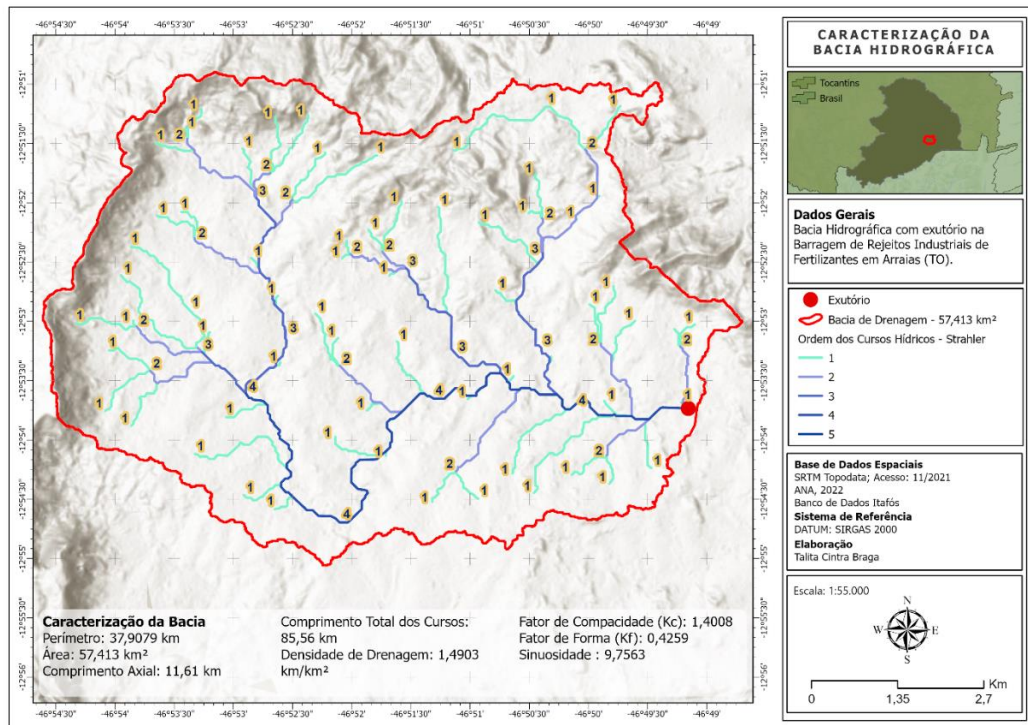
Figura 4 - Delimitação da bacia de drenagem a partir do HEC-HMS



Fonte: Autores (2022).

Para obtenção do desnível e das declividades do rio principal foram, inicialmente, exportados os resultados para o software ArcMap. Determinou-se para cada trecho com base na classificação da ordem de drenagem de Strahler, o comprimento e declividade. A Figura 5 detalha dados obtidos com auxílio do ArcMap.

Figura 5 - Caracterização da bacia de drenagem com auxílio do ArcMap.



Fonte: Autores (2022).

O uso do ArcMap permitiu verificar que a área da bacia é de 57,413 km<sup>2</sup>, o perímetro apresenta 37,9079 km, o comprimento axial é de 11,61 km, comprimento total de trechos de drenagem de 85,5628 km e a declividade é de 11%. Com estes dados é possível verificar os valores da densidade de drenagem, índice de Gravelius, fator de forma e sinuosidade da bacia. A Tabela 1 sintetiza os dados de caracterização da bacia hidrográfica:

Tabela 1 - Caracterização da Bacia Hidrográfica.

Parâmetro	Definição	Equação	Índice	Valor
Densidade Drenagem (km/km <sup>2</sup> )	Relação entre comprimento total de cursos de água e a área de drenagem	$D_d = \frac{\sum l}{A}$	Sendo l o comprimento total (km) e A a área (km <sup>2</sup> )	1,490303
Fator de Compacidade (kc)	Relação entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de área igual à da bacia	$K_c = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}}$	Sendo P o perímetro (km) e A a área da bacia (km <sup>2</sup> )	1,40082
Fator de Forma (Kf)	Razão entre a largura média da bacia e o comprimento total da mesma	$K_f = \frac{A}{L^2}$	Sendo A a área da bacia (km <sup>2</sup> ) e L o comprimento da bacia (km)	0,4259374
Sc	Relação entre o comprimento do rio principal e o comprimento do seu talvegue	$S_c = \frac{L}{L'}$	Sendo L o comprimento do rio principal (km) e L' o comprimento do talvegue (km)	9,7563099

Fonte: Autores (2022).

### 4.3 Uso e tipo de solo no entorno da barragem

Foram concedidos dados ambientais da área pela Indústria Itafós e pelo estudo de EIA/RIMA protocolado no Instituto Natureza do Tocantins – Naturatins (AMBIENGER-PROMINER, 2010), a fim de obter o licenciamento ambiental do barramento. A classificação dos solos é uma informação necessária para correto balanço hídrico visto que o diferentes tipos e coberturas do solo apresentam permeabilidade distintas. Além disto, o avanço da onda de cheia decorrente do rompimento da barragem diverge para cada tipo de solo e cobertura, pois ele se relaciona com o coeficiente de Manning.

### 4.4 Balanço hídrico na área de estudo

A primeira etapa consistiu em determinar a distribuição temporal da chuva. Optou-se pelo método de Huff (1967). Os dados de entrada foram obtidos pelo HEC HMS e ArcMap, sendo eles expostos na Tabela 2:

Tabela 2 - Dados de entrada para metodologia de distribuição de chuva de Huff.

Parâmetro	Valor
Talvegue (m <sup>2</sup> )	17.403,00
Cota da Crista (m)	754,00
Cota da Base (m)	613,25
$\Delta h$ (m)	140,75
Tempo de Retorno (anos)	10.000
Duração da chuva (h)	4,0

Fonte: Autores (2022).

Para o cálculo do tempo de concentração ( $T_c$ ) da bacia optou-se pela fórmula de KIIRPICH, por se adaptar a bacias rurais independentemente do tamanho, conforme Eq. 01:

$$T_c = 0,95 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (\text{Eq. 01})$$

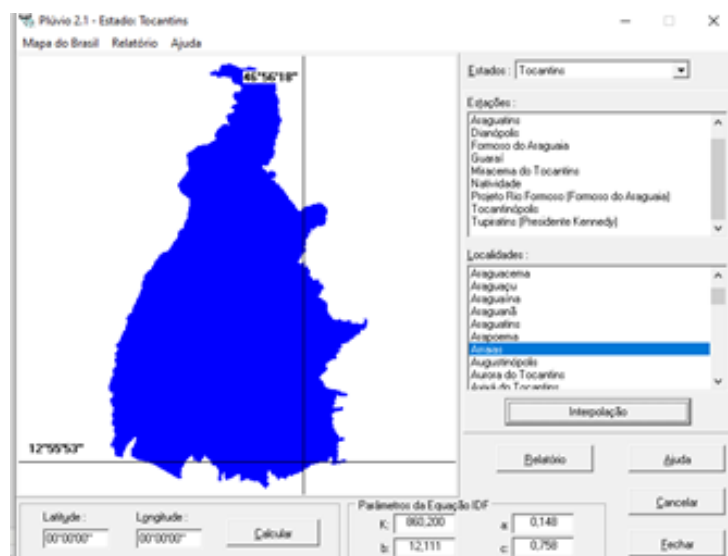
sendo  $T_c$  o tempo médio de concentração (em horas),  $L$  o comprimento do curso d'água (em km) e  $H$  o desnível máximo (em m). Com os dados de entrada, obteve-se o tempo de concentração de 229,96 min.

A intensidade de chuva foi calculada pela equação IDF (Equação 02), considerando o tempo de concentração de 229,96 min e o tempo de retorno de 10.000 anos, segundo DAEE (2004).

$$i = \frac{kT^a}{(t+b)^c} = 52,4289 \text{ mm/H} \quad (\text{Eq. 02})$$

Os índices  $k, a, b, c$  foram adquiridos pelo software Plúvio 2.1 (UFV, 2006) para o município de Arraias, conforme Figura 6.

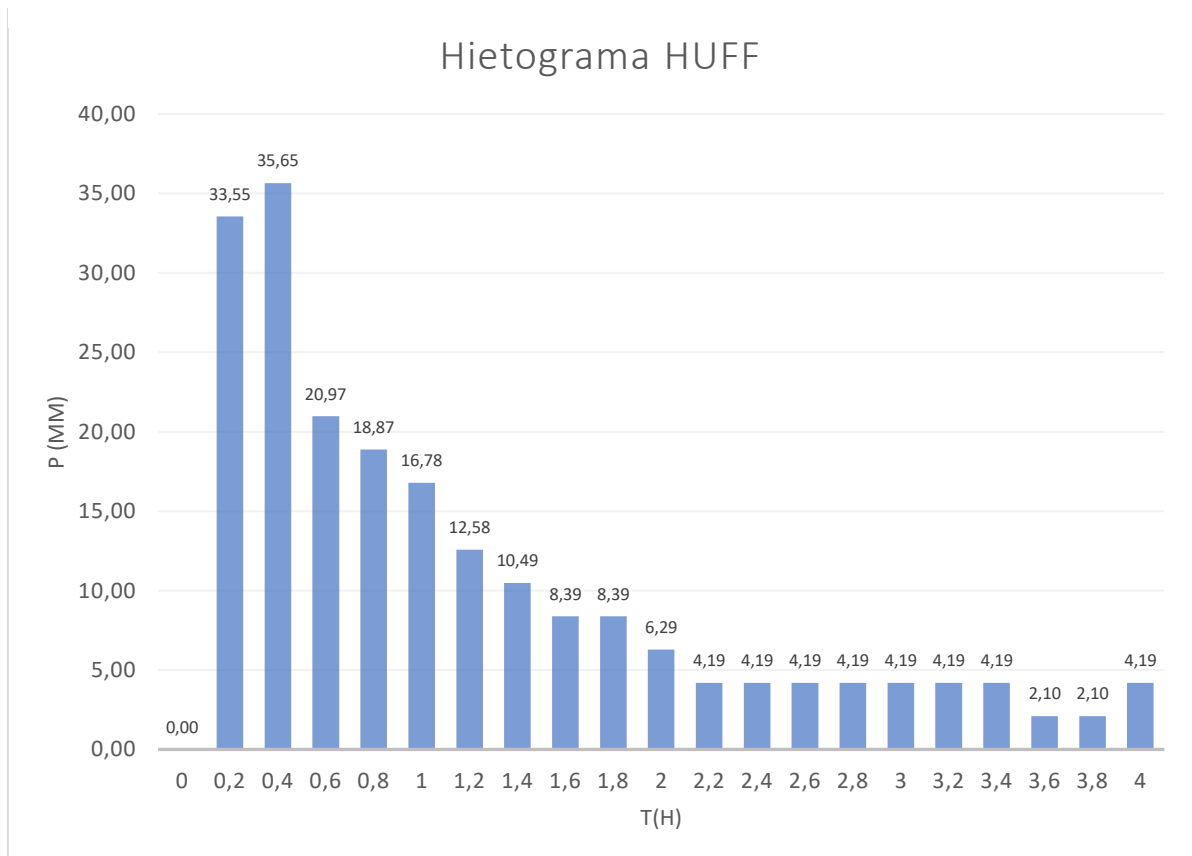
Figura 6 - Parâmetros da Equação IDF para o município de Arraias. (Dados obtidos em Plúvio, 2022).



Fonte: Autores (2022).

Portanto, considerando a duração da chuva e intensidade, a precipitação total é de 209,716 mm. A distribuição da chuva é representada conforme hietograma de Huff, expresso na Figura 7.

Figura 7 -Hietograma de Huff para bacia de contribuição do estudo.



Fonte: Autores (2022).

#### 4.5 Obtenção do hidrograma de entrada do reservatório

Foi utilizado o software gratuito HEC-HMS, o qual se faz a representação esquemática dos rios de maior ordem até chegar ao reservatório à montante da barragem, e todas as microbacias. Para rodar o modelo, o software requisitou as seguintes informações de entrada:

Hietograma de Precipitação

Área da bacia hidrográfica

Determinação do CN (*curve number*)

Precipitação Total - P (mm)

Infiltração inicial - Ia (mm)

Infiltração potencial máxima – S (mm)

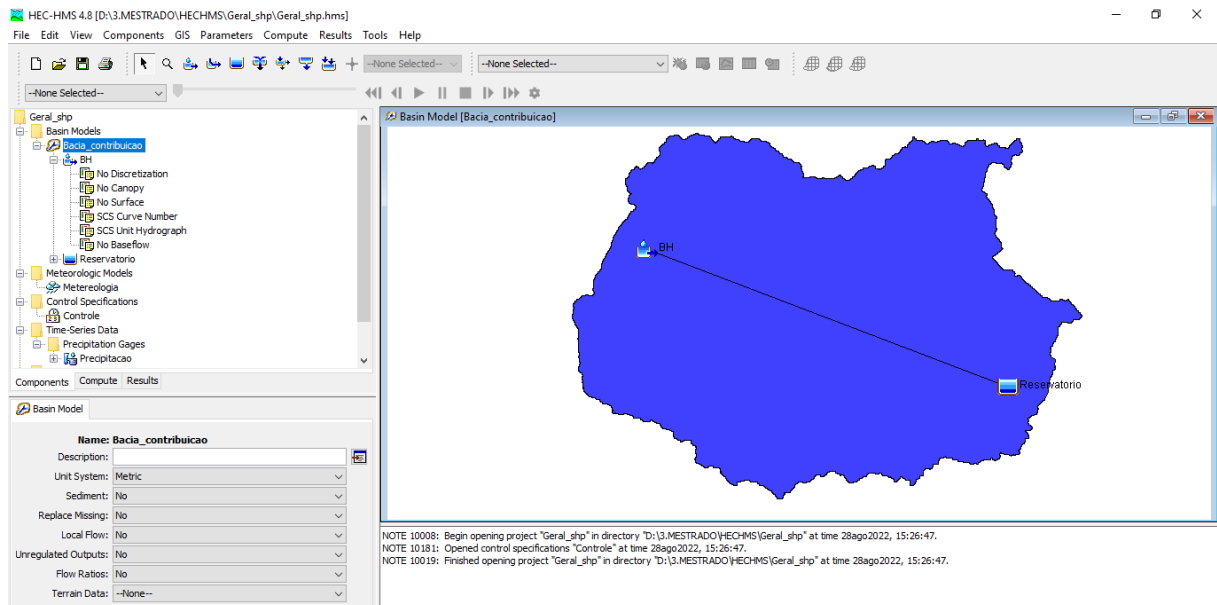


### Tempo de resposta da bacia (min)

Foi feita a simulação para obtenção do hidrograma de entrada para chuva de duas horas (chuvas convectivas com maior pico de vazão) e o resultado pôde ser expressado em forma de gráfico de dispersão.

A partir dos dados de precipitação é possível determinar o que será infiltrado e o que escoará para o exutório utilizando-se o método SCS. A modelação hidrológica realizada no HEC-HMS não constatou a possibilidade de galgamento no barramento em estudo, portanto a falha foi determinada por *piping*. A Figura 8 apresenta o preparo do ambiente do HEC-HMS.

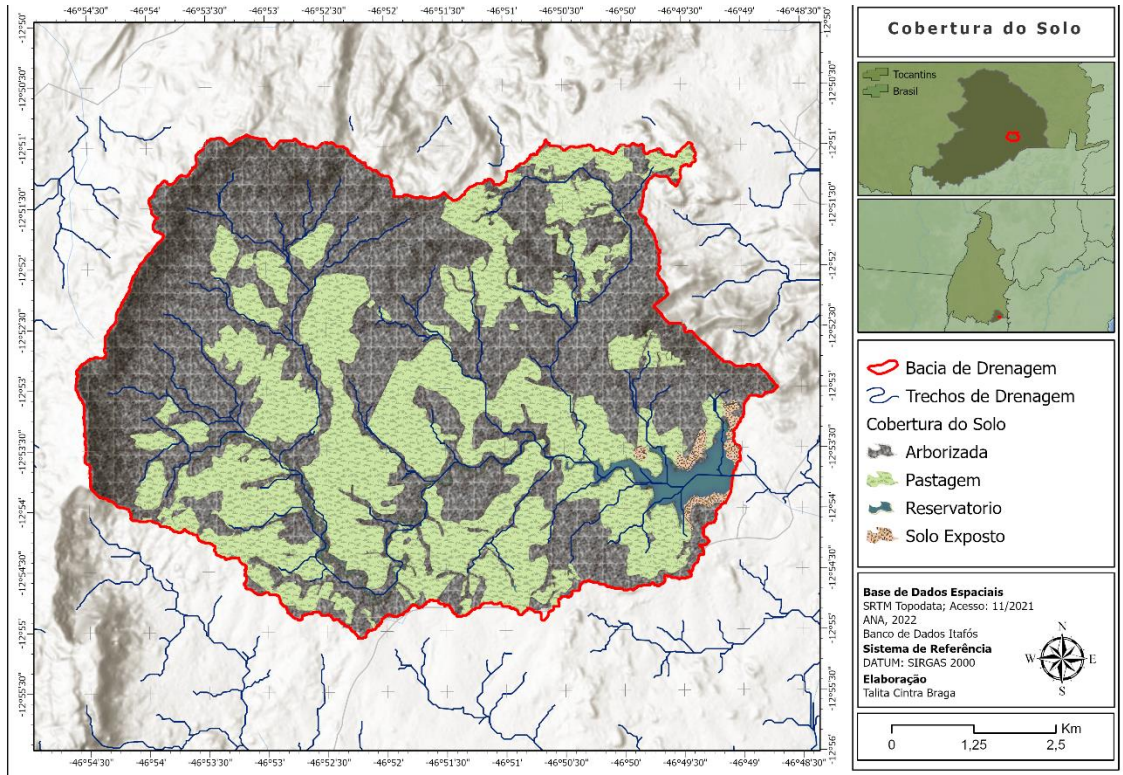
Figura 8 – Configuração do ambiente no HEC HMS.



Fonte: Autores (2022).

Para a determinação da constante CN (*curve number*), utilizou-se dos dados disponibilizados pela Itafós Mineração. Desta maneira, foi possível caracterizar o tipo e cobertura da terra. Como a bacia hidrográfica apresenta variação de cobertura, foi calculado a área para cada CN, como expresso na Figura 9.

Figura 9 - Cobertura da terra.



Fonte: Autores (2022).

Definido o grupo hidrológico, é possível determinar o CN para cada tipo de cobertura da terra, e por fim, realizar uma média ponderada, levando em consideração a área de cobertura, até encontrar o CN representativo para a bacia hidrográfica. A figura 11 representa a área para cada tipo de cobertura, e a partir dos dados de *Soil Conservation Service* é possível encontrar os valores de CN para cada área, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Cálculo de CN para bacia hidrográfica analisada

Cobertura da Terra	Área (km <sup>2</sup> )	CN
Arborizada	33,18	60
Pastagem	22,84	58
Solo exposto	0,33	86
<b>CN médio</b>	<b>59,34</b>	

Fonte: Autores (2022).

Além do CN, é preciso informar ao HEC HMS o tempo de resposta da bacia, sendo ele 60% do tempo de concentração (SCS, 1986). Como o tempo de concentração é 229,96 min, o td é 137,97 min.

Quanto a infiltração potencial máxima (S), encontrou-se o valor de 174,03 mm, seguindo a seguinte equação:

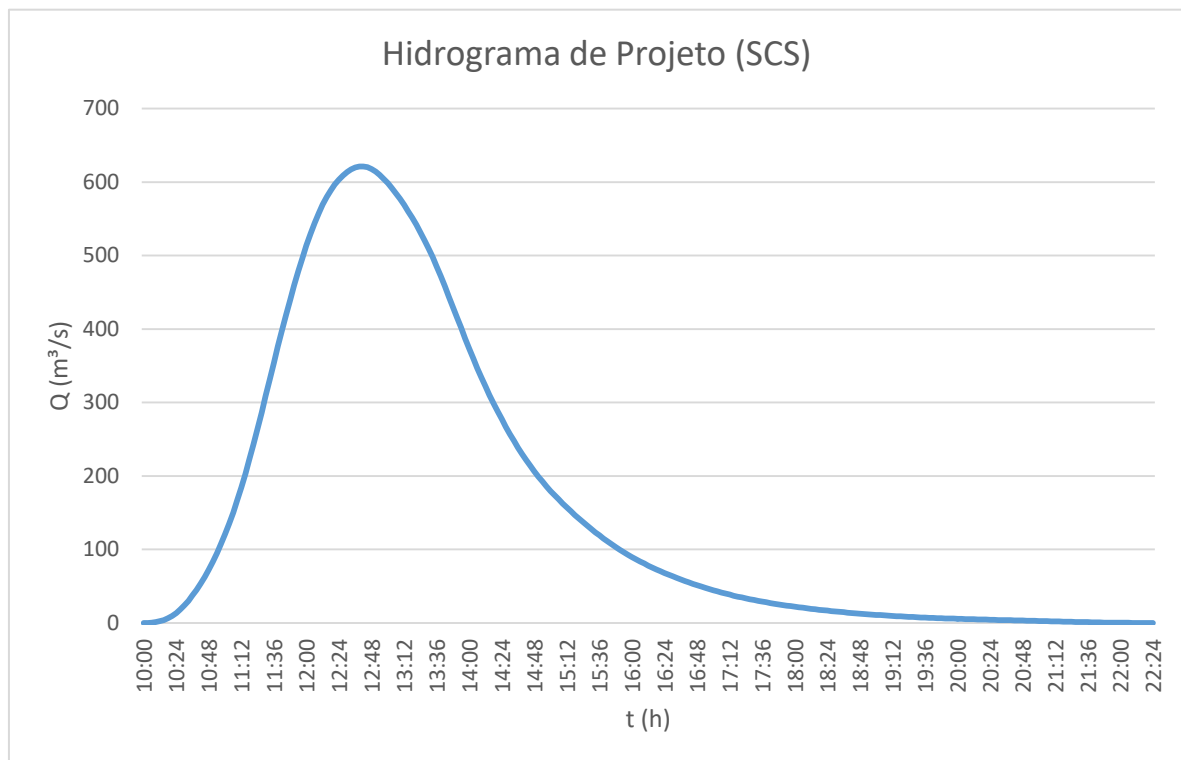
$$S(mm) = 25,4 \times \left( \frac{1.000}{CN} - 10 \right) = 174,03 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 04})$$

A infiltração inicial, também necessária como dado de entrada no HEC HMS é 20% da infiltração máxima (SCS, 1986) , sendo então, 34,806 mm.

Com a simulação do modelo é possível determinar dados de infiltração, precipitação, escoamento e por fim, vazão no exutório.

O hidrograma de projeto obtido está expresso na Figura 10.

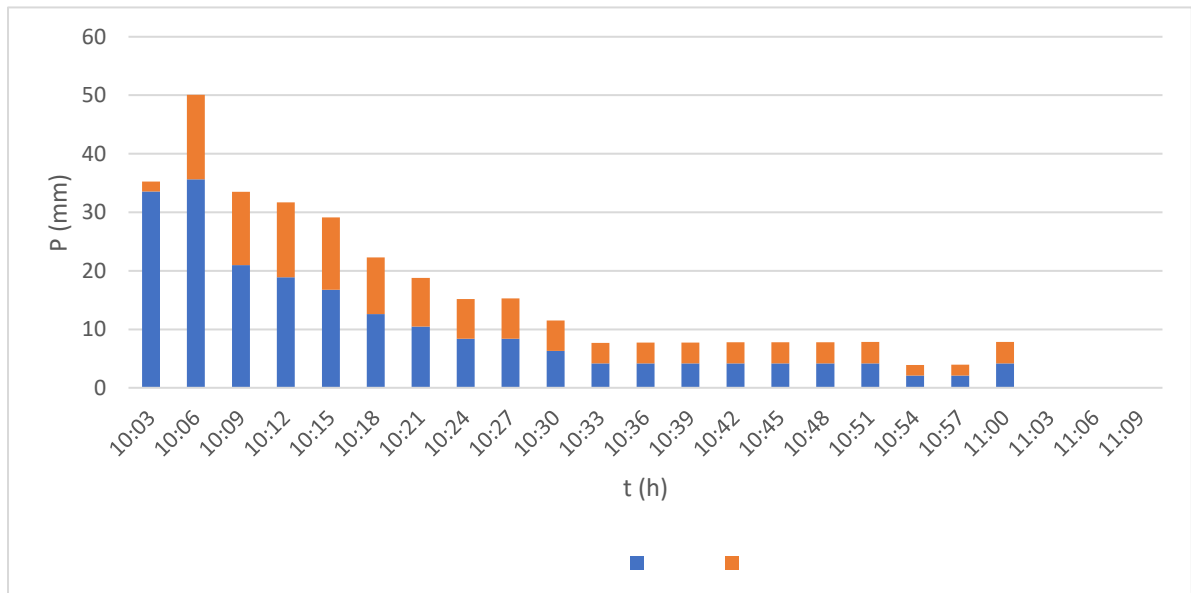
Figura 10 - Hidrograma de projeto obtido a partir de dados do HEC HMS.



Fonte: Autores (2022).

A vazão é expressa na Figura 11:

Figura 11 - Precipitação (mm) e excedente (mm) com dados obtidos do HEC HMS.

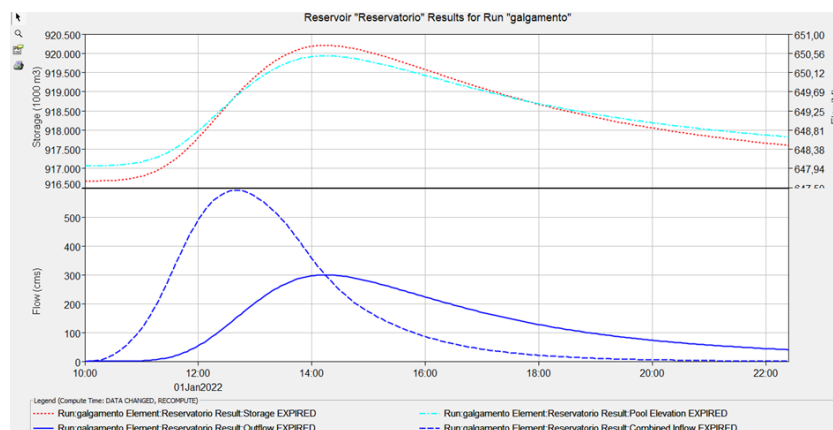


Fonte: Autores (2022).

Também é possível verificar o comportamento das vazões em caso de rompimento por *piping* ou galgamento.

A simulação para galgamento demonstra que o barramento amorteceria a chuva de projeto calculada. A Figura 12 demonstra o amortecimento proporcionado pelo reservatório.

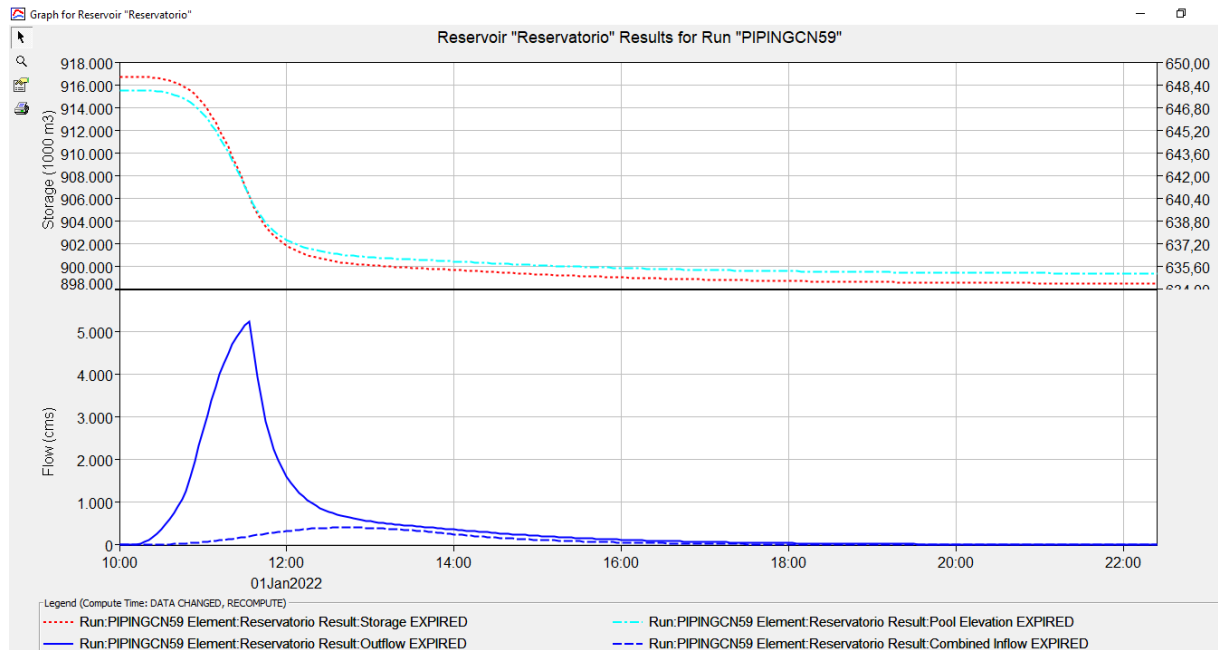
Figura 12 - Amortecimento do reservatório em caso de simulação para galgamento.



Fonte: Autores (2022).

Através da Figura 13 é possível verificar o comportamento da vazão decorrente de *piping*. Nota-se que o volume armazenado do reservatório reduz com o tempo, e que o hidrograma a jusante decai no momento do rompimento da barragem.

Figura 13 - Hidrograma para caso de rompimento por *piping*.



Fonte: Autores (2022).

#### 4.6 Determinação da onda de cheia a jusante da barragem

Nesta etapa do projeto será utilizado o programa computacional HEC-RAS, gratuito e muito utilizado em simulações de barragem. Ele é capaz de realizar cálculos de fluxo de água em canais em regime subcrítico, supercrítico, fluxo constante, instável e até mesmo a análise da qualidade da água.

Serão determinadas áreas a montante e jusante do barramento, o qual representarão a malha computacional, com células de aresta de 12,5 m, a máxima precisão possível visto que os pixels do ALOS PALSAR possuem este tamanho.

A Eq. 05 é a equação da continuidade e as Eq. 06 e 07 as de quantidade de movimento.

$$\frac{\partial H}{\partial T} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0$$

Eq. 05

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \quad \text{Eq. 06}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \quad \text{Eq. 07}$$

Sendo  $t$  o tempo (s)  $x$  e  $y$  as direções cartesianas (m);  $H$  a elevação da superfície da água (m);  $u$  e  $v$  as componentes da velocidade nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $h$  a altura da lâmina de água (m);  $q$  o fluxo de entrada/ saída ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ );  $g$  a aceleração da gravidade ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ),  $f$  o parâmetro de Coriolis ( $\text{s}^{-1}$ ),  $V_t$  o coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ); e  $C_f$  o coeficiente de atrito do fundo ( $\text{s}^{-1}$ ).

Para o caso de fluido não newtoniano a equação de momento (Eq. 08) é adaptada com acréscimo do termo reológico, que demonstra como os materiais se comportam em função da tensão. O HEC-RAS adiciona uma inclinação de perda adimensional ( $S_{MD}$ ) à inclinação de atrito que calcula as perdas de atrito na equação newtoniana. Logo, para fluido não newtoniano, tem-se a Eq. 09:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \cdot \left( \frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad \text{Eq. 08}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \cdot \left( \frac{\partial z}{\partial x} + S_f + S_{MD} \right) = 0 \quad \text{Eq. 09}$$

Onde  $S_f$  representa todas as "inclinações" de perda adimensional em simulações newtonianas, incluindo expansão/contração e vento) e  $S_{MD}$  uma inclinação referente à lama e detritos, conforme Eq. 10.

$$S_{MD} = \frac{\tau}{\gamma R} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde  $\gamma$  é o peso unitário do fluido,  $R$  é o raio hidráulico e  $S_f$  é a inclinação de atrito, e  $\tau$  é a tensão de cisalhamento interna.

A equação de Bingham é frequentemente usada para fluxos hiperconcentrados e fluxos de lama pois sua formulação facilita a calibração, já que este modelo requer apenas duas entradas: o limite de escoamento e a viscosidade do sedimento carregado (USACE, 2022). O software possibilita quatro maneiras de especificar a viscosidade dinâmica: constante especificada pelo usuário, razão especificada pelo usuário ou viscosidade relativa, exponencial ou por Maron e Pierce (1956). Pela disponibilidade de dados técnicos para rejeito de fosfato,

utilizou-se Marin e Pierce, que considera a concentração volumétrica máxima ( $c_{vmax}$ ) para estipular a viscosidade dinâmica relativa ( $\mu_r$ ), conforme Equação 11 :

$$\mu_r = \left(1 - \frac{C_v}{c_{vmax}}\right)^{-2} \quad \text{Eq. 11}$$

Sendo  $\mu_r$ (Pa) a viscosidade dinâmica relativa e  $C_v$  a concentração volumétrica (%).

#### 4.7 Características do rompimento

Para simular o rompimento da barragem por uma formação de brecha, serão necessários estipular parâmetros de largura, altura, inclinação e tempo de formação da brecha. A primeira etapa do processo consiste na elaboração do hidrograma de ruptura. Para isto, utilizou-se da modelagem hidrológica no HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*), que propicia, a partir do uso dos dados de topografia provenientes do ALOS PALSAR e do hietograma de chuva (calculado pelo método de HUFF, 1967), a delimitação da bacia hidrográfica, talvegue, trechos de drenagens, balanço hídrico e por fim, hidrograma de projeto (SCS). O HEC-HMS também permite identificar se haveria galgamento a partir das vazões encontradas. Na área de estudo este tipo de falha não ocorre, visto que os sistemas extravasores da barragem são capazes de verter a vazão advinda da precipitação máxima para tempo de retorno de 10.000 anos.

O cenário de ruptura, portanto, não foi associado há um evento de precipitação, e sim, em uma brecha no corpo da barragem, colapso por *piping*. As condições de contorno do modelo foram: volume do reservatório a montante e profundidade normal com declividade do fundo do canal de aproximadamente 0,4% à jusante, conforme verificado no *software*. Quanto aos dados de topografia, utilizou-se das imagens do ALOS PALSAR 12,5 m, intervalo suficiente para geração de uma malha computacional com células apropriadas. É comum o uso de SRTM 30 m em estudos de rompimento de barragem pelo modelo estático simplificado, desenvolvido pela ANA em conjunto com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal.

Segundo Manandhar (2010) para quantificar a resistência ao fluxo se utiliza o coeficiente de rugosidade,  $n$ , da fórmula de *Manning*. É preciso ter cuidado com estimativas desse coeficiente, pois a rugosidade é o fator que mais se altera com a mudança de vazão (PORTO, 1988). A calibração do coeficiente de rugosidade *Manning* ( $n$ ) ocorreu a partir de dados de uso do solo coletados em campo pela Itafós Arraias Mineração e Fertilizantes S.A. Através do ArcMap 10.5 foi gerado um arquivo em *shapefile* associando o valor  $n$

correspondente ao uso do solo, conforme Chow (1959). Estes dados foram posteriormente utilizados no HEC-RAS 6.1. A Tabela 4 apresenta os dados encontrados na literatura para coeficiente de Manning em áreas rurais.

Tabela 4 - Valores de coeficiente de Manning utilizados (CHOW, 1959)

Cobertura e uso da terra	Coeficiente de Manning
Terra estéril	0,03
Arbustiva	0,05
Pastagens e terras cultivadas	0,035
Rio	0,04

Fonte: Autores (2022).

Na mineração, é comum o uso de barragens de rejeitos. Estes constituem-se de partículas de rocha remanescentes com uma distribuição variando entre o tamanho de grãos de areia média até partículas do tamanho de argila que geralmente são depositadas em forma de lixiviado, contendo produtos químicos. Barreda et al. (2021), utiliza rejeitos de fosfato e manganês obtidos a partir do processamento mineral em plantas brasileiras para avaliar as melhores condições operacionais para produção de pasta em escala laboral.

Considerando o apresentado na revisão, será suposto que o rejeito armazenado na barragem tem um comportamento não newtoniano e será adotado o valor máximo de tensão de escoamento, ou tensão de limite elástico, de 300 Pa para 73% de massa de sólidos, e 50 Pa para 65 % de massa de sólido objetivando calibrar o HEC-RAS a partir da metodologia de Bingham, conforme estudo, visando simular o comportamento do fluido não newtoniano frente à ruptura da barragem.

A brecha de ruptura é um dado essencial para o estudo, parâmetros de local, geometria e tempo de desenvolvimento da brecha são muito importantes para calcular o hidrograma de ruptura, e conseqüente a mancha de inundação. Como foi constatado que não haveria colapso da estrutura a partir de galgamento, a falha foi modelada através do piping.

A geometria final da brecha foi definida a partir do modelo empírico de Froehlich (2008), que está entre os mais difundidos. A Eq. 12 se refere à largura da brecha e a Eq. 13 ao tempo de formação da brecha.

$$B_{méd} = 0,27 \cdot K_0 \cdot V_w^{0,32} \cdot H_b^{0,04}$$

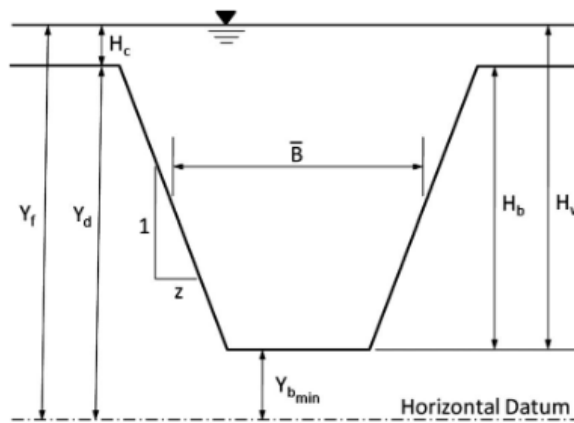
Eq. 12



$$t = 63,2 \cdot \sqrt{\frac{V_w}{g \cdot H_b^2}} \quad \text{Eq. 13}$$

Sendo  $B_{méd}$  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 (1,4 para galgamento e 1 para piping),  $t$  o tempo de formação da brecha (s) e  $g$  a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ). Para Froehlich,  $h_b$  é determinado assumindo-se que a brecha vai do topo da barragem até a elevação natural do terreno. A Figura 14 representa a formação da brecha.

Figura 14 - Representação da brecha, sendo B a largura,  $H_b$  a altura, adotada do nível do solo até a crista do barramento.



Fonte: Froehlich (2008).

De acordo com a ANM (2022) atualmente o barramento apresenta 22 m de altura. Estando o talvegue na cota 610 m, adotou-se a cota da crista de 632m. Considerando que a brecha irá abranger toda estrutura, da elevação natural do terreno (610 m), até a crista, conforme Froehlich, tem-se a largura inferior de 25 m, com inclinação esquerda e direita de 0,7 e tempo de formação de 0,52 horas, ou seja, 31,2 minutos. Os dados foram sintetizados na Tabela x:

Tabela 5 – Dados de formação da brecha na estrutura do barramento.

Cobertura e uso da terra	Coefficiente de Manning
Altura do barramento	22 m
Cota do talvegue	610 m
Cota da Crista	632 m
Altura da brecha	22 m
Largura inferior da brecha	25 m
Inclinação	0,7
Tempo de formação da brecha	31,2 min

Fonte: Autores (2022).

#### **4.8 Obtenção do mapa de inundação**

O mapa de inundação apresenta toda área atingida pela onda de cheia induzida pelo rompimento da barragem de rejeito. Foi determinada a vazão máxima a jusante da barragem e o máximo alcance da onda a partir do software HEC-RAS. Os resultados simulados foram exportados para o ArcMap, que juntamente com imagens de satélite disponíveis, permitiram delimitar toda área atingida pela onda de cheia e possíveis impactos.

## 5 RESULTADOS

### SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS INDUSTRIAIS DE FERTILIZANTES EM ARRAIAS, TOCANTINS

#### RESUMO

Barragens são estruturas versáteis utilizadas para diversas finalidades, inclusive a contenção de rejeitos decorrentes da atividade de mineração. Nos últimos anos o rompimento destas estruturas se tornou um fato recorrente no Brasil, com destaque para os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), que acarretaram impactos ambientais irreversíveis e perda de centenas de vidas. Isso vem mostrando o quanto a aplicação de modelos computacionais para prever cenários ocasionados pelo rompimento de barragem, é muito apropriada para antecipar as consequências do rompimentos de barragens e balizar os planos de ação de emergência de barragens. No estudo realizado para a barragem de rejeitos da Itafós Arraias Mineração e Fertilizantes S.A., no Tocantins, utilizam-se o HEC-RAS (versão 6.1, mais atual) que incorpora a modelagem do rompimento de barragens de fluidos não newtonianos, combinado com o ArcGIS, modelo digital de elevação ALOS PALSAR e outros dados biofísicos da área de influência da barragem. A simulação do comportamento da onda de cheia foi por rompimento do tipo *piping*, com os resultados mostrando uma área de inundação 484,02 ha, profundidade máxima de 19,78 m, velocidade máxima de propagação da onda de 13 m/s e vazão máxima 2.619,25 m<sup>3</sup>/s (Seção 1), e as possíveis interferências/impactos em paisagens naturais, áreas de uso antrópico e obras públicas.

Palavras-chaves:

HEC-RAS, rompimento de barragem, rejeitos de mineração, simulação de onda de cheia

#### 1. Introdução

As rochas fosfáticas são amplamente utilizadas como matérias-primas para produção de fertilizantes, produção de detergentes, suplementos alimentares de animais, etc. Durante o processamento de minérios fosfatos, cerca de 30-40% da massa de minério é descartada como rejeito após operação de beneficiamento (Gnandi et al., 2005). As barragens de rejeitos são estruturas utilizadas por mineradoras como forma de armazenamento dos resíduos extraídos após este beneficiamento (Santos et al., 2020).

Com o aumento de número de barragens dessa natureza no país, cresce também a preocupação quanto à segurança de suas estruturas, que consiste em manter a sua integridade estrutural e operacional, e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente (Brasil, 2010). O tema passou a constar na pauta da política brasileira somente em 2010, embora já fosse objeto de discussão entre os profissionais de engenharia e geotecnia desde os anos 1980 (Franco, 2008).

Como observado para os casos de Mariana e Brumadinho, a ruptura de barragens de rejeito traz consequências drásticas a todos os envolvidos no entorno de uma barragem. Conforme Amaral (2017), independentemente se o rompimento ocorreu devido à má inspeção, falha nos materiais ou métodos construtivos, os transtornos são inevitáveis quando não há um plano de evacuação da população ou medidas mitigadoras. Se a barragem vier a se romper, há

danos irreversíveis às comunidades, cidades e ao meio ambiente. No caso de barragem de rejeito, este dano é intensificado pelos contaminantes presentes no fluído, que podem modificar as características físico-químicas das águas dos mananciais. Simulações de rompimentos de barragens vem sendo realizados no país e em outros países, cabendo destaques para os trabalhos de Derdous et al. (2015), Neves, Rodrigues e Cabral (2019), Raman e Liu (2019), Santos et al. (2020), Lee e Liu (2020), Psomiadis et al. (2021), Gibson e Sánches (2021).

Observando o quadro brasileiro sobre estudo de barragens de rejeito de mineração e a importância das simulações de rompimento dessas barragens, julgou-se oportuno, a realização de um estudo de caso para a Barragem de Contenção de Rejeitos da Itafós Arraias Mineração e Fertilizantes S.A., em Arraias, Tocantins. Conforme ANM (2022a), esta é a única barragem de rejeitos de mineração em condição de DPA – classificação B em atividade no Tocantins que consta na Política Nacional de Segurança de *Barragens – PNSB* (Brasil, 2010) e de alto dano potencial associado, e que atualmente enquadra-se em nível de alerta. Para o estudo de simulação de rompimento da barragem, utiliza-se o software HEC-RAS - *Hydrologic Engineering Centers River Analysis Systems* (USACE, 2022), do Centro de Engenharia Hidrológica do U.S. *Army Corps of Engineers* combinado com o sistema de informações geográficas ArcGIS. O objetivo do estudo de caso é simular o rompimento da barragem por *piping*, determinando os alcance da mancha de inundação, profundidade, velocidade máxima da lâmina d'água e vazão, e conseqüentemente, os possíveis potenciais interferências/impactos causados dentro da área de inundação.

## **2. Materiais e métodos**

### **2.1.1. Materiais**

Montou-se um banco de dados geográficos com dados públicos disponíveis em ambiente web. Em termos de dados biofísicos, foram inseridos planos de informação de solos, relevo, geologia, dados climatológicos e, de cobertura vegetal e uso da terra do geoportal de dados da Secretaria do Planejamento do Estado do Tocantins (Seplan, 2018). E foi complementado com dados de altimetria do modelo digital de elevação do satélite ALOS PALSAR adquirido junto ao site Japan Aerospace Exploration Agency – JAXA (JAXA, 2022). Para a caracterização do reservatório usam-se os dados públicos obtidos junto à Agência Nacional de Mineração – ANM (ANM, 2022b).

### **2.1.2. Barragem de rejeitos da Itafós Arraias Mineração e Fertilizantes S.A**

A barragem de rejeitos da Itafós Arraias Mineração e Fertilizantes S.A, fica no município de Arraias, Tocantins, entre as coordenadas de longitude Oeste 46 50' 00" e 46 48' 00" e latitudes Sul 12 55' 00" e 12 52' 00". Ela tem como finalidade a disposição controlada de rejeitos gerados do beneficiamento do minério fosfático. A Figura 1 apresenta a localização da barragem, sua geometria e barramento.

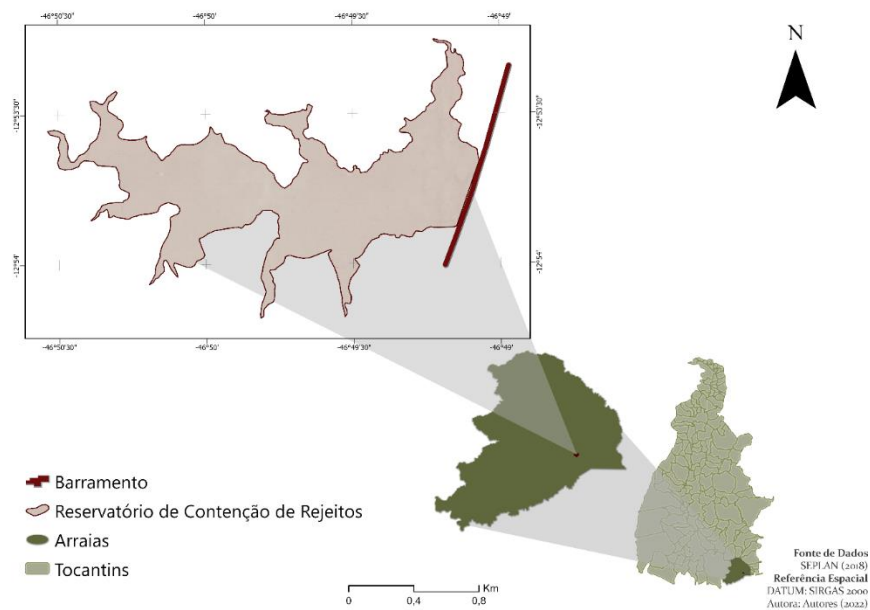


Figura 1. Mapa de localização da barragem de rejeitos em Arraias, Tocantins.

De acordo com a ANM (2022b), a barragem está ativa desde 2013 e tem um uma vida útil prevista de trinta anos. Ela foi construída no vale do córrego Bezerra com uma altura inicial de 20 m podendo atingir uma altura máxima de 30 m. A altura atual barragem é de 22 m, com o reservatório tendo uma área de 710.000 m<sup>2</sup> e volume de 4.136.059,54 m<sup>3</sup> e o projetado de 7.500.000 m<sup>3</sup>. O tipo de barragem é de terra homogênea, com fundação em solo residual/aluvião, e método construtivo de alteamento à jusante, sendo contínuo o tipo de alteamento. Em termos de estado de conservação, as estruturas civis são bem mantidas e em operação normal, com percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem, não havendo deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. Há falhas na proteção dos taludes e paramentos, e presença de vegetação arbustiva.

O tipo de rejeito armazenado no reservatório é decorrente do beneficiamento do minério fosfático, matéria-prima para a produção de superfosfato simples (SSP), usado como insumo na atividade agropecuária, com uma polpa de 2,5% de fosfato inserida no rejeito (ANM, 2022).

A barragem possui plano de ação emergencial, porém segundo ANM (2022b), ainda não foram entregues cópias do PAEBM para as prefeituras e defesas municipais e estaduais, conforme exigido pela Portaria n°. 70.389/2017. Em termos de avaliação de impactos ambientais, o empreendimento apresenta impacto significativo, de média intensidade, e afeta a jusante, em caso de rompimento da barragem, um número abaixo de 100 pessoas (ANM, 2022b).

### 2.1.3. Metodologia

O processo de simulação de rompimento da barragem de rejeitos da Itafós Arraias Mineração e Fertilizantes S.A. inicia-se com a elaboração do hidrograma de ruptura. Para isto, utiliza-se da modelagem hidrológica no HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*). Ela propicia, a partir do uso dos dados de altimetria e do hietograma de chuva (calculado pelo método de Huff, 1967), a delimitação da bacia hidrográfica, trechos de drenagens, balanço

hídrico e, por fim, o hidrograma de projeto obtido pelo método desenvolvido pelo *Soil Conservation Service - SCS* (atual *Natural Resources Conservation Service - NRCS*). Executando essa modelagem hidrológica no HEC-HMS, observa-se que não haveria galgamento a partir das vazões encontradas, visto que os sistemas extravasores da barragem são capazes de verter a vazão advinda da precipitação máxima para tempo de retorno de 10.000 anos. Assim, a simulação de ruptura não fica associada há um evento de precipitação, e sim, ao colapso por *piping*.

No ambiente HEC-RAS, insere-se a componente altimetria do terreno, usando o modelo digital de elevação ALOS PALSAR, com grade de 12,5 m, intervalo suficiente para geração de uma malha computacional com células apropriadas para análise. Em seguida, atribui-se o coeficiente de rugosidade da equação de *Manning* para quantificar a resistência ao fluxo (Manandhar, 2010). A calibração do coeficiente de rugosidade *Manning* se dá com base nos dados de cobertura e uso da terra (Tabela 1).

Tabela 5 - Valores de coeficiente de *Manning* utilizados (Chow, 1959)

Uso da Terra	Coeficiente de Manning
Terra estéril	0,03
Arbustiva	0,05
Pastagens e terras cultivadas	0,035
Rio	0,04

Ainda no HEC-HAS, usa-se as condições de contorno do modelo: (a) o volume do reservatório a montante e (b) a profundidade normal com declividade do fundo do canal de aproximadamente 0,4% à jusante.

Na sequência, realiza-se a calibração do HEC-RAS (6.1) com base na metodologia de Bingham, visando simular o comportamento do fluido não newtoniano frente à ruptura da barragem. No caso da barragem de rejeitos de minério fosfático, consideram-se os resultados de Barreda, Valadão e Araújo (2021) que utilizam rejeitos de fosfato de valor máximo de tensão de escoamento, ou tensão de limite elástico, de 300 Pa para 73% de massa de sólidos, e 50 Pa para 65% de massa de sólido.

Definiu-se a geometria final da brecha de ruptura através do modelo empírico de Froehlich (2008), que está entre os mais difundidos. Estando o talvegue na cota 610 m, adota-se a cota da crista de 632 m, visto que o barramento possui 22 m de altura atual. Considerando que a brecha irá abranger toda estrutura, da elevação natural do terreno (610 m) até a crista, conforme Froehlich, tem-se a largura inferior de 25 m, com inclinações esquerda e direita de 0,7 e tempo de formação de 0,52 horas, ou seja, 31,2 minutos. Este resultado é satisfatório, visto que, para Singh (1996), o tempo de falha é igual ou menor que 3 horas, sendo que a probabilidade do tempo de falha ser inferior à 90 minutos é equivalente à 50%.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1.1. Área de Inundação

Na Figura 2 é apresentada a mancha de inundação na situação crítica, ou seja, quando atinge a maior área. A mancha abrange uma área de 484,02 ha e uma profundidade máxima de 19,78 m. A velocidade máxima da onda de cheia alcançada é de 13 m/s, chegando na Seção 3

em 4h 20m após o rompimento.

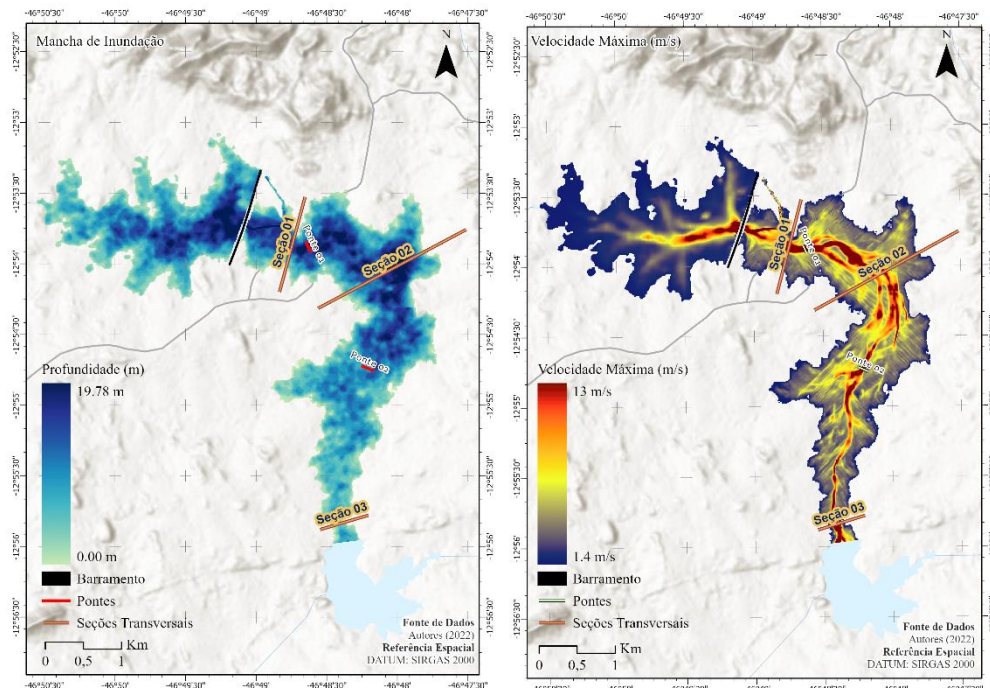


Figura 2. Mancha de Inundação formada (2a) e velocidade atingida em m/s (2b).

Os dados coletados nas três seções transversais, velocidade máxima atingida, cota máxima, e hidrograma de vazão ao longo do trajeto da frente de onda são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de vazão, nível de rejeito, profundidade e velocidade para cada seção considerando valores máximos.

	<b>Barramento -S1</b>	<b>S1-S2</b>	<b>S2-S3</b>
Distância do barramento (km)	0,63	1,88	5,82
Nível máximo de rejeito – cota (m)	623	617	592
Profundidade máxima (m)	12,35	17,60	3,15
Vazão máxima (m <sup>3</sup> /s)	2.619,25	2.452,84	374,54
Velocidade máxima (m/s)	2,51	1,46	4,05

Observando a Tabela 2, percebe-se que a Seção 1 está a 0,63 km, a Seção 2 à 1,88 km e a Seção 03 à 5,82 km de distância do barramento. Entre os três trechos, Barramento-S1, S1-S2 e S2-S3, a Tabela 2 mostra que o nível máximo do rejeito reduz 31 m em altura, em virtude das cotas de elevação do terreno. Para o trecho S1-S2 há uma redução de apenas 6 m, enquanto que no trecho S2-S3, verifica-se um decaimento de 25 m de altura decorrente da retenção de rejeito neste intervalo.

Para a profundidade da onda, percebe-se que no trecho S1-S2 ocorre um aumento de 5,25 m em relação ao trecho Barramento-S1, enquanto no trecho S2-S3 ocorre um decaimento acentuado de profundidade em 14,45 m. Estas variações podem ser justificadas a partir da

constatação de que, para o primeiro trecho, a Seção 1 apresenta maior vazão quando comparada à Seção 2, e ainda, que nesta há aumento de material acumulado e pouca perda de energia devido à curta distância percorrida, acarretando maior profundidade. Já entre S2-S3, a profundidade reduz ligeiramente, visto que há perdas de matéria e energia no decorrer do percurso. Além disto, a última seção tem maior velocidade de propagação da onda de cheia e menor vazão quando comparada as demais, sendo assim, a área da seção transversal (profundidade x largura) também fica reduzida.

A vazão máxima entre S1-S2 reduz em 166,41 m<sup>3</sup>/s, devido à perda de energia no decorrer do talvegue. Para S2-S3 este decréscimo é mais acentuado, há redução de 2.078,30 m<sup>3</sup>/s, justificada pela maior distância percorrida.

Por fim, com relação à velocidade máxima, entre S1-S2 há redução de 1,05 m/s, pois existe pequena declividade e distância neste trecho, e ainda, a largura do escoamento aumenta no decorrer do trecho, possibilitando maior passagem de matéria e reduzindo a velocidade para as superfícies de controle. Entre S2-S3, a velocidade aumenta drasticamente, é a máxima observada, visto que o vale apresenta-se bastante estreito. Apesar de toda perda de energia e vazão, com a ligeira diminuição da área de superfície de controle, há intenso aumento de velocidade.

### 3.1.2. Interferências Ambientais

Ao longo do trajeto da frente de onda, verifica-se que ela impacta benfeitorias na zona rural e infraestrutura de transporte, áreas de pastagem e de vegetação nativa, e provavelmente a fauna local (Figura 3).

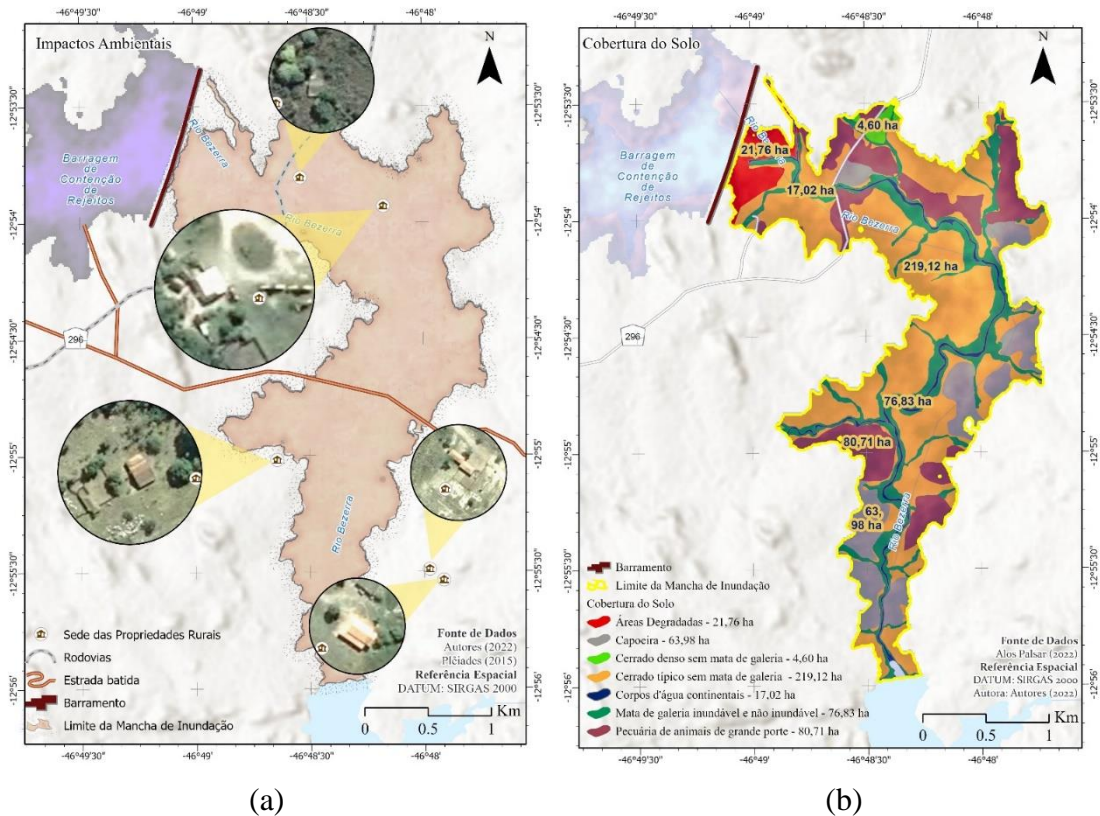


Figura 3. Interferência ambientais (3a) e cobertura e uso da terra atingida pela mancha de inundação.



Pela Figura 3-a, é possível visualizar duas sedes de propriedades rurais que serão soterradas pelo fluxo de rejeitos, assim como duas pontes, uma na rodovia TO-296 e outra em estrada vicinal que faz a ligação entre a unidade industrial da Itafós Mineradora e a barragem de rejeito. No final do percurso da frente de onda, nota-se que ela alcança a barragem de captação de água que a indústria utiliza para manter seu processo produtivo.

Na Figura 3-b observa-se que 80,71 ha de pastagens com uso de pecuária de animais de grande porte são afetados pela inundação e que 364,54 ha de vegetação nativa também são soterradas e destruídas. Deste total 63,98 ha são de capoeira, 4,60 ha representam cerrado denso sem mata de galeria, 219,12 ha correspondem à cerrado típico sem mata de galeria e 76,83 ha equivalem às matas de galeria inundáveis e não inundáveis. Além disto, há 21,76 ha de área degradada e 17,02 ha de curso d'água soterrados. A Tabela 3 sintetiza tais informações.

Tabela 6 - Áreas de cobertura e uso da terra atingida pela mancha de inundação

Cobertura e uso da terra	Área (hectares)
Áreas degradadas	21,76
Capoeira	63,98
Cerrado denso sem mata de galeria	4,60
Cerrado típico sem mata de galeria	219,12
Corpos d'água continentais	17,02
Mata de galeria inundável e não inundável	76,83
Pecuária de animais de grande porte	80,71
<b>Total</b>	<b>484,02</b>

Em relação à fauna, não há capacidade de mensuração de indivíduos afetados, todavia, com base nas informações do EIA (Ambienger-Prominer, 2010), há uma indicação de possíveis perdas e afugentamentos de mastofauna, avifauna, ictiofauna e herpetofauna, e perda de habitats aquáticos e terrestres. A área de inundação também traria como consequências negativas a perda das paisagens naturais, estruturas habitacionais e infraestruturas por soterramento, perda de áreas de pecuária e vegetação nativa/antropizada por escoamento ou soterramento pelos resíduos, alteração da qualidade da água e solo e impacto visual.

#### 4. Conclusões

O mapa de inundação gerado pelo software HEC-RAS a partir do modelo digital de elevação ALOS PALSAR, coeficiente de *Manning* com dados biofísicos disponibilizados pela Seplan (TO), características da estrutura fornecidas pela ANM (2022) e as suposições de brecha por *piping* a partir de Froelich (2008) permitiu uma representação do comportamento de onda de cheia proveniente do colapso estrutural. Além disto, percebe-se que o uso de malha computacional para o modelo 2D é adequada aplicação em estudos com cursos d'água sinuosos, como o córrego Bezerra, tornando a modelagem mais precisa.

A realização de estudos de rompimento de barragens é de extrema importância para a determinação da abrangência da área impactada, velocidade alcançada pela onda e profundidade. Esses fatores são aqueles que irão balizar a elaboração do plano de ação de emergência com maior possibilidade assertiva e os estudos de impacto ambiental, porque permitem melhor observar os problemas advindos do rompimento e da força da onda, ou seja,

seu impacto mecânico e a identificação dos locais soterrados onde pode-se desencadear os impactos químicos devido ao tipo de rejeito sobreposto aos solos.

Considera-se que os resultados e praticidade da modelagem obtidos neste estudo de caso por meio da combinação de ferramentas de geoprocessamento com o HEC-RAS (software de domínio público e bastante amigável em termos operacionais), deva ser um procedimento usado para análise de rompimento de barragens de rejeito, o que fortalece a recomendação da Agência Nacional de Águas. Além disso é ele de grande valia para a elaboração do plano de ação de emergência de barragens de rejeitos de mineração.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal do Tocantins (UFT) e à Avaliação do Ensino de Pós-Graduação (CAPES).

### **Referências Bibliográficas**

AMARAL, D. R. B. **Simulação de ondas de cheia induzidas pelo rompimento hipotético da barragem de Peti em São Gonçalo do Rio Abaixo-MG**. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.232> . Acesso em: 20 de maio de 2021.

AMBIENGER/PROMINER. **Estudo de Impacto Ambiental da Itafós Mineração Ltda**. Prominer Projetos e Ambienger Engenharia Ambiental LTDA. Palmas, 2010. Disponível em: <https://central.to.gov.br/download/42566>. Acesso em: 05 de junho de 2021.

BARREDA, R. H. O., VALADÃO, G. E. S., ARAÚJO, A. C. (2021). **Production of paste from fine tailings streams in a laboratory scale column thickener**. *REM - International Engineering Journal.*, 74, 83-91. <https://doi.org/10.1590/0370-44672020740073>. Acesso em: 02 de março de 2022.

BRASIL. **Lei n. 12334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000, Brasília, 2010. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos, [2010]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm). Acesso em: 05 de agosto de 2021.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). **REPORT MENSAL. Barragens de Mineração Julho/2022**. Brasília, Agência Nacional de Mineração, 2022a. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/arquivos/boletim-mensal-julho-2022.pdf>. Acesso em: 09 de julho de 2022.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). **Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração (SGSBM)**. Brasília, Agência Nacional de Mineração, 2022b. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/GerenciarPublico>. Acesso em: 09 de agosto de 2022.

CHOW, V.T. **Open Channel Hydraulics**. McGraw Hill Inc., Singapore, 1959

DERDOUS, O., DJEMILI, L., BOUCHEHED, H., TACHI, S. E. (2015). **A GIS based approach for the prediction of the dam break flood hazard - A case study of Zardezas reservoir “skikda, Algeria”**”, *Journal of Water and Land Development*, v. 27, n. 1, p. 15–20, 2015. DOI: 10.1515/jwld-2015-0020 . Acesso em: 09 de Agosto de 2021.

FRANCO, C. S. P. **Segurança de Barragens: aspectos regulatórios**. Dissert. Mestrado. Goiânia: UFGO, 2008. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/1318>. Acesso em: 20 de abril de 2021.

FROEHLICH, D. C. (2008). **Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties**. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(12), 1708–1721.

GIBSON, S.; SÁNCHEZ, A. **HEC-RAS Mud and Debris Flow: User and Technical Reference Manual v6.1. 2021**. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasmuddebris> . Acesso em: 02 de junho de 2022.

GNANDI, K., et al. **Processing of Phosphate Mine Tailings by Coagulation Flocculation to Reduce Marine Pollution in Togo: Laboratory Tests**. *Mine Water Environ* 24, 215–221 (2005). <https://doi.org/10.1007/s10230-005-0102-2>. Acesso em: 06 de junho de 2022.

HUFF, F. A. (1967). **Time distribution of rainfall in heavy storms**. *Water Resources Research*, 3(4). <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). Earth Observation Research Center. ALOS-2 Project / PALSAR-2. in ALASKA SATELLITE FACILITY. Download Alos/Palsar. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/#/>>. Acesso em: 14 de julho de 2021.

LEE, C., LIU, F. **"Potential environmental hazard due to tailings dam failure in Minnesota iron range and safety concern of the Dams in the US"**, 2020. DOI: 10.31223/OSF.IO/QBRKG . Acesso em: 14 de junho de 2022.

MANANDHAR, B. **Flood plain analysis and riskassessment of Lothar Khola**. 2010. 65 p. Tese (Master of science in watershed management) - Universidade de Tribhuvan, Nepal, 2010. DOI 10.13140/2.1.1664.1289. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/265908097\\_Flood\\_Plain\\_Analysis\\_and\\_Risk\\_Assesment\\_of\\_Lothar\\_Khola](https://www.researchgate.net/publication/265908097_Flood_Plain_Analysis_and_Risk_Assesment_of_Lothar_Khola). Acesso em: 11 maio 2022.

PSOMIADIS, E., TOMANIS, L., KAVVADIAS, A., et al. **Potential dam breach analysis and flood wave risk assessment using HEC-RAS and remote sensing data: A multicriteria approach**, *Water (Switzerland)*, v. 13, n. 3, p. 1–24, 2021. DOI: 10.3390/w13030364. Acesso em: 09 de maio de 2021.

RAMAN, A.; LIU, F. (2019). **An investigation of the Brumadinho Dam Break with HEC RAS simulation**. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1911.05219> . Acesso em: 08 de junho de 2022.

SANTOS, C. M. dos, SILVA, J. G., SALLES, P. V., SILVEIRA BRAGA, F. C., POGGIALI, F. S. J. (2020). **Análise da mancha de inundação da Barragem Sul da Mina de Brucutu, São Gonçalo do Rio Abaixo, MG.** Revista Engenharia De Interesse Social, 5(6), 35–52. Disponível em: <https://doi.org/10.35507/25256041/reis.v5i6.5191> . Acesso em: 09 de maio de 2021.

SINGH, V.P. 1996. **Dam Breaching Modeling Technology**. Dordrecht: Kluwer Academic. (PDF) Flood Plain Analysis and Risk Assessment of Lothar Khola. (n.d.). Retrieved July 13, 2022. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/265908097\\_Flood\\_Plain\\_Analysis\\_and\\_Risk\\_Assessment\\_of\\_Lothar\\_Khola](https://www.researchgate.net/publication/265908097_Flood_Plain_Analysis_and_Risk_Assessment_of_Lothar_Khola) . Acesso em : 07 de junho de 2022.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **HEC-RAS: river analysis system, user's manual**. Davis: Hydrologic Engineering Center, 2002

TOCANTINS. Secretaria de Planejamento (SEPLAN). **Base Temática Sudeste do Tocantins**. 2018. Disponível em: <https://geoportal.to.gov.br/gvsigonline/>. Acesso em: 09 de maio de 2021.

## 6 CONCLUSÃO

A ferramenta Plúvio (UFV, 2006) mostra-se bastante versátil, contendo um banco de dados com parâmetros da Equação IDF dos municípios do Brasil. O uso destes parâmetros é necessário para realizar a distribuição temporal da chuva através do método de Huff (1967). O HEC-HMS juntamente com o ArcMap são imprescindíveis para a coleta demais dados necessários para a análise de distribuição de chuva temporal: comprimento do talvegue, cota máxima e mínima do talvegue, desnível total e área da bacia.

O hietograma de projeto gerado pelo método de Huff (1967), convalidado pelo DAEE em São Paulo em 1983, resulta em um ótimo resultado, com procedimentos práticos e acessíveis e permite a verificação do comportamento hidrológico na bacia. Usando os dados de distribuição de chuva, o HEC HMS apresenta a resposta da bacia de maneira eficiente sendo realizada a modelagem hidrológica através de SCS, uma das opções de análise fornecidas pelo *software*, resultando no hidrograma de projeto que possibilita verificar a amortização do reservatório estudado e confirmar que não há hipótese de galgamento.

O mapa de inundação gerado pelo software HEC-RAS a partir do modelo digital de elevação ALOS PALSAR, coeficiente de *Manning* com dados biofísicos disponibilizados pela Seplan (TO), características da estrutura fornecidas pela ANM (2022) e as suposições de brecha por *piping* a partir de Froelich (2008) fornecem dados suficientes para uma representação do comportamento de onda de cheia proveniente do colapso estrutural. Além disto, percebe-se que o uso de malha computacional para o modelo 2D é adequada aplicação em estudos com cursos d'água sinuosos, como o córrego Bezerra, tornando a modelagem mais precisa.

Em relação à área de estudo, na ausência de dados específicos disponíveis sobre as características reológicas do fluido armazenado na barragem de contenção, conclui-se que a utilização de dados obtidos em literatura acerca do mesmo tipo de rejeito, torna-se viável e mais realistas as simulações do que o uso de modelos newtonianos para rompimento de barragens.

A realização de estudos de rompimento de barragens é de extrema importância para a determinação da abrangência da área impactada, velocidade alcançada pela onda e profundidade. Esses fatores são aqueles que irão balizar a elaboração do plano de ação de emergência com maior possibilidade assertiva e os estudos de impacto ambiental, porque permitem melhor observar os problemas advindos do rompimento: perda de áreas vegetadas e pecuária, perda do potencial agrônômico e ecossistêmico, sendo a área inundada equivalente à 484,02 hectares, com 78,83 hectares de vegetação nativa, 80,71 hectares de pecuária e 2019,12 hectares de cerrado denso.

Considera-se que os resultados e praticidade da modelagem obtidas nesse estudo de caso por meio da combinação de ferramentas de geoprocessamento com o HEC-RAS (software de domínio público e bastante amigável em termos operacionais), deva ser um método para análise de rompimento de barragens de rejeito, o que fortalece a recomendação da Agência Nacional de Águas.

## REFERÊNCIAS

AKSOY, H.; et al. Hydrological and hydraulic models for determination of flood-prone and flood inundation areas. **IAHS-AISH Proceedings and Reports**, v. 373, p. 137–141, 2016.

AMARAL, D. R. B. **Simulação de ondas de cheia induzidas pelo rompimento hipotético da barragem de Peti em São Gonçalo do Rio Abaixo-MG**. 2017. 78 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.232> . Acesso em: 20 mai. 2021.

AMBIENGER/PROMINER. Estudo de Impacto Ambiental da Itafós Mineração Ltda. **Prominer Projetos e Ambienger Engenharia Ambiental LTDA**. Palmas, 2010. Disponível em: <https://central.to.gov.br/download/42566>. Acesso em: 05 jun. 2021.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO. **Geração de Manchas para Classificação de Barragens Quanto ao Dano Potencial Associado - Metodologia Simplificada**. [S.l: s.n.], 2019.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência - PAE**. Relatório, vol. IV. Brasília, 2020, 129 p. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/downloads/volume-iv-guia-de-orientacao-e-formularios-dos-planos-de-acao-de-emergencia-2013-pae>. Acesso em: 03 Set. 2022.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. 2006. 143fl. (Tese de Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil. 2006.

ASSIS, A.; ESPÓSITO, T. Construção de barragens de rejeito sob uma visão geotécnica. In: Simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos – REGEO, 3., 1995. **Anais...** Ouro Preto: ABMS/ABGE/CBGB, 1995, p. 259-273.

ATALLAH, T. **A review on dams and breach parameters estimation**. 2002. 120 fl. Dissertação (Mestrado) - Polytechnic Institute And State University Blacksburg, Virginia, 2002.

AZAM, S.; LI, Q. Tailings dam failures: A review of the last one hundred years. **Geotechnical News**, v.28, n.4, p.50-54, 2010.

BARREDA, R. H. O.; VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. Production of paste from fine tailings streams in a laboratory scale column thickener. **REM - International Engineering Journal**, v.74, p.83-91, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0370-44672020740073>. Acesso em: 02 mar. 2022.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). REPORT MENSAL. **Barragens de Mineração Julho/2022**. Brasília, Agência Nacional de Mineração, 2022a. Disponível em:

<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/arquivos/boletim-mensal-julho-2022.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2022.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). **Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração (SGSBM)**. Brasília, Agência Nacional de Mineração, 2022b. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/GerenciarPublico>. Acesso em: 09 ago. 2022.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). **Resolução N° 95, de 7 de fevereiro de 2022**. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-380760962/>. Acesso em: 02 Nov. 2022.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. **Portaria n. 526, de 09 de dezembro de 2013**. 2013. Disponível em: <https://williamfreire.com.br/areas-do-direito/direito-ambiental/portaria-no-526-de-09-dezembro-de-2013/>. Acesso em: 02 Set. 2022.

BRASIL. Engecorps Engenharia. Agência Nacional de Águas (Org.). **Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigações de Campo Correlatas: Estudos de Ruptura de Barragens**. Brasília: Engecorps, 2012.

BRASIL. **Lei n. 12334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000, Brasília, 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm). Acesso em: 05 Ago. 2021.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos Construtivos De Barragens De Rejeitos De Mineração – Uma Revisão. **Holos**, v. 8, p. 77, 2017.

CASTRO, L. S. de.; ALMEIDA, E. S. de. Desastres e desempenho econômico: avaliação do impacto do rompimento da barragem de Mariana. **Geosul**, v.34, n.70, p.406-429. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2019v34n70p406>. Acesso em: 20 set 2020.

CHAMBERS, M. D.; HIGMAN, B. Long term risks of tailings dam failure. **Bretwood Higman**; v.2, n. 907, 2011. Disponível em: [https://www.savetheboundarywaters.org/sites/default/files/resource-file/46-chambers-higman-2011-long-term-risks-of-tailings-dam-failure\\_0.pdf](https://www.savetheboundarywaters.org/sites/default/files/resource-file/46-chambers-higman-2011-long-term-risks-of-tailings-dam-failure_0.pdf). Acesso em: 20 set 2020.

CHANDLER, R. J.; TOSATTI, G. The Stava tailings dams failure, Italy, July 1985. **Proc. Instn Civ. Engrs “Geotechnical Engineering”**; v.2, n.113, p.67-79, 1995.

CHOW, V.T. **Open Channel Hydraulics**. McGraw Hill Inc., Singapore, 1959.



COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 191-206, jul./dez. 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v2n2.p191-206>. Acesso em: 01 jan 2020.

DAVIES, M. P.; et al. **Design of tailings dams and impoundments**. Keynote address, Tailings and Mine Waste Practices SME, AGM Phoenix, 2002.

DERDOUS, O.; et al. A GIS based approach for the prediction of the dam break flood hazard - A case study of Zardezas reservoir “skikda, Algeria”. **Journal of Water and Land Development**, v. 27, n. 1, p. 15–20, 2015.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. 2008. 130fl. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2008.

DYHOUSE, G.; et al. **Floodplain using HEC-RAS**. [S.L]: Haestad Press, 2003. Disponível em: <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.neuro.26.041002.131425>. Acesso em: 20 set 2021.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. The statistics of embankment dam failures and accidents. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37, n. 5, p. 1000–1024, 2000. DOI: 10.1139/t00-030. Acesso em: 12 mai 2022.

FRANCA, M. J. **Caracterização e modelação numérica e experimental da ruptura provocada por galgamento de barragens de enrocamento**. 2002. 160fl. Dissertação (Mestrado em Hidráulica) – Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2002.

FRANCO, C.S.S.PA. **Segurança de barragens: aspectos regulatórios**. 2008. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2008. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/1318>. Acesso em: 20 abr 2021.

FREITAS, C. M.; DA SILVA, M. A. Work accidents which become disasters: Mine tailing dam failures in Brazil. **Revista Brasileira de Medicina do Trabalho**, v. 17, n. 1, p. 21–29, 2019.

FROEHLICH, D. C. Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.134, n.12, p.1708–1721, 2008.

GIBSON, S.; SÁNCHEZ, A. **HEC-RAS Mud and Debris Flow: User and Technical Reference Manual v6.1**. 2021. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasmuddebris> . Acesso em: 02 jun. 2022.

GNANDI, K.; BOROON, M. H. R.; EDORH, P. The geochemical characterization of mine effluents from the phosphorite processing plant of Kpémé (Southern Togo). **Mine Water and**

**the Environment**, v.28, n.1, p.65–73, 2009. <https://doi.org/10.1007/S10230-008-0058-0>. Acesso em: 09 out. 2021.

GNANDI, K.; et al. The Impact of Phosphate Mine Tailings on the Bioaccumulation of Heavy Metals in Marine Fish and Crustaceans from the Coastal Zone of Togo. **Mine Water and the Environment**, v.25, n.1, p.56–62, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S10230-006-0108-4>. Acesso em: 09 abr 2021.

GNANDI, K.; et al. Processing of Phosphate Mine Tailings by Coagulation Flocculation to Reduce Marine Pollution in Togo: Laboratory Tests. **Mine Water Environ**, v.24, p.215–221, 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-005-0102-2>. Acesso em: 06 de junho de 2022.

HAMDAN, A. N. A.; ALMUKTAR, S.; SCHOLZ, M. Rainfall-runoff modeling using the hec-hms model for the al-adhaim river catchment, northern iraq. **Hydrology**, v.8, n.2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/hydrology8020058>. Acesso em: 10 jan 2021.

HELLER, L. Mining disasters and public health in Brazil: Lessons (not) learned. **Cadernos de Saude Publica**, v.35, Issue 5, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-311X00073619>. Acesso em: 20 set 2020.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010.

HIPOLITO, J.R. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. Lisboa: IST Press, 2011.

HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. **Water Resources Research**, v.3, n.4, 1967. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>. Acesso em: 01 Jan. 2022.

HUȚANU, E.; et al. Using 1D HEC-RAS Modeling and LiDAR Data to Improve Flood Hazard Maps Accuracy: A Case Study from Jijia Floodplain (NE Romania). **Water**, v.12, n.6, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12061624>. Acesso em: 12 ago. 2021

ICOLD. **Tailings Dams, Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences**. Bulletin 121, International Commission on Large Dams, 2001.

JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency. **Earth Observation Research Center**. ALOS-2 Project / PALSAR-2. ALASKA SATELLITE FACILITY. Download Alos/Palsar. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/#/>. Acesso em: 14 jul. 2021.

JÓNATAS, R.J.L. **Rotura de barragens de aterro por galgamento Ensaios experimentais com aterros homogéneos**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Energia e do Ambiente, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.

JUNIOR, J. C. G. S. **Estudo comparativo ente modelos unidimensional e pseudo-bidimensional para simulação da propagação de ondas provocadas pela ruptura de barragens**. 2013. 221 fl. Dissertação (Mestrado) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

KAZEZYILMAZ-ALHAN, C. M.; et al. A hydrological model for ayamama watershed in Istanbul, Turkey, using HEC-HMS. **Water Practice and Technology**, v.16, n.1,p. 154–161, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.108>. Acesso em: 20 set. 2021

KHEIRKHAH GILDEH, H.; et al. Tailings Dam Breach Analysis: A Review of Methods, Practices, and Uncertainties. **Mine Water and the Environment**, v. 40, n. 1, p. 128–150, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00718-2>. Acesso em: 09 mai. 2022.

LASCHEFSKI, K. A. Rompimento de barragens em Mariana e Brumadinho (MG): Desastres como meio de acumulação por despossessão. **AMBIENTES: Revista de Geografia e Ecologia Política**, v. 2, n. 1, p. 98, 2020. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/ambientes/article/view/23299>. Acesso em: 22 ago. 2021.

LEE, C.; LIU, F. **Potential environmental hazard due to tailings dam failure in Minnesota iron range and safety concern of the Dams in the US**. 2020. Disponível em: <https://eartharxiv.org/repository/view/157/>. Acesso em: 14 de junho de 2022.

MANANDHAR, B. **Flood plain analysis and riskassessment of Lothar Khola**. 65 fl. 2010. Tese (Master of science in watershed management) - Universidade de Tribhuvan, Nepal, 2010. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/265908097\\_Flood\\_Plain\\_Analysis\\_and\\_Risk\\_Assesment\\_of\\_Lothar\\_Khola](https://www.researchgate.net/publication/265908097_Flood_Plain_Analysis_and_Risk_Assesment_of_Lothar_Khola). Acesso em: 11 mai 2022.

MARSHALL, J. Rompimentos de barragens de rejeitos no Brasil e no Canadá: uma análise do comportamento corporativo. **Caderno Eletrônico de Ciências Sociais**, v. 5, n. 1, p. 27, 2017.

MARTIN, T.E.; et al. **Stewardship of Tailings Facilities**. Lighthall, AMEC Earth & Environmental Limited, 2002. Disponível em: <https://pubs.iied.org/g01027>. Acesso em: 20 ago. 2021.

NETO, L.V. **Estudo de ruptura da Barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: Retroanálise da brecha do acidente de 1954 e ruptura hipotética nas condições atuais**. 2016. 304fl. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

NEVES-SILVA, P.; HELLER, L. Rompimento da barragem em Brumadinho e o acesso à água das comunidades atingidas: um caso de direitos humanos. **Ciência e Cultura**, v.72, n.2, p.47–50, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21800/2317-66602020000200013>. Acesso em: 20 set, 2020.

NUNES, T.A. **Estudo de zonas de risco de inundação em decorrência de rompimento de barragem – Estudo de caso: Represa do Iraí - Pr. Monografia (Graduação) – Curso de**

Engenharia Civil, Centro de Estudos do Mar, Setor Reitoria, Universidade Federal do Paraná, Pontal do Paraná, 2019.

O'BRIEN, J. S., JULIEN, P. Y. **Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows**. Proc, ASCE Specialty Conf. on Delineations of Landslide, Flashflood, and Debris Flow Hazards in Utah, D. S. Bowles. Logan: Utah, 1985, p.260-279.

PAIN, D. J.; SÁNCHEZ, A.; MEHARG, A. A. The Donana ecological disaster: Contamination of a world heritage estuarine marsh ecosystem with acidified pyrite mine waste. **Science of the Total Environment**, v. 222, n. 1–2, p. 45–54, 1998.

PASSOS, N. C. S. T. **Barragem de Rejeito: Avaliação dos Parâmetros Geotécnicos de Rejeito de Minério de Ferro utilizando Ensaio de Campos—Um Estudo de Caso**. 2009. 79 fl. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2009.

PEREIRA, L. F.; CRUZ, G. de B.; GUIMARÃES, R. M. F. Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 02, p. 122–129, 2019.

PLÚVIO 2.1. : **Chuvas intensas para o Brasil**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2006. Disponível em: <http://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>. Acesso em: 23 mar. 2022.

PRETELL, A. R. P.; DISMUKE, J. N. **Comparison of simplified and detailed analyses for assessment of dynamic displacement of a centerline tailings dam**. 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/318471680\\_Comparison\\_of\\_simplified\\_and\\_detailed\\_analyses\\_for\\_assessment\\_of\\_dynamic\\_displacement\\_of\\_a\\_centerline\\_tailings\\_dam](https://www.researchgate.net/publication/318471680_Comparison_of_simplified_and_detailed_analyses_for_assessment_of_dynamic_displacement_of_a_centerline_tailings_dam). Acesso em: 03 Set. 2022.

PSOMIADIS, E.; et al. Potential dam breach analysis and flood wave risk assessment using HEC-RAS and remote sensing data: A multicriteria approach. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 3, p. 1–24, 2021.

RAMAN, A.; LIU, F. **An investigation of the Brumadinho Dam Break with HEC RAS simulation**. Arxiv, 2019. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1911.05219> . Acesso em: 08 de junho de 2022.

ROCHA, F. F. **Retroanálise da ruptura da barragem São Francisco – Miráí, Minas Gerais, Brasil**. 2015. 200fl. Dissertação (Mestrado em Saneamento) - Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Belo Horizonte, 2015, p. 184, 2015.

SAMPAIO, J. A. L. As deficiências do plano de ação emergencial das barragens no Brasil. **Revista Brasileira de Direito**, v.12, n.2, p.7-17, 2016.

SÁNCHEZ, L.E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. [S.l: s.n.], 2020.

SANTOS, C. M. dos.; et al. Análise da mancha de inundação da Barragem Sul da Mina de Brucutu, São Gonçalo do Rio Abaixo, MG. **Revista Engenharia De Interesse Social**, v.5, n.6, p.35–52, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.35507/25256041/reis.v5i6.5191> . Acesso em: 09 mai. 2021.

SANTOS, L. F.; CHARGEL, L.T.; HORA, M. Simulação do Rompimento Hipotético da Barragem de Juturnaíba, Localizada no Estado do Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v.42, n.3, p.299-310, 2019.

SERAFIM, J.L. Safety of dams judged from failures. **Water Power and Dams Construction**, Londres, v. 1, n.12, p. 32-35, dez., 1981.

SINGH, V.P. Dam Breaching Modeling Technology. **Dordrecht**: Kluwer Academic. (PDF) Flood Plain Analysis and Risk Assessment of Lothar Khola. (n.d.), 2022. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/265908097\\_Flood\\_Plain\\_Analysis\\_and\\_Risk\\_Assessment\\_of\\_Lothar\\_Khola](https://www.researchgate.net/publication/265908097_Flood_Plain_Analysis_and_Risk_Assessment_of_Lothar_Khola). Acesso em: 07 jun. 2022.

TOCANTINS. Secretaria de Planejamento (SEPLAN). **Base Temática Sudeste do Tocantins**. 2018. Disponível em: <https://geoportal.to.gov.br/gvsigonline/>. Acesso em: 09 mai 2021.

TSCHIEDEL, A.F.; DE PAIVA, R.C.D. Uncertainty assessment in hydrodynamic modeling of floods generated by dam break. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, p. 1–17, 2018.

USACE. United States Army Corps of Engineers. **HEC-RAS river analysis system: 2D modeling user's manual**, version 5.0. Davis: USACE, 2022.

WISE-URANIUM.ORG. Chronology of major tailings dam failures. **Wise-uranium**, 1960, p. 1–21, 2021. Disponível em: <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. Acesso em: 20 set 2020.

ZHOURI, A.; et al. O desastre da Samarco e a política das afetações: classificações e ações que produzem o sofrimento social. **Ciência e Cultura**. v.68, n.3, p.36–40, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.21800/2317-66602016000300012> . Acesso em: 20 set. 2020.