

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

SIMULATION OF THE RUPTURE OF AN INDUSTRIAL FERTILIZER TAILINGS DAM IN ARRAIAS, TOCANTINS, BRAZIL

SIMULACIÓN DEL ROMPIMIENTO DE UNA REPRESA DE DESECHOS DE FERTILIZANTES INDUSTRIALES EN ARRAIAS, TOCANTINS, BRASIL

Ricardo Ribeiro Dias

Professor da Graduação e do Mestrado em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins-UFT. E-mail: ricdias@uft.edu.br. <https://orcid.org/0000-0003-2059-0848>.

Talita Cintra Braga

Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Tocantins-UFT. E-mail: eng.talitabraga@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5955-4591>.

Girlene Figueiredo Maciel

Professor da Graduação e do Mestrado em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins-UFT. E-mail: maciel@uft.edu.br. <https://orcid.org/0000-0002-7890-833X>.

Rose Mary Godim Mendonça

Professora da Graduação e do Mestrado em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins-UFT. E-mail: rosemary@uft.edu.br. <https://orcid.org/0000-0001-6345-6994>.

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 that occurred in the cities of Mariana and Brumadinho, in the State of Minas Gerais, Brazil, 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 was used the HEC-RAS 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⁻¹ and maximum flow of 2,619.25 m³.s⁻¹ (Section 1), in addition to possible interference/impacts on natural landscapes, areas of anthropic use and public works.

KEYWORDS: HEC-RAS; dam break; flood wave simulation.

RESUMO:

Barragens são estruturas versáteis utilizadas para diversas finalidades, inclusive a contenção de rejeitos decorrentes da atividade de mineração. Nos últimos anos, o rompimento dessas estruturas se tornou um fato recorrente no Brasil, com destaque para os desastres de Mariana e Brumadinho, 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 rompimento 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., utilizou-se o HEC-RAS 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 m³/s (Seção 1), e as possíveis interferências/impactos em paisagens naturais, áreas de uso antrópico e obras públicas.

PALAVRAS CHAVE: HEC-RAS; rompimento de barragem; simulação de onda de cheia.

RESUMEN:

Las represas son estructuras versátiles que se utilizan para diversos fines, inclusive la contención de desechos resultantes de las actividades mineras. En los últimos años, las rupturas de estas estructuras se han convertido en un evento recurrente en Brasil, con énfasis en los desastres de Mariana (2015) y Brumadinho (2019), que provocaron impactos ambientales irreversibles y la pérdida de cientos de vidas. Esto ha demostrado cómo la aplicación de modelos computacionales para predecir escenarios causados por rupturas de represas es muy apropiada para anticipar las consecuencias de las fallas de represas y guiar los planes de acción de emergencia de ellas. En el estudio realizado para la represa de desechos de la Itafós Arraias Mineração e Fertilizantes S.A., en Tocantins, se utilizó HEC-RAS (versión 6.1, la más actual), que incorpora el modelo de ruptura para represas para fluidos no newtonianos, combinado con ArcGIS, ALOS PALSAR y otros datos biofísicos del área de influencia de la represa. La simulación del comportamiento del oleaje de inundación fue por ruptura tipo piping, arrojando resultados de un área de inundación de 484,02 ha, profundidad máxima de 19,78 m, velocidad máxima de propagación del oleaje de 13 m3.s-1 y caudal máximo de 2.619,25 m3.s-1 (Sección 1), y las posibles interferencias/impactos en paisajes naturales, áreas de uso antropogénico y obras públicas.

PALABRAS CLAVE: HEC-RAS, ruptura de represa, desechos mineros, simulación de olas de inundación

INTRODUÇÃO

As rochas fosfáticas são amplamente utilizadas como matérias-primas para produção de fertilizantes, produção de detergentes, suplementos alimentares de animais, entre outros. 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 vêm 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 Estado Tocantins que consta na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB (Brasil, 2010), de alto dano potencial associado, que atualmente se enquadra 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, do *US Army Corps of Engineers* (BRUNNER, 2022) combinado com o sistema de informações geográficas ArcGIS.

O objetivo principal do estudo de caso foi simular o rompimento da barragem por *piping*, determinando o alcance da mancha de inundação, profundidade, velocidade máxima da lâmina de rejeitos e vazão e os possíveis potenciais de interferências/impactos causados ao longo da mancha de inundação.

METODOLOGIA

DADOS

Montou-se um banco de dados geográficos em ArcGIS 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, 2021). O banco 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).

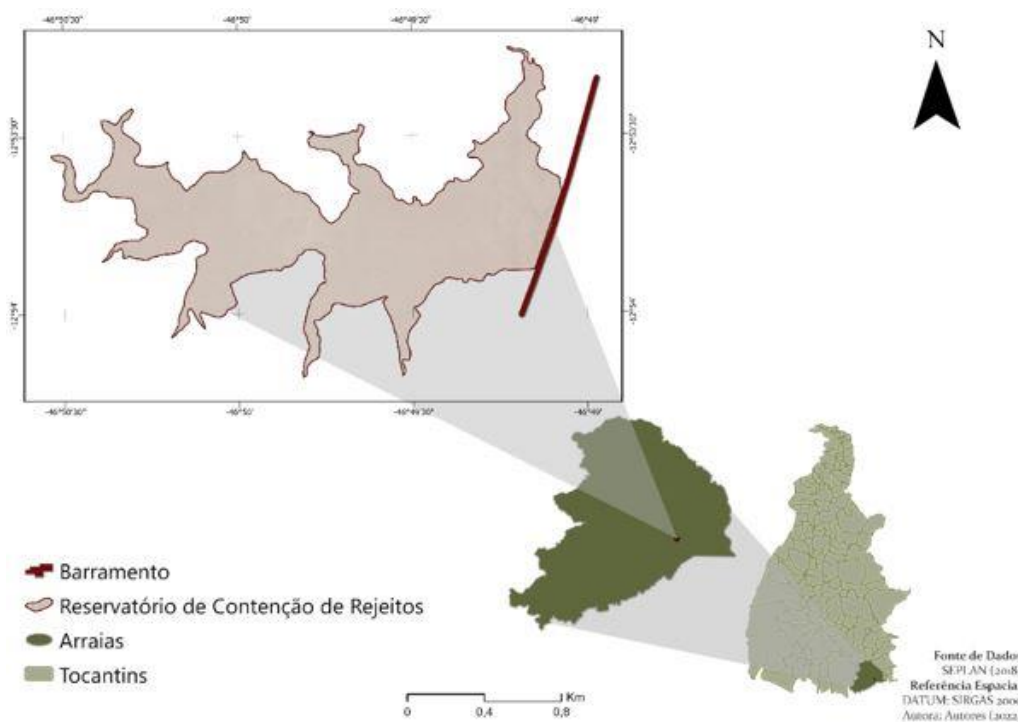
BARRAGEM DE REJEITOS DA ITAFÓS ARRAIAS MINERAÇÃO E FERTILIZANTES S.A

A barragem de rejeitos da Itafós Arraias Mineração e Fertilizantes S.A, instalada no município de Arraias-TO, próximo à divisa com o norte do estado de Goiás, entre as coordenadas de longitude Oeste 46°50'00" e 46°48'00" e latitudes Sul 12°55'00" e 12°52'00". O barramento tem como finalidade principal a disposição controlada de rejeitos gerados durante o processo de beneficiamento do minério fosfático. A Figura 1 mostra a localização do reservatório de contenção de rejeitos, sua geometria e barramento.

De acordo com a ANM (2022b), a barragem está ativa desde 2013 e tem uma vida útil prevista de 30 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 m² e volume de 4.136.059,54 m³ e o projetado de 7.500.000 m³. 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. Por outro lado, verifica-se falhas na proteção dos taludes com a presença de vegetação arbustiva.

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



Fonte: ELABORAÇÃO DOS PRÓPRIOS AUTORES

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 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, 2022b).

MÉTODOS

O processo de simulação de rompimento da barragem de rejeitos da Itafós Arraias Mineração e Fertilizantes S.A. iniciou-se com a elaboração do hidrograma de

ruptura. Para isto, utilizou-se da modelagem hidrológica no HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*). Ela propiciou, 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, observou-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 ficou associada há um evento de precipitação, e sim, ao colapso por *piping* ou galgamento.

No ambiente HEC-RAS, inseriu-se a componente de 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, atribuiu-se o coeficiente de rugosidade da equação de Manning para quantificar a resistência ao fluxo (MANANDHAR, 2010). A calibração do coeficiente de rugosidade de Manning se deu com base nos dados de cobertura e uso da terra (tabela 1).

Tabela 1 - Valores de coeficiente de Manning utilizados

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

Fonte: ADAPTADO DE CHOW (1959)

Ainda no HEC-HAS, utilizou-se das seguintes 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.

O passo seguinte consiste em realizar a calibração do modelo HEC-RAS (versão 6.1) considerando que o comportamento do escoamento do material resultante da ruptura da barragem de rejeitos de minério fosfático, seja mais semelhante aos fluidos não-newtonianos, como por exemplo, fluidos de Bingham, que possuem propriedades reológicas específicas. Para a barragem em questão, também, foram usados os resultados de Barreda et al., (2021) para o valor máximo de tensão de escoamento ou

tensão de limite elástico de 300 Pascal e 50 Pascal para 73% e 65% de massa de sólidos, respectivamente.

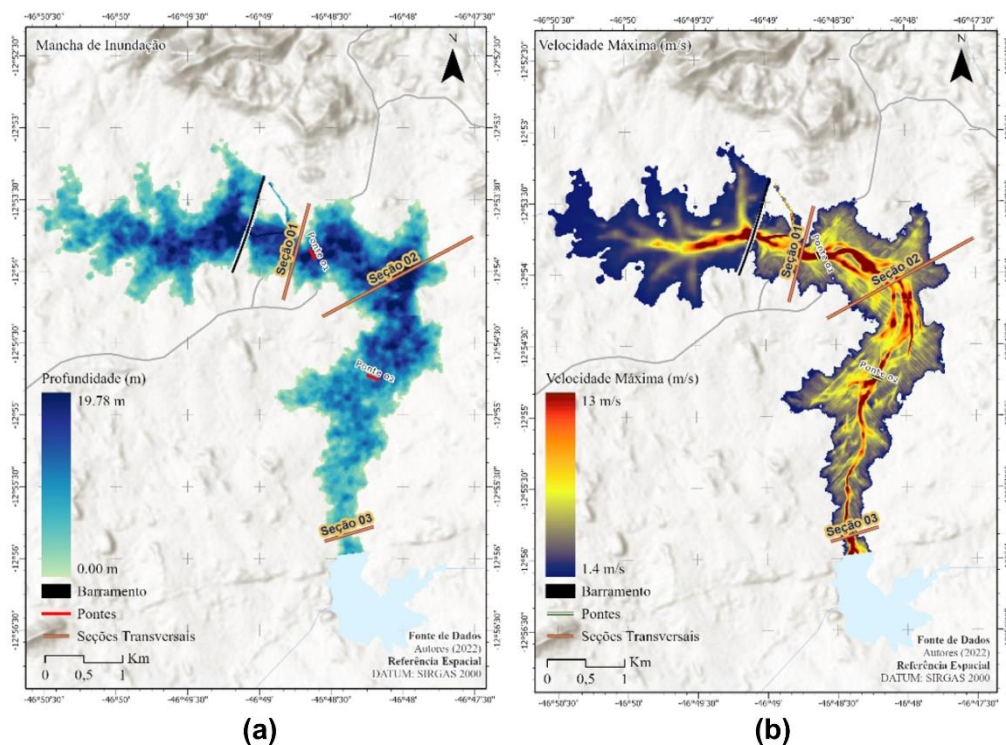
E, por fim, definiu-se a geometria final da brecha de ruptura da barragem de rejeitos, de acordo com o modelo empírico proposto por Froehlich (2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

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 4,33 horas após o rompimento.

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



Fonte: ELABORAÇÃO DOS PRÓPRIOS AUTORES

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.

Observando a Tabela 2, percebe-se que a Seção 1 está a 0,63 km, a Seção 2 a 1,88 km e a Seção 03 a 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 no trecho S2-S3, verifica-se um decaimento de 25 m de altura decorrente da retenção de rejeito neste intervalo.

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

	Barramento -S1	S1-S2	S2-S3
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 (m³/s)	2.619,25	2.452,84	374,54
Velocidade máxima (m/s)	2,51	1,46	4,05

Fonte: ELABORAÇÃO DOS PRÓPRIOS AUTORES

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.

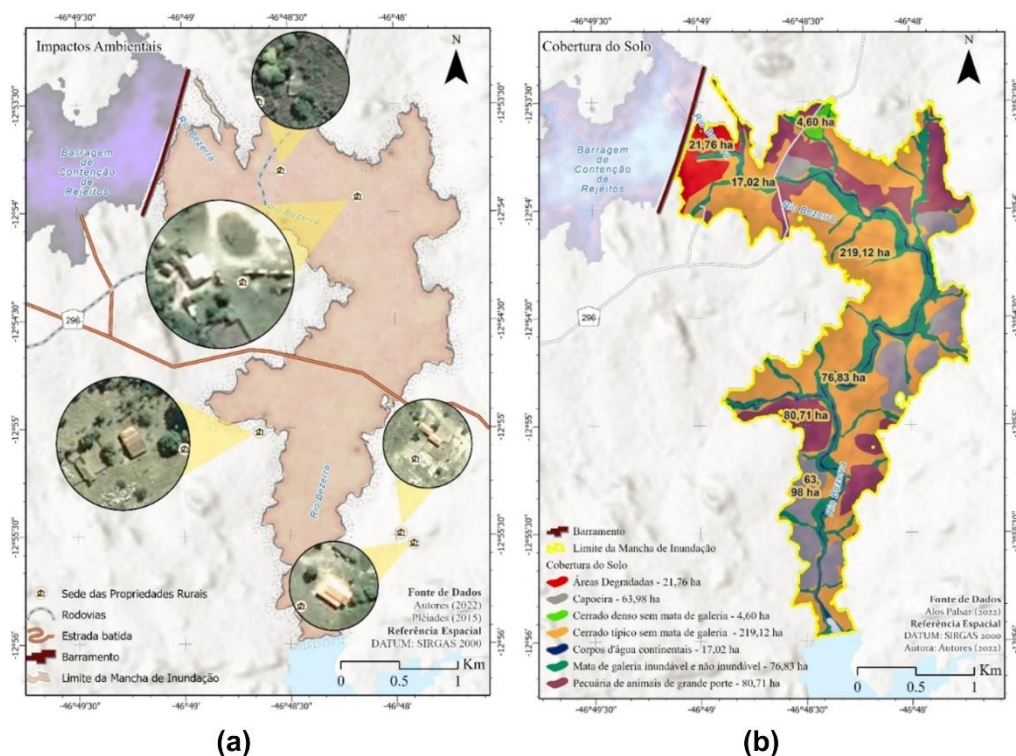
A vazão máxima entre S1-S2 reduz em 166,41 m³/s, devido à perda de energia no decorrer do talvegue. Para S2-S3 este decréscimo é mais acentuado, há redução de 2.078,30 m³/s, justificada pela maior distância percorrida.

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 se apresenta 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.

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 (a) e cobertura e uso da terra atingida pela mancha de inundação (b)



Fonte: ELABORAÇÃO DOS PRÓPRIOS AUTORES

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.

Em relação à fauna, não há capacidade de mensuração de indivíduos afetados, todavia, com base nas informações do Estudo de Impacto Ambiental - 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.

Tabela 3 - 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
Total	484,02

Fonte: ELABORAÇÃO DOS PRÓPRIOS AUTORES

CONCLUSÕES

O mapa de inundação gerado no software HEC-RAS pela combinação 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* conforme Froelich (2008) permitiu uma representação do comportamento de onda de cheia proveniente do colapso estrutural. Adicionalmente, percebe-se que o uso da malha computacional para o modelo 2D é adequada a 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. Isto 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), 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, ele é 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 Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (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 de Mestrado. Universidade Federal de 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. Palmas: Prominer Projetos e Ambienger Engenharia Ambiental LTDA., 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: Diário Oficial da União, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.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. _____ . 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.

BRUNNER, G. W. HEC-RAS: river analysis system, user's manual. Davis: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (USACE), 2016. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx>. Acesso em: 09 de maio de 2021

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. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás; 2008. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/1318>. Acesso em: 20 de abril de 2021.

FROELICH, 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 Environment, n.

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>. Acesso em: 06 de junho de 2022.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). Earth Observation Research Center. ALOS-2 Project / PALSAR-2. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.31223/osf.io/qbrkg>. Acesso em: 14 de junho de 2022.

MANANDHAR, B. Flood plain analysis and risk assessment of Lothar Khola. Thesis of Master of Science. Tribhuvan University Institute of Forestry Pokhara; 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.1664.1289>. Acesso em: 11 maio 2022.

PSOMIADIS, E., TOMANIS, L., KAVVADIAS, A.; SOULIS, K. X.; CHARIZOPOULUS, N.; MICHAS, S. Potential dam breach analysis and flood wave risk assessment using HEC-RAS and remote sensing data: A multicriteria approach. *Water*, v. 13, n. 3, p. 1–24, 2021. <https://doi.org/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. Dam breaching modeling technology. Baton Rouge: Louisiana State University. 1996. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-015-8747-1>. Acesso em: 07 de junho de 2022.

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