

Modelagem computacional do rompimento hipotético da barragem de Jucazinho no estado de Pernambuco (Brasil)

Computer modeling of the hypothetical break of Jucazinho dam in Pernambuco state (Brazil)


- **Data de entrada:**
18/08/2019
- **Data de aprovação:**
23/12/2019

Yuri Tomaz Neves^{1*} | Arivânia Bandeira Rodrigues¹ | Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.039>

ORCID ID

Neves YT  <https://orcid.org/0000-0003-0844-2877>

Rodrigues AB  <https://orcid.org/0000-0003-0452-0006>

Cabral JJSP  <https://orcid.org/0000-0002-1348-8004>

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo simular o rompimento hipotético da barragem de Jucazinho no estado de Pernambuco (Brasil). Para o desenvolvimento do estudo, foram utilizados o modelo matemático HEC-RAS 5.0.6, imagens de perfilamento a laser e dados disponíveis da barragem. Os cenários foram simulados utilizando os tempos de formação da brecha (0,1h e 0,5h), buscando avaliar os impactos sobre as ocupações ribeirinhas das cidades Salgadinho e Limoeiro. Como resultado, foi possível obter a distribuição espacial e temporal da inundação, mapas com indicadores e índices de perigo, bem como estimar a quantidade de pessoas e domicílios que podem ser atingidos. Espera-se com esse trabalho poder contribuir com os órgãos gestores na adoção de medidas estruturais e/ou não estruturais para as cidades Salgadinho e Limoeiro, caso a barragem se rompa.

Palavras-chave: HEC-RAS. Perfilamento a laser. Mapa de perigo.

Abstract

The objective of this paper was to simulate the hypothetical break of the Jucazinho dam in Pernambuco state (Brazil). The study development used the mathematical model HEC-RAS 5.0.6, laser profiling images, and available data from the dam. Scenarios were simulated using the breach formation times of 0.1h and 0.5h, seeking to assess the impacts on riverside occupations in two cities. As a result, it was possible to obtain the spatial and temporal distribution of the flood, maps with hazard indicators and indices, in addition to estimating the number of affected population and residences. This paper aims to contribute with management bodies in the adoption of structural and/or non-structural measures for the cities of Salgadinho and Limoeiro, in case of dam breaks.

Keywords: HEC-RAS. Laser profiling. Hazard map.

¹ Universidade Federal de Pernambuco - Recife - Pernambuco - Brasil.

* **Autor correspondente:** yuutomaz@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Em projetos de barragens, diversos requisitos técnicos que dizem respeito a estabilidade, funcionalidade e durabilidade devem ser atendidos. A avaliação da segurança da barragem é tradicionalmente feita de forma determinística utilizando fatores de segurança. No entanto, a variabilidade espacial das propriedades do solo, a avaliação dos parâmetros a partir de ensaios, a estimativa das forças atuantes, as variações na geometria e a limitação de dados hidrológicos são fatores que tornam essa abordagem determinística insuficiente para atestar a segurança da estrutura (ARAUJO e SAYÃO, 2018; FUSARO et al., 2017).

Dessa forma, tais empreendimentos sempre estarão sujeitos a algum nível de risco para a ocorrência de eventos catastróficos (LADEIRA, CORREA e VILELA, 2019; FUSARO et al., 2017; MARQUES FILHO et al., 2017).

As barragens de terra são mais sensíveis ao galgamento (*overtopping*) em cheias maiores que as de projeto, quando o vertedouro não é suficiente, e a água verte sobre a crista da barragem. Nesses casos, inicia-se a erosão do talude de jusante da barragem e ocorre a consequente formação de uma brecha de forma regressiva. Os problemas de infiltração e entupimento do sistema de drenagem interno da barragem também são importantes em barragens de terra, gerando brechas que se iniciam como pontos de vazamento e crescem a partir do ponto de surgimento (*piping*). Por outro lado, as barragens de concreto são mais suscetíveis a problemas na fundação ou na estrutura, vindo a ocorrer colapsos quase instantâneos (LAURIANO, 2009).

A Tabela 1 apresenta exemplos de barragens de concreto que já romperam ao longo da história:

Tabela 1 - Exemplos de barragens de concreto que já romperam.

Nome da Barragem	Local	Ano do rompimento	Tipo de Barragem	Falha
Bayless	EUA	1910 (1911)	Gravidade	Fundação
Camará	Brasil	2004	Gravidade	Fundação
Eigiau	GB	1925	Gravidade	Fundação e Material
Elwha river	EUA	1912	Gravidade	Fundação
High Falls	EUA	1999	Gravidade	Material
Marquette no 3	EUA	2003	Gravidade	Estrutura anexa
Shih-Kang dam	Taiwan	1999	Gravidade	Fundação/Estrutura da barragem
St Francis	EUA	1928	Gravidade	Fundação
Torrejon-Tajo	Espanha	1965	Gravidade	Estrutura anexa e Material
Upriver dam	EUA	1986	Gravidade	Estrutura anexa
Warrensburg	EUA	1976	Gravidade	Estrutura anexa
Xuriguera	Espanha	1944	Gravidade	Fundação
Zerbino	Itália	1935	Gravidade	Estrutura anexa/Fundação
Ashley	EUA	1909	Contraforte	Fundação
Cascade lake dam	EUA	1982	Contraforte	Fundação/Estrutura anexa
Komoro	Japão	1928	Contraforte	Fundação
Morris Sheppard	EUA	1986	Contraforte	Fundação
Overholser	EUA	1923	Contraforte	Fundação/Estrutura anexa
Stony creek	EUA	1914	Contraforte	Fundação

Fonte: Broberg e Thorwid (2015).

O Brasil hoje conta com a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei nº 12.334/2010 (BRASIL, 2010). Um dos instrumentos dessa política é o Relatório de

Segurança de Barragens (RSB), que tem como objetivos apresentar à sociedade um panorama da evolução da segurança das barragens brasileiras, da implementação da PNSB e apontar

algumas diretrizes para a atuação de fiscalizadores e empreendedores de barragem, além de destacar os principais acontecimentos no ano.

A Fig. 1 apresenta a quantidade de acidentes e incidentes que ocorreram no período de vigência de cada RSB:

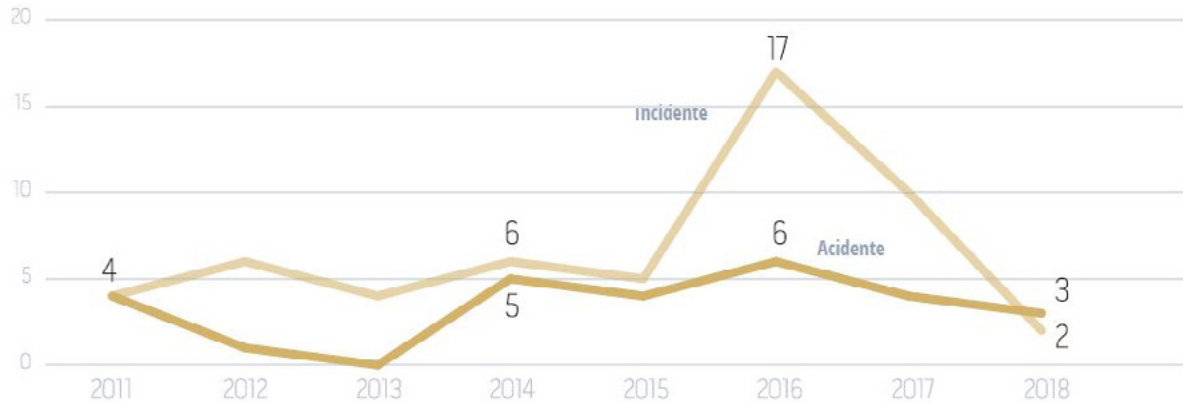


Figura 1 - Evolução do número de acidentes e incidentes.

Fonte: ANA (2019).

É importante destacar que podem ter ocorrido mais incidentes ou acidentes não reportados à Agência Nacional de Águas (ANA) e aos fiscalizadores, em virtude de se tratar de pequenas barragens e de regiões de reduzido Dano Potencial Associado.

Dentre os acidentes apresentados na Fig. 1, destaca-se, em decorrência de sua extensão e gravidade, o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana - MG, ocorrido em 05 de novembro de 2015. Esse acidente ocasionou a morte de 19 pessoas e severos danos ambientais, econômicos e sociais na bacia do Rio Doce, atingindo 35 cidades no estado de Minas Gerais e 03 no Espírito Santo (ANA, 2017).

Um acidente de grandes proporções que ocorreu recentemente foi o rompimento da barragem córrego do Feijão, em Brumadinho - MG, no dia 25 de janeiro de 2019. Após esse episódio, foram contabilizadas mais de duas centenas de mortes e alguns desaparecidos, além de significativos prejuízos socioeconômicos e ambientais (ANA, 2019).

Para com o estado de Pernambuco (Brasil), tem-se os seguintes acidentes que ocorreram desde o início do acompanhamento no âmbito do RSB:

- ANA (2013): Ocorrência de acidente com duas vítimas, em Camocim de São Félix. Trata-se do rompimento de dois barramentos de pequeno porte, do tipo barreiro, muito comum na região semiárida, mas as consequências foram agravadas pela existência de uma estrada em aterro com drenagem obstruída, a jusante das duas barragens rompidas, onde já se acumulava água. O aterro da estrada foi galgado pela onda de cheia formada com a soma dos três volumes, atingindo a elevatória da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) e as residências das duas vítimas;
- ANA (2015): Rompimento da ombreira esquerda da barragem da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Pedra Furada com esvaziamento do lago, de forma gradativa e lenta, acarretando a interrupção da operação em teste das unidades geradoras;
- ANA (2018): As barragens Cacimba Nova e Barreiros romperam alguns dias após o primeiro enchimento, em época de seca, demonstrando que se deve ter muito cuidado nessa fase da vida das barragens. A causa provável para as duas barragens foi percolação pela fundação. Felizmente

não foram reportadas vítimas fatais decorrentes desses acidentes, apenas alguns danos materiais (não quantificados, mas de pequena monta).

Além dos acidentes supracitados, ocorreu um incidente na barragem de Jucazinho, onde foi identificada a presença de fissuras na barragem. Essa barragem apresenta Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA) altos. O CRI alto significa maior número de ameaças à segurança da barragem, e o DPA alto indica que, em caso de um acidente, as consequências seriam graves (ANA, 2017).

Nos RSBs 2017 e 2018, verificou-se que a barragem de Jucazinho continuou preocupando o seu órgão fiscalizador, que é a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). Nesses relatórios foram identificados problemas nos vertedouros laterais, nas ombreiras e na bacia de dissipação (ANA, 2018; ANA, 2019).

Um projeto de recuperação foi iniciado para a barragem de Jucazinho, e espera-se que após a sua conclusão, a probabilidade de que ocorra um acidente seja muito pequena. No entanto, diante do que foi apresentado, é extremamente importante analisar a hipótese de seu rompimento. A modelagem computacional é uma ótima alternativa para descrever e estudar esse processo, pois permite determinar a variação temporal e espacial da onda de inundação, bem como desenvolver mapas com indicadores e índices de perigo. Esses recursos fornecem subsídios de antecipação nos esforços para evacuar pessoas e propriedades.

2 OBJETIVO

Conhecer a dinâmica e criar condições técnicas que possam servir de suporte à tomada de decisões para o cenário de rompimento hipotético da barragem de Jucazinho.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa, primeiramente realizou-se uma caracterização da barragem de Jucazinho. Em seguida, utilizando-se as informações da barragem com o Modelo Digital do Terreno (MDT) foram simulados os cenários de ruptura hipotética da barragem no modelo matemático HEC-RAS 5.0.6.

A seguir, serão apresentadas informações mais detalhadas sobre a barragem de Jucazinho, o modelo matemático e o MDT utilizado, bem como os cenários simulados.

3.1 Barragem de Jucazinho

A barragem de Jucazinho pertence à bacia do rio Capibaribe e está localizada em terras dos municípios de Surubim e Cumaru, no agreste do estado de Pernambuco, a uma distância de aproximadamente 137 km da cidade do Recife.

A barragem foi construída entre os anos de 1996 e 1998, em Concreto Compactado a Rolo (CCR), por meio de contrato firmado com a Rodoférrea Construtora de Obras Ltda e concluída em 1998 pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS).

Os principais objetivos que justificaram na época a construção dessa barragem são apresentados a seguir:

- Abastecimento das cidades de Caruaru, Bezerros, Gravatá, Riacho das Almas, Surubim, Vertente do Lério, Frei Miguelinho, Passira, Vertentes, Casinhas, Santa Maria do Cambucá, Salgadinho, Taquaritinga do Norte, João Alfredo e povoados de Capivara, Couro D'Antas, Trapiá, Chéus, Tambor e outras localidades a serem identificadas ao longo do desenvolvimento da adução, beneficiando uma população em torno de 780.000 habitantes;
- Controle de enchentes do Capibaribe, com a finalidade de preservar as cidades a jusante;

- Irrigação de cerca de 6.750 ha ao longo do rio com a geração de 4.000 empregos diretos e 8.000 indiretos, beneficiando uma população de cerca de 24.000 habitantes;
- Piscicultura com produção de cerca de 500 toneladas de pescado por ano, beneficiando cerca de 300 famílias, e gerando alimentos para 2.800 pessoas/dia;
- Perenização do leito do rio a jusante da barragem, garantindo o desenvolvimento da pecuária e da agricultura.

O sistema hidrográfico da bacia, a montante da barragem, tem uma área de 4.772 km² e é formado pelo rio Capibaribe (alto Capibaribe) e seus afluentes, todos com regime torrencial temporário.

A barragem é do tipo gravidade e o seu maciço é constituído por 84% de concreto compactado com rolo e 16% de concreto convencional, aproximadamente. Possui 63,2 m de altura máxima, extensão pelo coroamento de 442,0 m, com crista na cota 299,0 m e soleira do extravasor central na cota 292,0 m. Em seu topo existe uma ponte com largura de 8 m, e a sua estrutura incorpora um sangradouro central, dois sangradouros laterais e uma galeria, embutida no maciço da barragem.

O sangradouro central tem um comprimento de 170 m e a sua soleira está na cota 292 m, sendo prevista uma lâmina máxima d'água de 6 m (chegando a atingir a cota 298 m) com uma vazão máxima de 5.446,69 m³/s. Esse sangradouro possui uma geratriz do tipo ogiva, escalonada segundo escadas de espelhos variáveis, sendo considerado do tipo stepped spillway.

Os sangradouros laterais possuem um comprimento de 57 m e as suas soleiras estão na cota 295 m, sendo prevista uma lâmina máxima d'água de 3 m (chegando a atingir a cota 298 m) com uma vazão máxima de 1.291,3 m³/s. Esses sangradouros estão instalados nas ombreiras da barragem.

A galeria está na cota 250 m e possui diâmetro de 2 m, que é reduzido para 1,5 m na extremidade de jusante. A sua vazão é de 2,72 m³/s.

A Fig. 2 apresenta a barragem de Jucazinho e a Fig. 3 apresenta a nova curva Cota x Volume da barragem de Jucazinho extrapolada até a cota 300 m, cujos dados até a cota 292 foram obtidos em APAC (2019) e os demais obtidos por meio de técnicas de geoprocessamento:



Figura 2 - Barragem de Jucazinho.

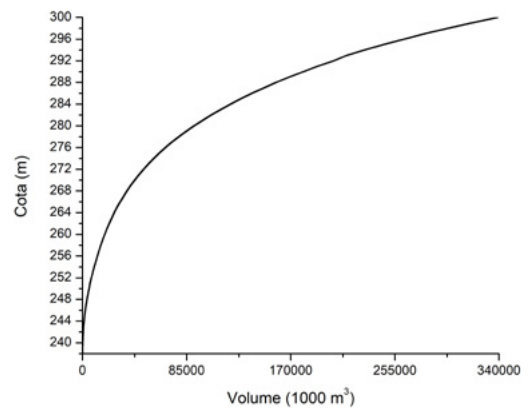


Figura 3 - Curva Cota x Volume da barragem de Jucazinho.

Fonte: Adaptada de APAC (2019).

Foi analisado o impacto do rompimento sobre as ocupações ribeirinhas das cidades Salgadinho e Limoeiro. Salgadinho possui uma área de 87,217 km²

e 9.312 habitantes. Já Limoeiro possui uma área de 273,739 km² e 55.439 habitantes (IBGE, 2010). Na

Fig. 4, tem-se a localização da barragem e das cidades Salgadinho e Limoeiro:

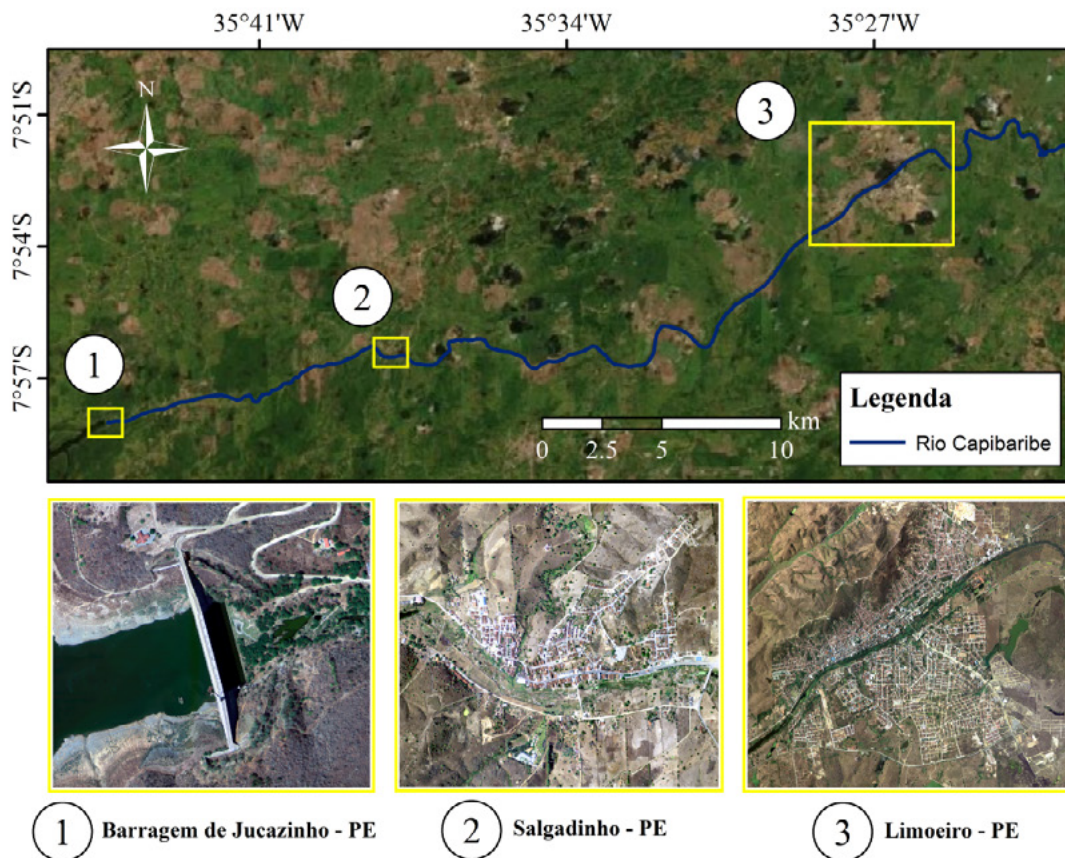


Figura 4 - Localização da barragem de Jucazinho e dos municípios de Salgadinho e Limoeiro.

3.2 Modelo matemático

O HEC-RAS 5.0.6 foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América “US Army Corps of Engineers”. O termo HEC significa “Hydrologic Engineering Center” e o termo RAS significa “River Analysis System”. Atualmente o modelo realiza cálculos hidráulicos em 1D, 2D e acoplado 1D/2D, com regime de escoamento permanente, quase não permanente e não permanente. O modelo também permite analisar a qualidade da água e o transporte de sedimentos e avaliar o efeito de estações de bombeamento e de estruturas transversais e/ou laterais ao fluxo, como açudes, barragens, ver-

tedouros, comportas, diques, pontes e bueiros (USACE, 2016a).

De acordo com USACE (2016c), ao modelar situações como o galgamento e/ou rompimento de um dique, bem como planícies de inundação muito largas e planas, em que a água pode escoar em várias direções, recomenda-se utilizar uma abordagem bidimensional. Além disso, USACE (2016c) afirma que na modelagem de eventos que são muito dinâmicos em relação ao tempo (sistemas fluviais nos quais o pico do fluxo é atingido rapidamente, permanece alto por um tempo muito curto e depois recua rapidamente) deve-se optar pelo o regi-

me de escoamento não permanente. Com base nisso, decidiu-se desenvolver o modelo utilizando simulação bidimensional em regime não permanente.

Na simulação bidimensional em regime não permanente, o modelo utiliza as equações bidimensionais de Águas Rasas (também chamadas de equações bidimensionais de Saint-Venant) ou as equações da Onda Difusa. A discretização das equações da Onda Difusa é realizada utilizando o método das diferenças finitas para o tempo e um esquema híbrido combinando os métodos das diferenças finitas e dos volumes finitos para a discretização do espaço. Em relação às equações bidimensionais de Águas Rasas, utiliza-se o método dos volumes finitos na equação da continuidade e uma discretização que varia conforme o termo da equação da quantidade de movimento (USACE, 2016b).

A modelagem foi realizada utilizando as equações de Águas Rasas. De acordo com USACE (2016a), na modelagem bidimensional do rompimento de barragens, deve-se utilizar as equações de Águas Rasas, pois elas conseguem representar, com precisão, a geração de ondas de inundação altamente dinâmicas. Ao contrário das equações da Onda Difusa, as equações de Águas Rasas incluem dois termos que são extremamente importantes para modelar esse tipo de onda de inundação, que são: aceleração local (mudanças na velocidade em relação ao tempo) e aceleração convectiva (mudanças na velocidade em relação à distância).

As equações de Águas Rasas em duas dimensões são apresentadas a seguir, sendo a Eq. 1 a da continuidade e as Eq. 2 e 3 as da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \quad (3)$$

Onde: t - tempo [T]; x e y - direções cartesianas [L]; H - elevação da superfície da água (elevação da superfície do terreno mais a altura da lâmina de água) [L]; u e v - componentes da velocidade nas direções x e y, respectivamente [LT⁻¹]; h - altura da lâmina de água [L]; q - fluxo de entrada/saída [L³T⁻¹]; g - aceleração da gravidade [LT⁻²]; f - parâmetro de Coriolis [T⁻¹]; v_t - coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal [L²T⁻¹]; e c_f - coeficiente de atrito do fundo [T⁻¹].

3.3 Modelo digital do terreno

O Modelo Digital do Terreno (MDT) utilizado foi obtido por meio da técnica de perfilamento a laser, também conhecida como “Light Detection and Ranging (LIDAR)”.

Trata-se de uma técnica que permite a obtenção de informações altimétricas da superfície terrestre com alta precisão. O princípio básico do sistema de varredura a laser consiste na utilização de um feixe de laser que é emitido, com o auxílio de um espelho de varredura, em direção aos objetos. Esse feixe é refletido ao atingir a superfície dos objetos, retornando um eco ao sistema. Esse sistema é então encarregado de registrar o tempo decorrido entre a emissão e a captação do eco, permitindo a obtenção da distância entre o sensor e o objeto (GALVANIN e POZ, 2013).

O MDT utilizado na pesquisa foi obtido no programa Pernambuco Tridimensional (PE3D). O PE3D é um programa que foi iniciado em 2014 pela Secretária de Infraestrutura (SEINFRA) e que, por meio de sensores e câmeras instalados

em oito aviões, teve como objetivo o recobrimento de todo o território do estado de Pernambuco utilizando aerofotogrametria e perfilamento a laser (CIRILO et al., 2014).

No que se refere aos dados técnicos, foram utilizadas imagens na escala 1:5000, com resolução espacial de 1m e precisão altimétrica de 25cm. A precisão altimétrica teve como referência o MAPGEO 2010. Vale a ressalva de que esses dados laser incluem o nível d'água no rio, que no reservatório estava na cota de aproximadamente 250 m. Por esse motivo, foi realizada a correção do MDT ajustando a cota no reservatório para 238 m (cota do fundo do lago).

3.4 Características do rompimento hipotético

O hidrograma de ruptura foi gerado no próprio HEC-RAS 5.0.6, e foi considerada como causa do rompimento a falha estrutural da barragem quando submetida ao galgamento com uma lâmina d'água na cota 300 m (1 m acima da crista da barragem) gerada no paramento de montante.

A brecha de ruptura é uma característica extremamente importante no estudo. De acordo com USA-CE (2014), os valores dos parâmetros da brecha para barragens de concreto variam muito e limitam-se a intervalos simples. A Tabela 2 apresenta a faixa de valores possíveis para características da brecha de barragens de concreto do tipo gravidade:

Tabela 2 - Faixas de valores possíveis para as características da brecha de uma barragem de concreto do tipo gravidade.

Comprimento da brecha	Componente horizontal da inclinação lateral da brecha - H:V	Tempo para a brecha se formar completamente (h)	Fonte
Blocos Monolíticos	0	0,1 a 0,5	USACE (1980)
≤ 0,5L	0	0,1 a 0,3	FERC (1988)
< 0,5L	0	Entre 0,1 e 0,3	ELETROBRÁS (2003)
≤ 0,5L	0	0,1 a 0,2	Fread (2006)
Blocos Monolíticos	0	0,1 a 0,5	USACE (2007)

Nota: L - comprimento da crista da barragem.

Em barragens de concreto do tipo gravidade, geralmente o rompimento ocorre parcialmente, diferentemente das barragens de concreto em arco, em que a tendência é que ocorra o colapso completo. Ao consultar a Tabela 2 verifica-se que USACE (1980) e USACE (2007) não limitam a quantidade de blocos e que a maioria das fontes estabelece um limiar de 0,5L. Assim sendo, foi considerado um comprimento da brecha igual a 0,5L, pois se trata da pior situação em caso de uma possível ruptura.

Para o tempo de formação da brecha, foram simulados dois cenários, buscando-se avaliar a influência do menor e do maior tempo dentre as diversas fontes da Tabela 2. Os valores utilizados

foram: 0,1h e 0,5h. Nas simulações, considerou-se uma progressão linear da brecha.

A malha utilizada para representação espacial do vale a jusante da barragem possui 161795 células de 50 x 50 m e o coeficiente de rugosidade de Manning foi estimado em 0,03, baseando-se nas características da área de estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado inicial, foi analisada a distribuição espacial da inundação nas cidades de Salgado e Limoeiro. Observou-se que os tempos de formação da brecha resultaram em cenários

semelhantes, não tendo muita influência na distribuição espacial da mancha de inundação.

No tocante ao perigo ocasionado pelo rompimento da barragem, foram analisados os indicadores velocidade e profundidade da água, utilizando os limiares propostos por Ribeiro Neto, Batista e Coutinho (2016). Como resultado, verificou-se que praticamente toda a área atingida nas duas cidades apresentou perigo alto para o indicador profundidade da água. No que se refe-

re ao indicador velocidade da água, observou-se predominância de perigo alto, com alguns locais variando o perigo de baixo a médio. De acordo com Wright (2008), inundações com profundidade da água maior que 0,60 m ou velocidade de fluxo acima de 1,2 m/s representam perigo definitivo para as pessoas. Nas Fig. 5 e 6 é possível observar a extensão das manchas de inundação, bem como os resultados dos indicadores velocidade e profundidade da água para os tempos de brecha 0,1h e 0,5h:

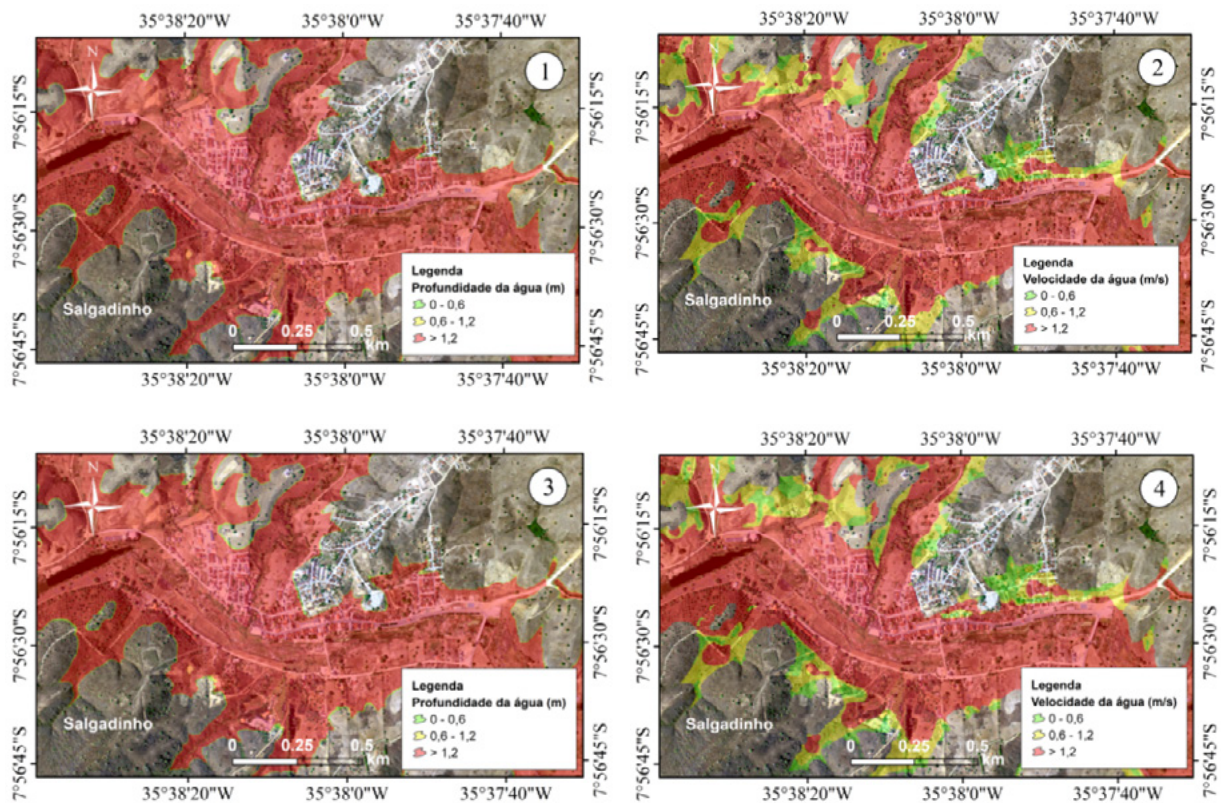


Figura 5 - Indicadores de perigo para Salgadinho: (1) profundidade da água com brecha 0,1h; (2) velocidade da água com brecha 0,1h; (3) profundidade da água com brecha 0,5h; (4) velocidade da água com brecha 0,5h.

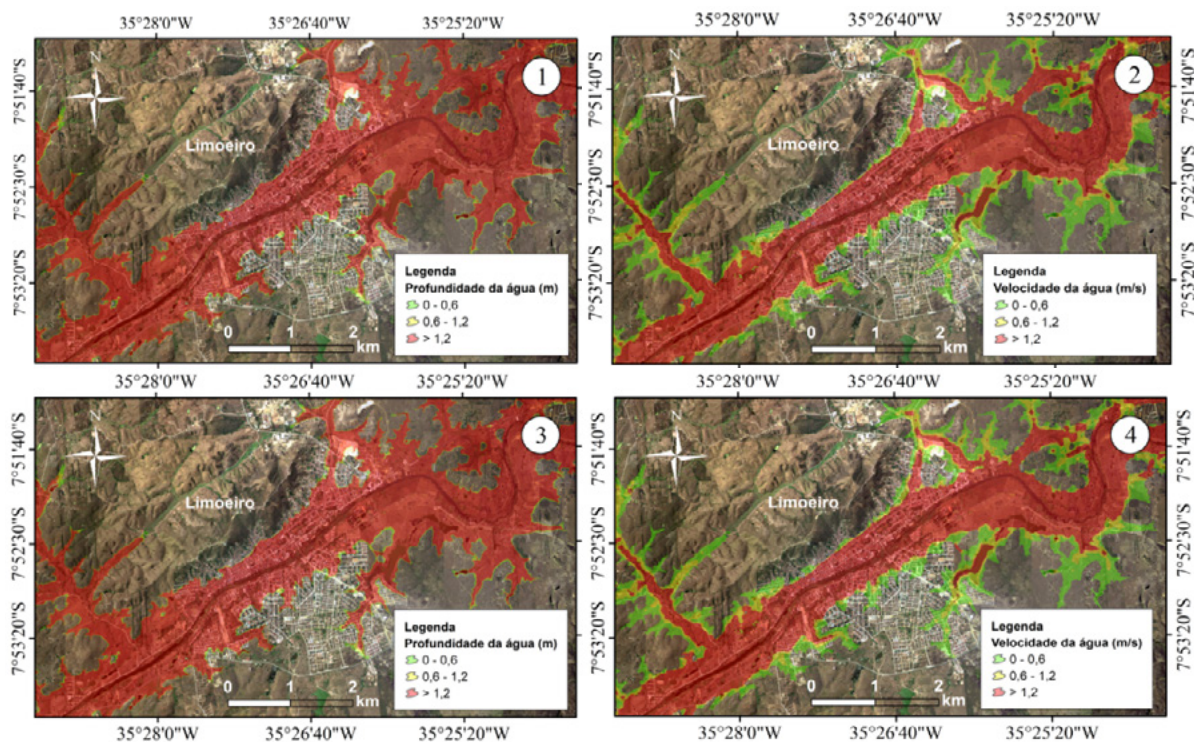


Figura 6 - Indicadores de perigo para Limoeiro: (1) profundidade da água com brecha 0,1h; (2) velocidade da água com brecha 0,1h; (3) profundidade da água com brecha 0,5h; (4) velocidade da água com brecha 0,5h.

Além dos indicadores de perigo, foram gerados mapas com os índices de perigo utilizando a metodologia proposta por Stephenson (2002), que utiliza o índice de perigo obtido pelo produto entre a velocidade e a profundidade da água. De acordo com Stephenson (2002), valores menores

que $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ representam danos às propriedades, veículos inseguros e possibilidade de autoajuda; valores maiores ou iguais a $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ e menores que $1 \text{ m}^2/\text{s}$ representam perigo para as pessoas; e valores maiores ou iguais a $1 \text{ m}^2/\text{s}$ incluem danos estruturais e erosão. As Fig. 7 e 8 apresentam os mapas de perigo para a cidade de Salgadoinho:

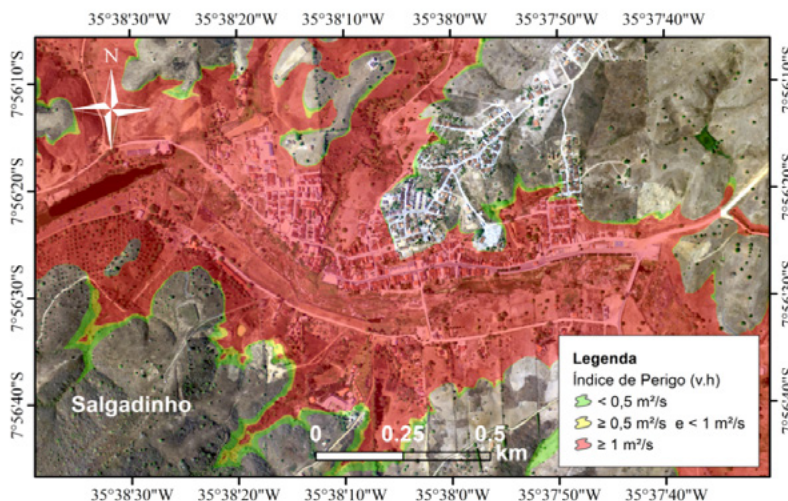


Figura 7 - Mapa de perigo para a cidade de Salgadoinho com o tempo de formação da brecha 0,1h.

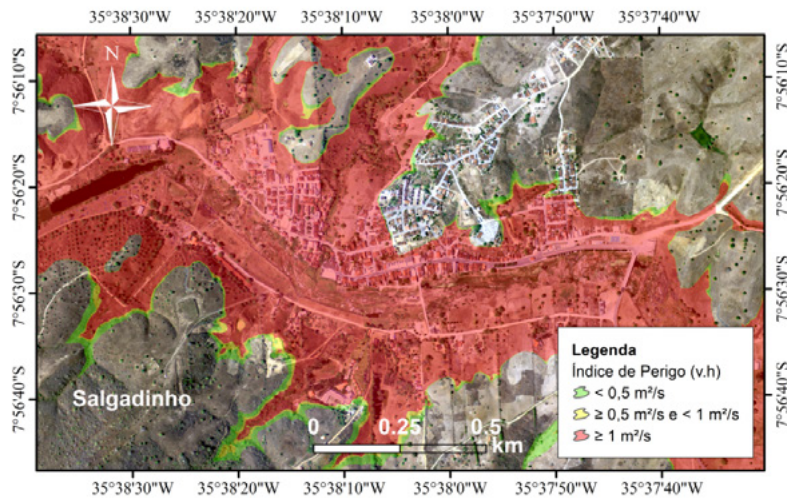


Figura 8 - Mapa de perigo para a cidade de Salgadoinho com o tempo de formação da brecha 0,5h.

Ao analisar as Fig. 7 e 8, verifica-se que praticamente toda a área atingida pela inundação possui o índice de perigo maior ou igual a 1m²/s, indicando os piores danos. Além disso, verifica-se que o tempo de formação da brecha tem pouca influência nas áreas atingidas. Utilizando dados por setor censitário do censo de 2010 disponível

em IBGE (2010), verifica-se que a inundação tem o potencial de atingir aproximadamente 602 domicílios particulares e coletivos, e aproximadamente 2103 pessoas residentes no município de Salgadoinho, o que corresponde a 22,6% da população total. As Fig. 9 e 10 apresentam os mapas de perigo para a cidade de Limoeiro:

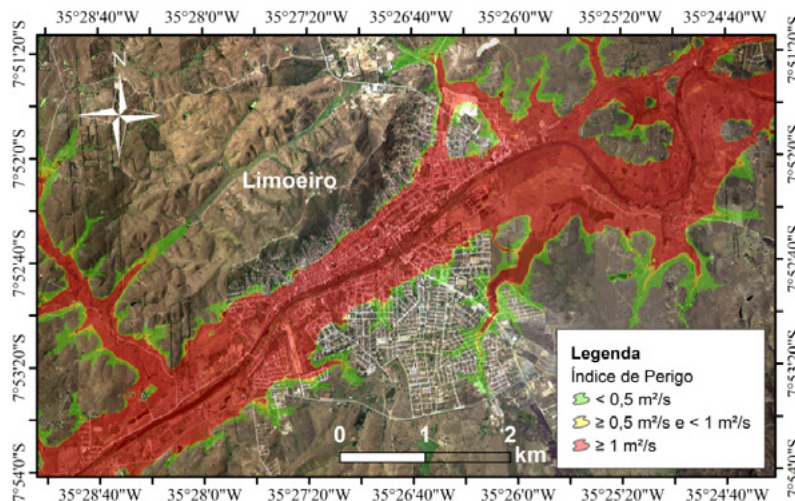


Figura 9 - Mapa de perigo para a cidade de Limoeiro com o tempo de formação da brecha 0,1h.

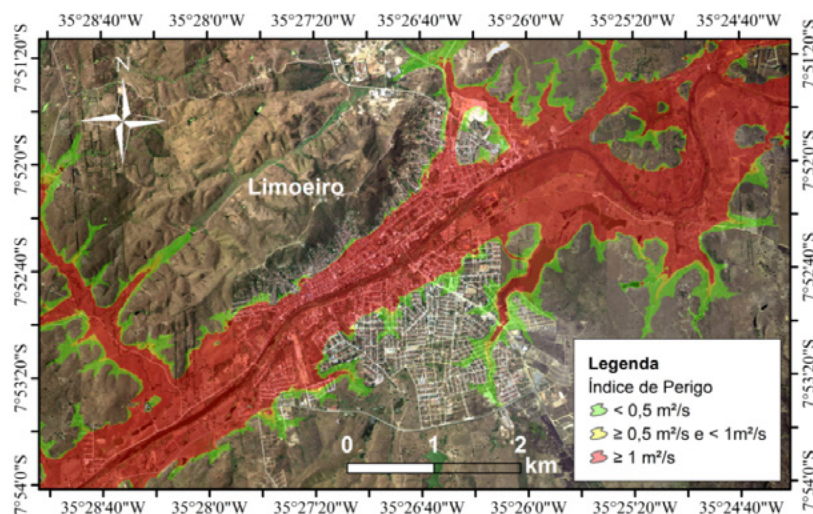


Figura 10 - Mapa de perigo para a cidade de Limoeiro com o tempo de formação da brecha 0,5h.

Os resultados apresentados nas Fig. 9 e 10 são semelhantes aos obtidos para a cidade de Salgado, ou seja: valor predominante do índice de perigo $\geq 1 \text{ m}^2/\text{s}$ (pior situação) e pouca influência do tempo de formação da brecha. Utilizando dados por setor censitário do censo de 2010 disponível em IBGE (2010), verifica-se que a inundação tem o potencial de atingir aproximadamente 9378 domicílios particulares e coletivos, e aproximadamente 29138 pessoas residentes no município de Limoeiro, o que corresponde a 52,6% da população total.

Vale a ressalva de que os mapas estão em escalas diferentes. Também é importante observar que os dados do censo são de 2010 (censo demográfico mais recente), indicando que mais pessoas e domicílios podem ser atingidos.

Uma outra análise importante realizada foi a variação temporal da inundação. Com base nessa

informação, os órgãos gestores conseguem tomar boas decisões, como definir áreas prioritárias de atuação. Para a cidade de Salgado (localizada a aproximadamente 12 km da barragem de Jucazinho), a onda de inundação atinge em 22 minutos e 30 minutos para os tempos de formação da brecha de 0,1h e 0,5h, respectivamente. Já para a cidade de Limoeiro (localizada a aproximadamente 37 km da barragem de Jucazinho), a onda de inundação atinge em 1:42h e 1:52h para os tempos de formação da brecha de 0,1h e 0,5h, respectivamente.

Além do tempo de chegada da onda de inundação nas cidades, também foram selecionados três locais de referência distribuídos em cada cidade para analisar a variação temporal da profundidade e velocidade da água. As Fig. 11 e 12 apresentam os pontos analisados nas cidades de Salgado e Limoeiro, respectivamente:

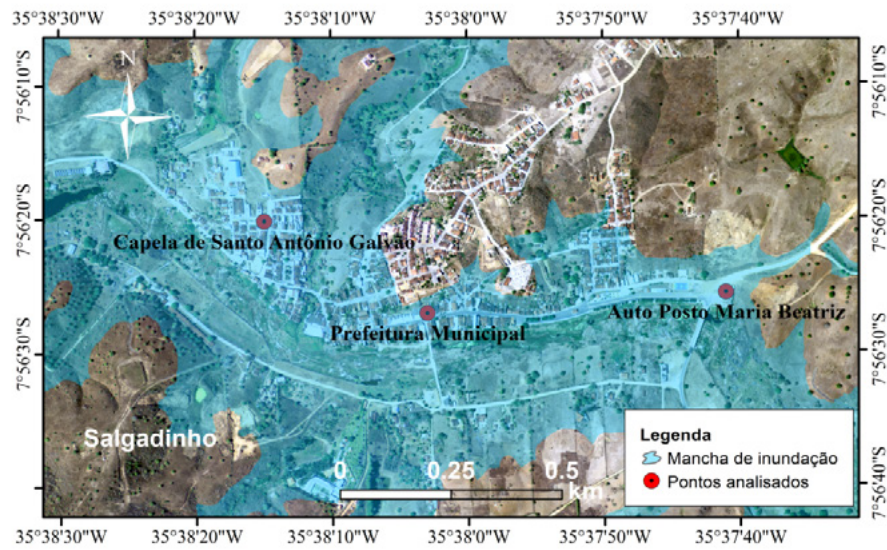


Figura 11 - Pontos analisados em Salgado do.

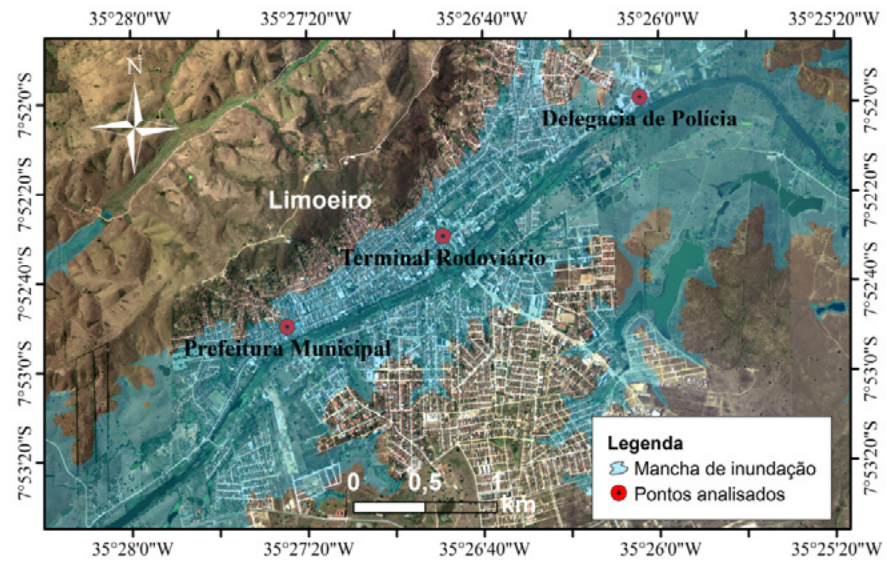


Figura 12 - Pontos analisados em Limoeiro.

A Fig. 13 apresenta gráficos com a variação da profundidade e velocidade da água para os tempos de brecha (T_b) nos pontos analisados dos dois municípios:

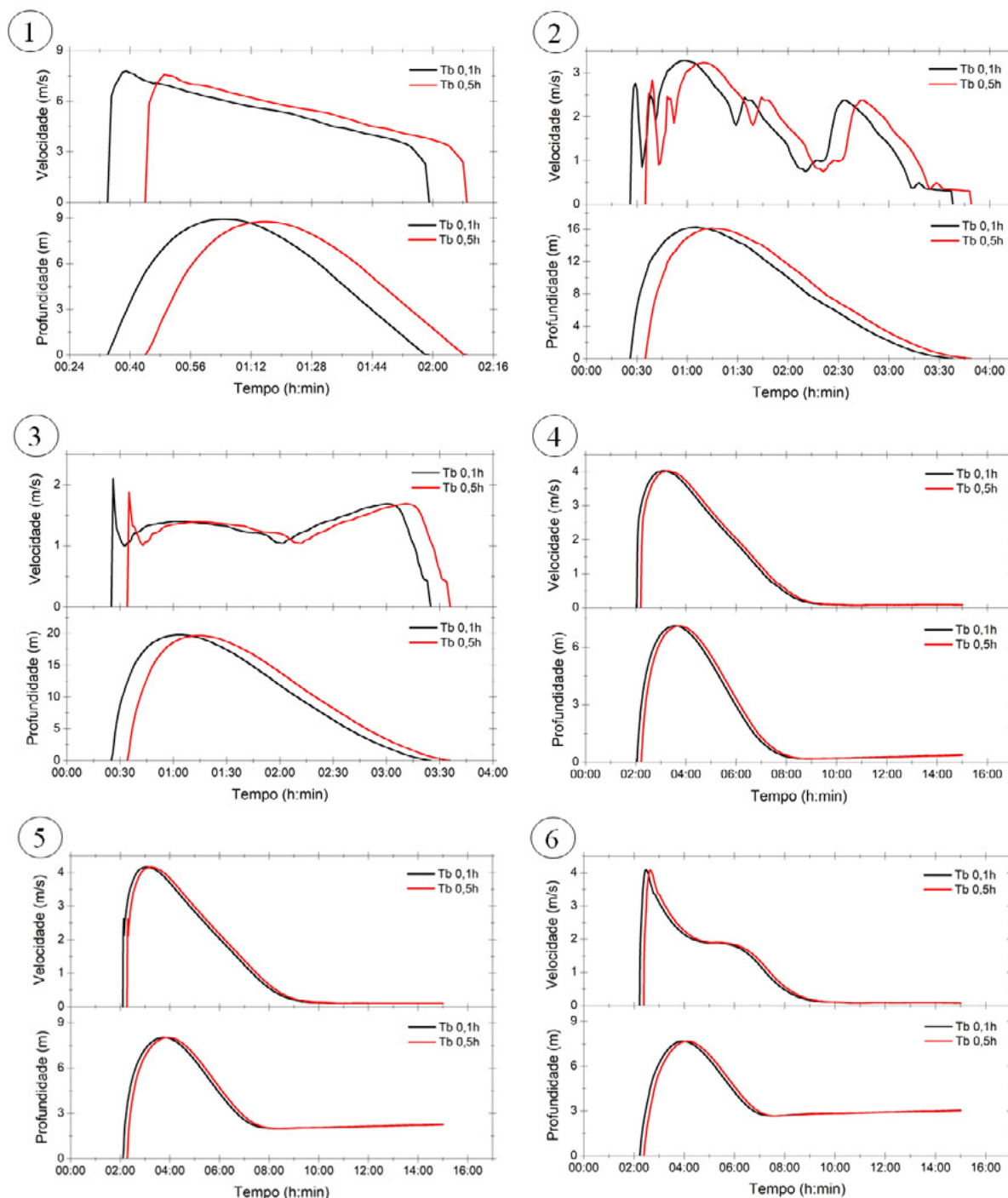


Figura 13 - Variação temporal da inundação: (1) Capela de Santo Antônio Galvão (Salgadinho); (2) Prefeitura Municipal (Salgadinho); (3) Auto Posto Maria Beatriz (Salgadinho); (4) Prefeitura Municipal (Limoeiro); (5) Terminal Rodoviário (Limoeiro); (6) Delegacia de Polícia (Limoeiro).

Ao se analisar a Fig. 13, verifica-se que os locais em que ocorreu a maior velocidade (~7,8m/s), profundidade (~19,8m) e duração da inundação (~3h e 14min) em Salgadinho foram Capela de

Santo Antônio Galvão, Auto Posto Maria Beatriz e a Prefeitura Municipal, respectivamente. Já para a cidade de Limoeiro, verifica-se que o local em que ocorreu a maior velocidade (~4,2m/s) e pro-

fundidade (~8m) foi o Terminal Rodoviário, com valores próximos aos observados tanto na Prefeitura Municipal como na Delegacia de Polícia de Limoeiro, o que não ocorre na cidade de Salgadinho, onde os locais analisados apresentam diferenças significativas. Em relação à duração da inundação nos pontos analisados de Limoeiro, não se pode afirmar, com certeza, o seu valor, pois como a análise se limitou até Limoeiro, não se sabe o comportamento da onda de inundação a partir daí, o que ocasionou a permanência de uma lâmina de água nos três locais. Também é possível observar que em todos os pontos analisados, tanto em Salgadinho como em Limoeiro, o tempo de formação da brecha (Tb) pouco influencia a variação temporal da velocidade e da profundidade da água.

5 CONCLUSÕES

A partir do apresentado é possível inferir que:

- Ao considerar os tempos de formação da brecha de 0,1h e 0,5h, só foi possível observar alteração praticamente no tempo de chegada da onda de inundação (diferença de 8 minutos para Salgadinho e 10 minutos para Limoeiro), sendo a variação temporal e espacial da velocidade e da profundidade da água durante o evento pouco influenciadas;
- Os indicadores e índice de perigo analisados apresentaram valores predominantemente altos, indicando que grande parte da área atingida, sofrerá os piores danos;
- A inundação tem o potencial de atingir 602 domicílios particulares e coletivos, e 2103 pessoas residentes no município de Salgadinho, bem como, 9378 domicílios particulares e coletivos, e 29138 pessoas residentes no município de Limoeiro;
- Ao longo do município de Salgadinho ocorreram grandes variações nos valores de profundidade, velocidade e duração da inundação, diferentemente do município de Limoeiro, onde

esses valores não se distanciaram muito nos três pontos analisados.

O estudo se concentrou em analisar apenas as cidades de Limoeiro e Salgadinho; no entanto, vale a ressalva de que existe a cidade de Passira e as comunidades Chéus, Malhadinha, Poço do Pau, Ribeiro do Mel, Aparas, Candiais, Tamanduá e Pedra Tapada, também atingidas pela inundação. A comunidade Chéus está localizada em Surubim, exatamente a jusante da barragem de Jucazinho, e é atingida em poucos minutos, dificultando ainda mais a evacuação.

Espera-se com esse trabalho poder contribuir com os órgãos gestores na adoção de medidas estruturais e/ou não estruturais para as cidades de Salgadinho e Limoeiro, tendo em vista que, na ocorrência de uma possível ruptura, diversos serão os impactos sociais, econômicos e ambientais.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Desenvolvimento do modelo computacional: Neves YT; **Levantamento bibliográfico e Redação do manuscrito:** Neves YT e Rodrigues AB; **Análise dos resultados:** Neves YT, Rodrigues AB e Cabral JJSP; **Revisão do manuscrito:** Cabral JJSP.

7 REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório de segurança de barragens 2011**. Brasília, DF: ANA, 2013. 95 p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório de segurança de barragens 2014**. Brasília, DF: ANA, 2015. 156 p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório de segurança de barragens 2016**. Brasília, DF: ANA, 2017. 225 p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório de segurança de barragens 2017**. Brasília, DF: ANA, 2018. 81 p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório de segurança de barragens 2018**. Brasília, DF: ANA, 2019. 103 p.
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Ficha técnica com cota volume**. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br>. Acesso em: 17 ago. 2019.

ARAUJO, M. B.; SAYÃO, A. S. F. J. Análise probabilística da estabilidade da barragem de Santa Branca. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, [s.l.], v. 6, p.6-12, jul. 2018.

BRASIL. **Lei nº 12.334, 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, DF: Presidência da República, [2010]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 17 ago. 2019.

BROBERG, L.; THORWID, M. **Evaluation of failure modes for concrete dams**. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado em Concrete Structures) - Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Estocolmo, 2015.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de informações georreferenciadas de alta resolução para implantação de infraestrutura e planejamento territorial. 2014. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s.l.], v. 07, n. 04, p.755-763.

ELETOBRÁS. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. Rio de Janeiro: ELETOBRÁS, 2003. 279 p.

FERC. Federal Energy Regulatory Commission. **Notice of revised emergency action plan guidelines**. Washington: FERC, 1988. 31p.

FREAD, D. L. ASDSO Advanced Technical Seminar, **Dam failure analysis**. 2006.

FUSARO, T. C.; FURTADO, A. S. O.; OLIVEIRA, V. R. F.; SILVA, I. T. C. Estruturação do manual de monitoramento como ferramenta para a segurança de barragens. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, [s.l.], v. 5, p.15-21, dez. 2017.

GALVANIN, E. A. S.; POZ, A. P. D. **Sistema lidar e métodos de interpolação de dados**. 2013. Revista de Geografia (UFPE), [s.l.], v. 30, n. 01, p.91-102.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico**. 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao>. Acesso em: 17 ago. 2019.

LAURIANO, A. W. **Estudo de ruptura da barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS**. 2009. 193 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

LADEIRA, J. E. R.; CORREA, K. I.; VILELA, L. R. O. Avaliação de risco em barragem de rejeitos de mineração: um estudo de caso. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, [s.l.], v. 8, p.10-16, dez. 2019.

MARQUES FILHO, J.; GODKE, B.; MARQUES, J. L. S.; CAMPOS, H. F. Segurança de barragens de concreto: monitoramento alternativo de fissuração térmica. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, [s.l.], v. 5, p.22-27, dez. 2017.

RIBEIRO NETO, A.; BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. Q. Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 21, n. 2, p.377-390, abr. 2016. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p377-390>

STEPHENSON, D. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. **Urban Water**, [s.l.], v. 4, n. 4, p.423-428, dez. 2002. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(02\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(02)00032-8)

USACE. United States Army Corps of Engineers. **HEC-RAS river analysis system: user's manual, version 5.0**. Davis: USACE, 2016a. 962 p.

USACE. United States Army Corps of Engineers. **HEC-RAS river analysis system: hydraulic reference manual, version 5.0**. Davis: USACE, 2016b. 547 p.

USACE. United States Army Corps of Engineers. **HEC-RAS river analysis system: 2D modeling user's manual, version 5.0**. Davis: USACE, 2016c. 171 p.

USACE. United States Army Corps of Engineers. **Using HEC-RAS for dam break studies**. Davis: USACE, 2014. 74 p.

USACE. United States Army Corps of Engineers. **Risk assessment for dam safety: dam failure analysis toolbox**. Davis: USACE, 2007.

USACE. United States Army Corps of Engineers. **Flood emergency plans: guidelines for corps dams**. Davis: USACE, 1980. 62 p.

WRIGHT, J. M. **Floodplain management: principles and current practices**. Knoxville: The University of Tennessee, 2008.