

MAPEAMENTO DE ÍNDICE DE RISCO DE INUNDAÇÃO DE ÁREA A JUSANTE DE UMA BARRAGEM EM CASO DE ROMPIMENTO

<https://doi.org/10.4215/rm2023.e22004>

Alves Junior, F. M. ^{a*} - Kobiyama, M. ^b - Corseuil, C.W ^c

(a) Mestre em Energia e Sustentabilidade.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7120-8392>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/9817331786466359>.

(b) Doutor em Engenharia Florestal.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0615-9867>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/7494734600375087>.

(c) Doutor em Agronomia.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1458-2454>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/0099824083924145>.

Article history:

Received 29 July, 2021
Accepted 26 October, 2022
Published 30 February, 2023

(*) CORRESPONDING AUTHOR

Address: Rua Doutor José de Patta, 495, Apartment 201, Criciúma (SC), Brasil, CEP: 88802-240. Tel: (+55 48) 99914-0138.

E-mail: franciscomoreiraalves@hotmail.com

Resumo

Objetivou-se avaliar o índice de risco de inundação, devido ao rompimento hipotético da barragem de São Bento (SC). O índice de risco foi obtido combinando os índices de perigo e de vulnerabilidade. O perigo obteve-se multiplicando a velocidade pela profundidade da água, simuladas com HEC-RAS 2D. A mancha de inundação simulada foi de 64,8 km², a vazão máxima de 3586,60 m³.s⁻¹, profundidade de até 2,0 m e velocidade de até 2,0 m.s⁻¹, na maior parte da área. A formação da brecha aconteceu em 2,85 h e o pico de vazão ocorreu em 1h40 min. O volume extravasado no rompimento foi de 44,75 hm³. A onda de cheia atingiu 22,0 km de extensão onde fica o município de Forquilha. O mapa de índice de risco mostrou que até 6 km da barragem o risco é alto, devido a maioria das pessoas terem 60 anos ou mais e serem de baixa renda. Nesse local, as pessoas não estão seguras dentro das edificações, porque têm alta probabilidade de serem destruídas. Assim, o mapeamento de risco pode ser adotado como medida de prevenção, auxiliar na elaboração de um plano de ação emergencial, servir para educação ambiental e para o planejamento territorial.

Palavras-chave: Rompimento de Barragem; HEC-RAS 2D; Mapeamento de Risco.

Abstract / Resumen

FLOOD RISK INDEX MAPPING OF AN AREA DOWNSTREAM OF A DAM IN CASE OF A BREAK

We aimed to evaluate the flood risk index due to the hypothetical break of the São Bento dam (SC, Brazil). The risk index was obtained by combining the hazard and vulnerability indices. The hazard index was obtained by multiplying the velocity by the depth of the water, simulated with HEC-RAS 2D. The simulated flood extent was 64.8 km², with a maximum flow of 3586.60 m³.s⁻¹, a depth of up to 2.0 m, and a velocity of up to 2.0 m.s⁻¹ in most of the area. The formation of the breach occurred in 2.85 h, and the peak flow occurred at 1.67 h. The volume that overflowed with the break was 44.75 hm³. The flood wave reached 22.0 km in length, where the municipality of Forquilha is located. The risk index map showed that the risk is high up to 6 km from the dam since most people were at least 60 years old and had low incomes. In this location, the people were not safe inside buildings because they had a high probability of being destroyed. Thus, risk mapping may be adopted as a preventive measure to assist in preparing an emergency action plan and serve for environmental education and territorial planning.

Keywords: Dam Break; HEC-RAS 2D; Risk Mapping.

MAPEO DEL ÍNDICE DE RIESGO DE INUNDACIÓN DE UN ÁREA AGUAS ABAJO DE UNA PRESA EN CASO DE FALLA

El objetivo fue evaluar el índice de riesgo de inundación, debido a la hipotética ruptura de la represa de São Bento (SC). El índice de riesgo se obtuvo combinando los índices de peligrosidad y vulnerabilidad. El peligro se obtuvo multiplicando la velocidad por la profundidad del agua, simulada con HEC-RAS 2D. El punto de inundación simulado fue de 64,8 km², el caudal máximo fue de 3586,60 m³.s⁻¹, profundidad de hasta 2,0 m y velocidad de hasta 2,0 m.s⁻¹, en la mayor parte del área. La brecha se produjo en 2,85 h y el pico de flujo se produjo en 1h40 min. El volumen fugado en la ruptura fue de 44,75 hm³. La ola de inundación alcanzó 22,0 km de longitud donde se ubica el municipio de Forquilha. El mapa de índice de riesgo mostró que hasta 6 km de la represa el riesgo es alto, debido a que la mayoría de las personas tienen 60 años o más y son de bajos ingresos. En este lugar, las personas no están seguras dentro de los edificios, debido a que tienen una alta probabilidad de ser destruidos. Así, el mapeo de riesgos puede ser adoptado como medida preventiva, auxiliar en la elaboración de un plan de acción de emergencia, servir para la educación ambiental y la planificación territorial.

Palabras-clave: Falla de Presa; HEC-RAS 2D; Mapeo de Riesgos.

INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas construídas transversalmente à direção do escoamento de um rio, com a finalidade de criar um reservatório artificial para armazenamento de água, com devida segurança. Elas são importantes para a sociedade, porque proporcionam usos múltiplos da água (geração de energia, abastecimento de água, controle de cheias, irrigação, lazer, etc.) e o desenvolvimento econômico e social de municípios, regiões e países (MONTE et al., 2017; ARAUJO et al., 2019). Entretanto, barragens podem apresentar falhas na sua estrutura, sendo um risco potencial para a população que ocupa as áreas a sua jusante (LAURIANO, 2009). No momento do rompimento de uma barragem as vazões e os níveis de água resultantes são normalmente superiores às máximas naturais do trecho a jusante, atingindo bens materiais e populações que se consideram a salvo das inundações (COLLHISHONN e TUCCI, 1997; MARANGONI et al., 2017).

No Brasil, por exemplo, ocorrem em média oito desastres com barragens por ano, devido à ruptura parcial ou total da estrutura e, principalmente, a eventos de chuvas intensas. No período entre 2011 a 2020 foram registrados 83 acidentes (ANA, 2021). Discutindo a magnitude dos desastres causados por rompimentos de barragens no Brasil e no mundo, Armada (2021) e Silva (2021) destacam os impactos ambientais, os danos materiais, os prejuízos econômicos e a gravidade desses desastres devido à perda de vidas humanas.

Portanto, a avaliação e o monitoramento das barragens são primordiais para a manutenção da integridade da estrutura, da operação e para garantir a segurança da população a jusante. Assim, a construção de uma barragem deve seguir rigorosamente as normas exigidas por lei, além do monitoramento constante das estruturas após a sua construção (ANA, 2018). Neste aspecto, a Lei nº 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), exige para determinadas barragens um plano de ação de emergência (PAE) (BRASIL, 2010). Na elaboração do PAE podem ser utilizados modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para estimar as áreas prováveis de serem inundadas, devido à onda de cheia, originada em caso de uma ruptura da barragem, afetando a população, instalações, infraestruturas e o ambiente do vale a jusante (ANA, 2016). Esses modelos permitem a caracterização do perigo da inundação, devido às possíveis falhas de rompimento das barragens. Com base nesses modelos é possível elaborar um plano de ação de emergência, estimar a profundidade da água e o tempo de chegada da onda de cheia a jusante do barramento (XIONG, 2011).

Atualmente, existem diversos modelos hidrodinâmicos para simulação do rompimento de uma barragem, tais como o HEC-RAS (USACE, 2016), o FLDWAV (NWS, 1998), o BOSS DAMBRK (BOSS INTERNATIONAL, 1999), entre os quais, o River Analysis System (HEC-RAS) é o mais utilizado. Esse modelo foi desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC) do United States Army Corps of Engineers (USACE), e permite a simulação numérica da propagação do fluxo constante unidimensional e bidimensional em canais fluviais, utilizando as equações propostas por Saint-Venant para situações de escoamento permanente e turbulento (USACE, 2016). Existem diversos estudos que utilizaram esse modelo para simular a ruptura de barragens. No mundo, o HEC-RAS foi utilizado, por exemplo, por Xiong (2011), Jung e Kim (2017) e Leoul e Kassahun (2019). Já no Brasil foi utilizado por Kuhlkamp (2016), Mota (2017) e Ferla (2018), sendo, portanto, uma ferramenta muito útil para avaliar a segurança das barragens.

O eventual rompimento de uma barragem pode trazer consequências catastróficas, muitas vezes irreparáveis, como: danos ambientais, prejuízos financeiros e a perda de vidas humanas (VEIZAGA et al., 2017). Portanto, as barragens devem ser classificadas quanto às consequências de uma ruptura e quanto ao dano potencial, considerando os aspectos sociais, ambientais, estruturais e econômicos (BRASIL, 2010).

Neste contexto, o mapeamento de risco é uma importante ferramenta de análise de áreas sujeitas ao risco de inundação, pois através do mapa é possível estabelecer medidas preventivas, quanto às possíveis situações de emergência que podem acontecer, bem como realizar um planejamento da ocupação das áreas sujeitas à inundação (BRITO, 2017).

O risco representa a possibilidade de perda para uma região habitada em um determinado tempo, devido à presença de um perigo. Comumente, o risco é definido como função do perigo e da vulnerabilidade (WISNER et al., 2004; UNISDR, 2016; MONTE et al., 2021). Goerl et al. (2012) propuseram um método para mapeamento do índice de risco de inundação através do perigo estimado e

do índice de vulnerabilidade. Monte et al. (2017) também utilizaram diferentes metodologias para calcular o índice de perigo de inundação e, em conjunto com o índice de vulnerabilidade, estimaram o índice de risco de inundação devido ao rompimento da barragem Lomba do Sabão, em Porto Alegre, RS.

O perigo pode ser definido como a possível ação de um evento que ocorre em épocas e região conhecidas que podem causar sérios danos socioeconômicos às comunidades expostas (UNDP, 2004; UNISDR, 2016; MONTE et al., 2021). O mapeamento do perigo de inundação representa a distribuição de potenciais consequências de uma inundação, sendo assim, uma boa alternativa para melhorar a gestão das áreas inundáveis. O uso de indicadores e categorias de perigo para o mapeamento mais detalhado são práticos e úteis (MONTEIRO et al., 2021). Neto et al. (2016), por exemplo, propuseram uma metodologia para o mapeamento de perigo utilizando os indicadores de: profundidade da água, velocidade do fluxo, carga de energia, força do escoamento e intensidade. Já Stephenson (2002) e Smith et al. (2014) utilizaram a profundidade e velocidade da água como indicadores para o índice de perigo, sendo estes usualmente utilizados para o mapeamento de perigo.

Em relação à vulnerabilidade refere-se às condições determinadas por fatores ou processos físicos, sociais, econômicos e ambientais, que aumentam a suscetibilidade de um indivíduo, de uma comunidade, de bens ou de sistemas, aos impactos de perigos (KOHLENER et al., 2004; UNISDR, 2016; MONTE et al., 2021). Moreira e Kobiyama (2021) analisaram 21 estudos brasileiros sobre índices de vulnerabilidade e verificaram que a maioria dos estudos utilizaram os indicadores obtidos do censo 2010 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), sendo que os indicadores mais utilizados foram: renda per capita, domicílios com banheiro sem esgotamento sanitário, densidade demográfica, domicílios com ou sem abastecimento de água na rede, e domicílios particulares precários. Andrade et al. (2017) e Debortoli et al. (2017) calcularam o índice de vulnerabilidade em escala municipal. Já Marcelino et al. (2006), Goerl et al. (2012) e Reis et al. (2016) utilizaram indicadores com base nas características socioeconômicas dos setores censitários do município realizado pelo IBGE. A barragem do rio São Bento está localizada no município de Siderópolis no estado de Santa Catarina, sendo inserida na bacia hidrográfica do rio São Bento. Nessa bacia, alguns estudos já foram realizados com objetivo de avaliar os impactos da construção da barragem, como por exemplo, Ming (2007), que desenvolveu um sistema computacional para previsão de inundações na região a jusante da barragem, usando o modelo HEC-RAS para simular três cenários de cheias (evento pluviométrico de 2006 e períodos de retorno de 100 e 1000 anos). Também Schwalm (2008) realizou a comparação do volume de projeto do reservatório da barragem do rio São Bento, com os volumes obtidos em campo, utilizando de ferramentas de geoprocessamento. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o índice de risco de inundação, estimado em função de um índice de perigo de inundação e de um índice de vulnerabilidade, devido ao rompimento hipotético da barragem de São Bento, sul de Santa Catarina.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é o trecho a jusante da barragem do rio São Bento, localizada na sub-bacia do rio São Bento (157,40 km²), que faz parte da bacia do rio Araranguá (3089 km²), sul de Santa Catarina (Figura 1). A barragem recebe a contribuição de dois rios principais que são: o rio São Bento e rio Serrinha. A jusante da barragem estão localizadas as comunidades de São Bento Alto (149 habitantes) e São Bento Baixo (786 habitantes), que estão a 6,5 km e 15,5 km de distância, respectivamente, da barragem. Essas comunidades pertencem ao município de Nova Veneza (13309 habitantes) (IBGE, 2010). Devido à distância da barragem, essas duas comunidades estão sujeitas a danos potenciais, causados por um possível rompimento da barragem. Assim, em função da existência dessas comunidades a jusante e do grande volume do reservatório (68,10 hm³), a barragem do rio São Bento foi classificada, segundo a ANA (2021), como de risco médio, porém com dano potencial associado alto.

A região da bacia, de acordo com a classificação de Köppen apresenta dois subtipos climáticos: Cfa (subtropical mesotérmico úmido, com verão quente) e Cfb (subtropical mesotérmico úmido, com verão fresco) (ALVARES et al., 2014). A precipitação média total anual dessa região é de 1694 mm, com uma média total anual de 115 dias de chuva, tendo uma umidade relativa média anual de 82% (BACK, 2020; BACK e POLETO, 2018).

A cobertura vegetal nativa da bacia do rio São Bento pertence à formação Floresta Ombrófila Densa (Domínio Mata Atlântica). Entretanto, de acordo com Costa (2008), a mata nativa primária foi praticamente substituída pela vegetação secundária, as áreas de desmatamento, principalmente a jusante da barragem foram substituídas por lavouras de arroz, feijão, fumo, mandioca e milho. Nessa região ainda há manchas isoladas de mata nativa e vegetações de porte médio. Já a montante da barragem, nas encostas da Serra Geral, a vegetação apresenta-se sob a forma predominante de floresta, com algumas áreas com vegetação de porte baixo e culturas temporárias. O relevo da região a montante da barragem do rio São Bento é formado pelos contrafortes da Serra Geral, com ombreiras íngremes em formato de “V”, apresentando grandes escarpas basálticas cortadas por vales profundos. A drenagem nessa região é considerada jovem, com corredeiras e trechos de alta declividade, tendo um desnível de 1280 metros entre a parte mais elevada e a estrutura da barragem (CASAN, 2004). A jusante da barragem o relevo é de planície aluvial, apresenta características de formação em ambiente lacustre, composta por várias camadas de seixos rolados (MING, 2007), provenientes das rochas da Serra Geral.

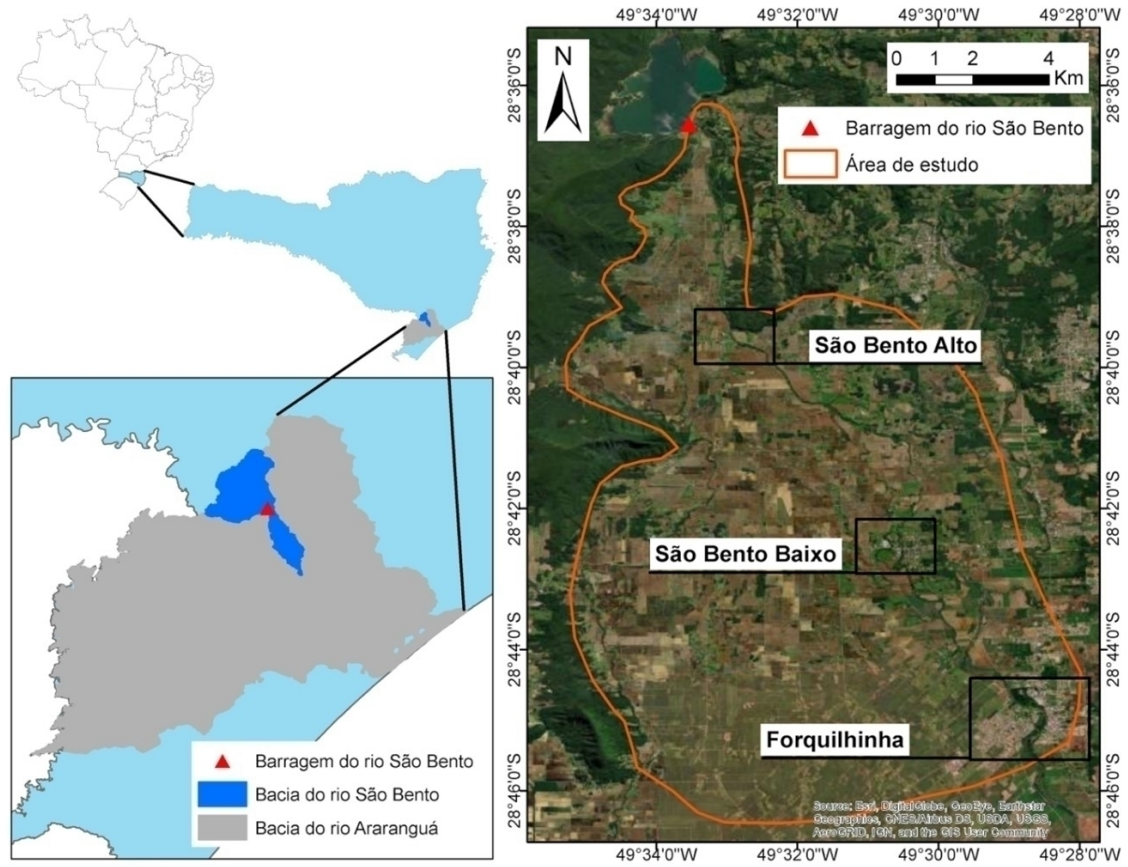


Figura 1 - Localização da barragem do rio São Bento, sul de Santa Catarina.

A barragem do rio São Bento tem um comprimento total de 476 m, sendo que a parte central apresenta 240 m de extensão e foi construída de concreto compactado a rolo do tipo gravidade. Já as ombreiras foram construídas com espaldares em cascalho compactado, com núcleo de argila impermeável, e possuem uma extensão de 128 m e 108 m, à margem esquerda e direita, respectivamente (Figura 2). A elevação máxima até a fundação é de 49 m e sobre o leito do rio de 38 m (CASAN, 2004).

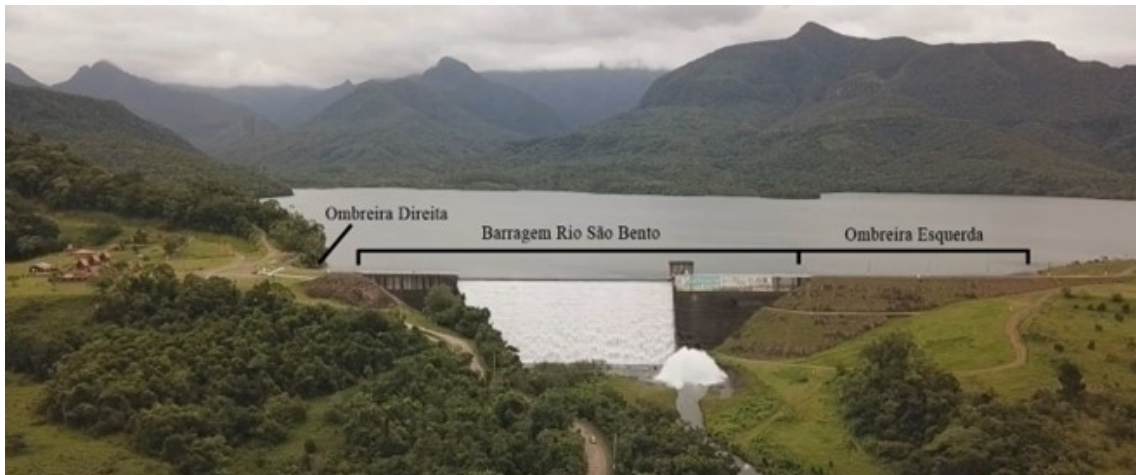


Figura 2 - Fotografia da barragem do rio São Bento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Com objetivo de avaliar o risco de inundação da área a jusante da barragem do rio São Bento foram utilizados: (i) o modelo hidrodinâmico HEC-RAS 2D para simular o rompimento da barragem devido à formação da brecha e para propagação da onda de cheia; (ii) o índice de perigo proposto por Stephenson (2002); e (iii) o índice de vulnerabilidade com base na metodologia proposta por Goerl et al. (2012).

MODELO HIDRODINÂMICO

Para a simulação de rompimento de barragem no modelo HEC-RAS 2D os principais dados de entrada requeridos (USACE, 2016; TSCHIEDEL, 2017) foram: (i) a topografia da área a jusante da barragem; (ii) parâmetros de configurações da brecha; (iii) dados hidrológicos (volume e nível do reservatório); (iv) coeficiente de Manning (n) e (v) equação para propagação da onda.

Para a propagação da onda a jusante da barragem utilizou-se como dado topográfico um Modelo Digital de Elevação (MDE), com resolução espacial de 1,0 x 1,0 metro da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDE), obtido no Sistema de Informações Geográficas (SIGSC) (SDE, 2013). Para simular a onda de cheia devido ao rompimento da barragem adotou-se o nível máximo normal do reservatório de 157,5 m, que corresponde a cota da soleira do vertedouro. Esse nível corresponde a um volume acumulado de 58,2 hm³, uma área inundada de 4,5 km² e uma vazão inicial de 29,8 m³.s⁻¹. Esses dados foram obtidos pelo relatório de gerenciamento de risco da barragem de São Bento disponibilizado pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN, 2004).

Na propagação da onda de cheia foram utilizadas as equações de Saint-Venant 2D que, segundo a USACE (2016) constituem-se nas equações de conservação da massa (1) e da conservação de momento nos eixos x e y (2 e 3).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + q = 0$$

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

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

onde H é a elevação (altitude) da superfície da água (m); h é a profundidade da água (m); u e v são as velocidades nas direções cartesianas (m.s⁻¹); t é o tempo (s); q são as contribuições ou abstrações de fluxo (m³.s⁻¹); v_t é o coeficiente de viscosidade turbulenta (m².s⁻¹); c_f é o coeficiente de atrito (adimensional); f é o parâmetro de Coriolis (s⁻¹); e g é a aceleração gravitacional (=9,80665 m.s⁻²). Estes parâmetros foram calculados pelo modelo HEC-RAS 2D, conforme a onda de cheia avança em direção ao vale a jusante da barragem.

No presente estudo, para a propagação da onda de cheia no modelo foram utilizados como condição de contorno os seguintes parâmetros: (a) o nível máximo normal de 157,5 m e o volume do reservatório de 58,2 hm³ para o trecho a montante do reservatório; (b) uma declividade média de 0,00448 m.m⁻¹, determinada na planície de inundação do trecho a jusante da barragem. Essa última foi determinada pelo MDE, através da média de pontos (altitude) entre a barragem e o final da malha computacional.

Para propagar o hidrograma de ruptura da barragem utilizou-se uma malha computacional de 136,72 km² com resolução espacial de 15 m x 15 m para a planície de inundação, a fim de abranger as comunidades de São Bento Alto e São Bento Baixo e a região central do município de Forquilha, que ficam distantes da barragem 6,6 km, 15,5 km e 22 km, respectivamente. Para a simulação da propagação do fluxo adotou-se um regime de escoamento “não permanente”, com intervalo de tempo computacional de 15 s, o qual permitiu uma melhor estabilidade à simulação. Para esse tempo computacional considerou-se o intervalo entre 1 a 60 segundos, sugerido pela USACE (2014), devido ao curto tempo de subida do hidrograma e da velocidade de onda de inundação serem muito rápidos.

COEFICIENTE DE MANNING

Na simulação da propagação da onda de cheia de um evento de rompimento de barragem, de acordo com Tschiedel (2017), a calibração e a escolha do valor de n é uma tarefa difícil, pois, não há medições de cota e vazões dessas magnitudes, sendo necessário então utilizar valores disponíveis na literatura existente. Assim, no presente trabalho os valores de n foram ajustados para toda malha computacional, com base nas tabelas propostas por Chow (1959), considerando os diferentes usos e ocupação do solo da planície de inundação a jusante da barragem de São Bento. O mapa de uso e ocupação do solo foi obtido da coleção 5 do projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MAPBIOMAS, 2020), referente ao ano de 2019. Esse mapa foi editado com objetivo de agrupar os diferentes usos e ocupação em 4 categorias. Para conferência desse mapa foram levantados no campo, com um GPS Garmin modelo ETrex 30x, amostras (latitude e longitude) dos tipos de uso e ocupação da região. Desta forma, os valores n adotados para cada uso do solo consistiram em: 0,045 (para rios naturais), 0,055 (florestas), 0,035 (áreas agrícolas e com pastagens), 0,030 (áreas urbanizadas).

DADOS DA BRECHA

No modelo HEC-RAS há duas maneiras de simular a formação de uma brecha, que são: (i) através de um modelo físico simplificado de evolução de brecha; (ii) entrada direta de dados relativos à evolução da brecha, tais como: dimensões, tempo de formação, progressão da brecha, entre outros (USACE, 2014). A barragem do presente estudo é de concreto e, conforme Vischer e Hager (1997), o tipo de ruptura mais comum de ocorrer é galgamento (overtopping). Esse tipo de ruptura pode ocorrer devido ao grande volume de água que chega no reservatório e o vertedouro da barragem não é capaz de extravasar, aumentando consideravelmente o nível da água (USACE, 2014; TSCHIEDEL, 2017).

Ressalta-se que, no Brasil apesar da PNSB contemplar modelos hidrodinâmicos para simular o rompimento de barragens de concreto, não há informação sobre os parâmetros de formação da brecha, bem como das equações que devem ser utilizadas para calcular as dimensões da brecha. Assim, no presente trabalho foram utilizadas as equações propostas por Froehlich (2008), determinadas com base em 74 dados de ruptura de barragens, para calcular a largura média (Equação 4) e o tempo de formação

MAPEAMENTO DE ÍNDICE DE RISCO DE INUNDAÇÃO DE ÁREA A JUSANTE DE UMA BARRAGEM EM CASO DE ROMPIMENTO

da brecha (Equação 5). Esses dados consistiram em: altura da brecha entre 3,05 e 92,96 m e volume do reservatório no momento da ruptura entre 0,0139 e 660 x 106 m³ (USACE, 2014).

$$B_{média} = 0.27 * k_0 * V_w^{0.32} * h_b^{0.04}$$

$$T_f = 63.2 * \sqrt{\frac{V_w}{g * h_b^2}}$$

onde B_{média} é a largura média da brecha (m); T_f é o tempo de formação da brecha (horas); k₀ é 1,0 para entubamento e 1,3 para galgamento; V_w é o volume do reservatório no momento da ruptura (m³); e h_b é a altura da brecha (m). Os valores desses parâmetros da brecha estão apresentados na Tabela 1.

Dados	Valor adotado
Largura da brecha na base	104 m
Largura da brecha no topo	134 m
Altura da brecha	15 m
Inclinação da brecha	45°
Tempo de formação da brecha	2,85 h

Tabela 1 - Características adotadas para a brecha da barragem do rio São Bento.

MAPEAMENTO DO ÍNDICE DE RISCO DE INUNDAÇÃO (IR)

O risco pode ser mensurado, de modo geral, considerando a vulnerabilidade e o perigo (GOERL et al., 2012). Assim, para determinar a vulnerabilidade, foram selecionadas oito variáveis censitárias do censo demográfico realizado pelo IBGE em 2010, as quais foram agrupadas em seis (Tabela 2). As variáveis foram selecionadas com base no estudo de Goerl et al. (2012) sobre mapeamento de risco de inundação do município de Rio Negrinho, norte de Santa Catarina. Essas variáveis estão relacionadas às características demográficas, de educação, dependência e renda de cada setor censitário.

Número	Variáveis Censitárias	Número	Variáveis de Vulnerabilidade
1	Número de moradores no setor	1	Número de moradores no setor
2	Média de moradores por domicílio	2	Média de moradores por domicílio
3	Densidade Demográfica	3	Densidade Demográfica
4	% da população abaixo de 12 anos	4	Soma da porcentagem da população acima de 60 e abaixo de 12 anos
5	% da população acima de 60 anos	5	% de pessoas analfabetas acima de 12 anos
6	% de pessoas analfabetas acima de 12 anos	6	Soma da porcentagem dos responsáveis sem rendimento e com rendimento de até 1 Salário Mínimo
7	% de Responsáveis sem rendimento		
8	% de responsável com rendimento até 1 Salário Mínimo		

Tabela 2 - Variáveis censitárias e variáveis utilizadas para mensurar a vulnerabilidade.

Para o presente estudo, foram utilizados os indicadores dos setores censitários do Censo de 2010, que correspondem a menor unidade territorial, com limites físicos identificáveis a campo, definidos pelo IBGE. Na definição dos setores censitários foram considerados três municípios que abrangem a área a jusante da barragem de São Bento: Siderópolis, Nova Veneza e Forquilha. De acordo com o IBGE

(2010), esses municípios são divididos em 27, 33 e 47 setores censitários, respectivamente. No entanto, considerou-se na análise da vulnerabilidade a área dos setores delimitada pela malha computacional, utilizada no HEC-RAS 2D para simular a propagação da inundação (Figura 3).

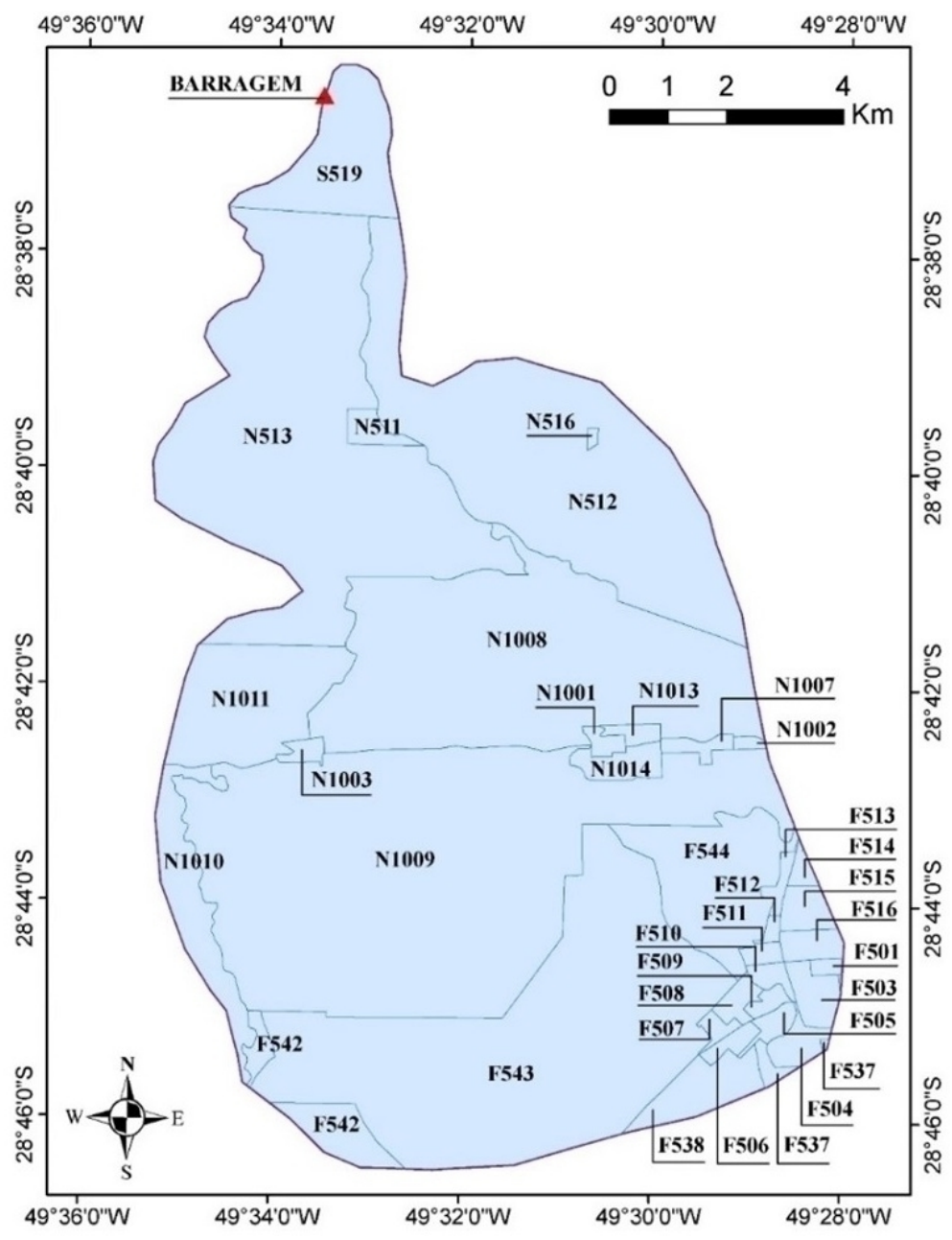


Figura 3 - Setores censitários do trecho a jusante da barragem do Rio São Bento dentro da malha computacional analisada no HEC-RAS 2D.

Desta forma, o índice de vulnerabilidade (IV) foi calculado pela Equação (6) proposta por Goerl et al. (2012):

$$VI = \frac{Dd + Nm + Mm + Td + E + R}{MMDI}$$

onde, Dd é a densidade demográfica (habitante.km-2); Nm é o número de moradores no setor; Mm é média de moradores por residência; Td é a taxa de dependência de crianças (até 12 anos) e idosos

MAPEAMENTO DE ÍNDICE DE RISCO DE INUNDAÇÃO DE ÁREA A JUSANTE DE UMA BARRAGEM EM CASO DE ROMPIMENTO

(acima de 60 anos); E é a educação (analfabetos acima de 12 anos); R é a renda (responsável sem rendimento ou com até 1 salário mínimo); e IDH-M é o Índice de Desenvolvimento Humano do Município.

De acordo com Goerl et al. (2012), a vulnerabilidade é inversamente proporcional à capacidade e ao preparo do município em fornecer uma resposta e suporte ao acontecimento de perigo. Assim, os autores destacam que, diante de um desastre, todo o município pode ser afetado pela falta de água, falta de luz, bloqueio de estradas, aulas suspensas, entre outras situações adversas. Portanto, o IDH-M é considerado um índice que representa a capacidade do município em dar uma resposta ao desastre ocorrido.

O IDH-M é composto por três indicadores: vida longa e saudável (longevidade), acesso ao conhecimento (educação) e padrão de vida (renda) e é dividido em cinco classes: de 0 a 0,499 (muito baixo), 0,5 a 0,599 (baixo), 0,6 a 0,699 (médio), 0,7 a 0,799 (alto) e 0,8 a 1 (muito alto) (PNUD, 2013). Desta forma, o IDH-M de Siderópolis (0,774), Nova Veneza (0,768) e Forquilha (0,753) foram utilizados como indicadores desta capacidade para seus respectivos setores censitários.

Visando a uniformização das unidades das variáveis da Equação 6, utilizou-se a metodologia proposta por Marcelino et al. (2006), onde o valor de cada uma variável foi calculado como:

$$Ve = \frac{Vo - Vmin}{Vmax - Vmin}$$

onde, Ve é o valor escalonado; Vo é o valor observado; V_{mín} é o valor mínimo; e V_{máx} é o valor máximo. Assim, os valores foram escalonados de 0 a 1, sendo 1 o valor máximo e 0 o valor mínimo.

Desta forma, o IV foi classificado em quatro classes: baixa, média, alta e muito alta. Essas classes foram definidas usando o método Natural Breaks. Esse método consiste em minimizar a variância dentro de cada classe, criando assim, categorias naturais dos dados dentro de cada classe e que possuem valores mais homogêneos (REIS et al., 2016).

O índice de perigo (IP) foi calculado pela equação proposta por Stephenson (2002) para um determinado ponto da área inundada:

$$HI = h \cdot v$$

onde, h é a profundidade da água (m); e v é a velocidade do escoamento (m.s⁻¹).

O mapa de IP foi gerado no modelo HEC-RAS 2D, com os dados obtidos pela simulação do rompimento da barragem de São Bento. Esse mapa foi caracterizado utilizando as considerações de Prevene (2001), conforme mostra a Tabela 3. Desta forma, os valores do índice de perigo de Stephenson (2002), foram classificados como: IP de 0,1 a 0,5 m².s⁻¹ para a baixa; IP 0,5 a 1,0 m².s⁻¹ para a média; IP > 1,0 m².s⁻¹ para a alta.

Classe de Perigo	Cor no Mapa	Descrição
Alto	Vermelho	As pessoas estão em perigo, dentro ou fora de suas casas. As construções possuem alta possibilidade de serem destruídas.
Médio	Laranja	As pessoas estão em perigo fora de suas casas. As construções podem sofrer danos e serem destruídas.
Baixo	Amarelo	Baixa ou inexistente possibilidade de fatalidades. As construções podem sofrer danos.

Tabela 3 - Níveis de Perigo de Inundação.

Por fim, com base nos índices acima descritos calculou-se o índice de risco (IR), sendo expresso por:

$$RI = HI \times VI$$

onde IP é o índice de perigo; e IV é o índice de vulnerabilidade. O mapa final de IR foi elaborado usando a mesma metodologia do mapa de IP. Porém, as classes foram categorizadas como alta, média e baixa, usando os valores de IR obtidos pela Equação 9.

Os mapas de IP, IV e IR foram elaborados por meio do software ArcGIS 10.8, utilizando a calculadora raster.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

EXTENSÃO DA ÁREA DE INUNDAÇÃO SIMULADA NO HEC-RAS 2D

A simulação do rompimento da barragem de São Bento com o HEC-RAS 2D resultou numa área de inundação de 64,8 km², abrangendo várias comunidades localizadas a jusante da barragem e extensas áreas de plantio de arroz, como mostra a Figura 4.

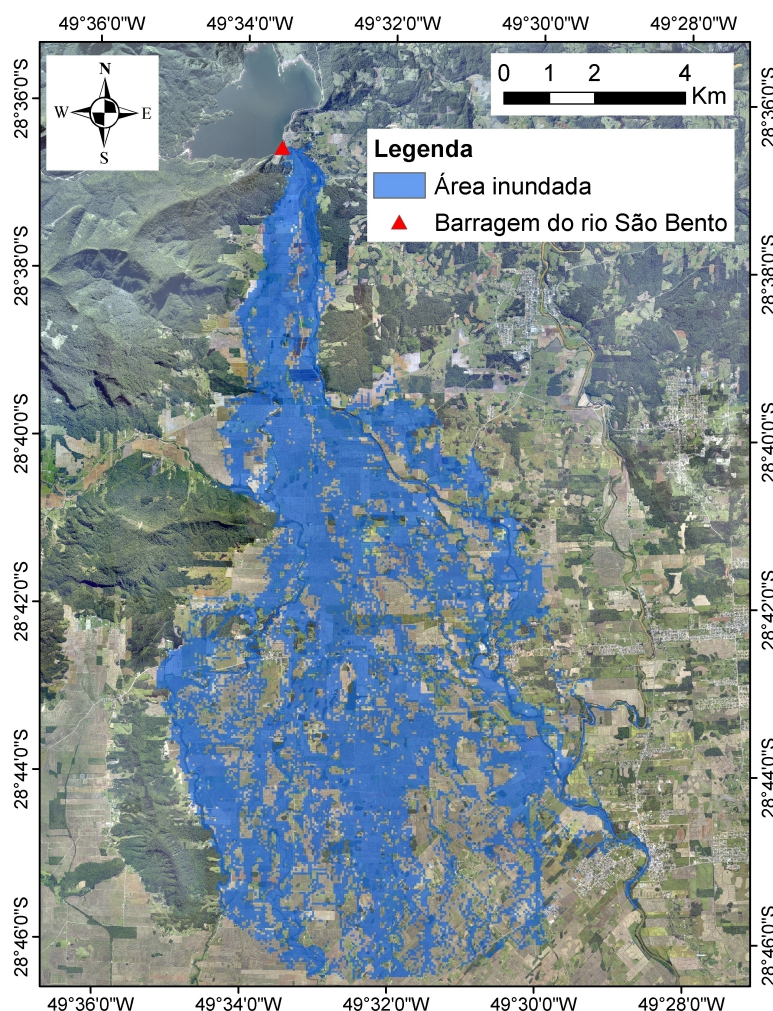


Figura 4 - Extensão da área de inundação simulada no HEC-RAS 2D.

O resultado da simulação mostra que a onda de cheia atinge primeiro a comunidade de São Bento Alto (149 habitantes), que fica a 6,5 km da barragem, em seguida São Bento Baixo (786 habitantes), a 15,5 km, e por último a região central do município de Forquilha (22 km de distância). As duas

primeiras comunidades pertencem ao município de Nova Veneza (SC). Nos itens que seguem, descreve-se com mais detalhe os índices de vulnerabilidade, perigo e risco que as comunidades estão correndo, caso a barragem se rompa.

A Figura 5 mostra o hidrograma defluente devido à brecha simulada no HEC-RAS 2D, obtido com base nos parâmetros da Tabela 1. Observa-se que a formação da brecha acontece num intervalo de 2,85 horas, sendo que o pico de vazão, estimado em $3586,60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ocorreu em 1 hora e 40 minutos. O volume total extravasado, estimado devido ao rompimento da barragem, foi de $44,75 \text{ hm}^3$, o qual representa cerca de 79% do volume total do reservatório no nível máximo normal.

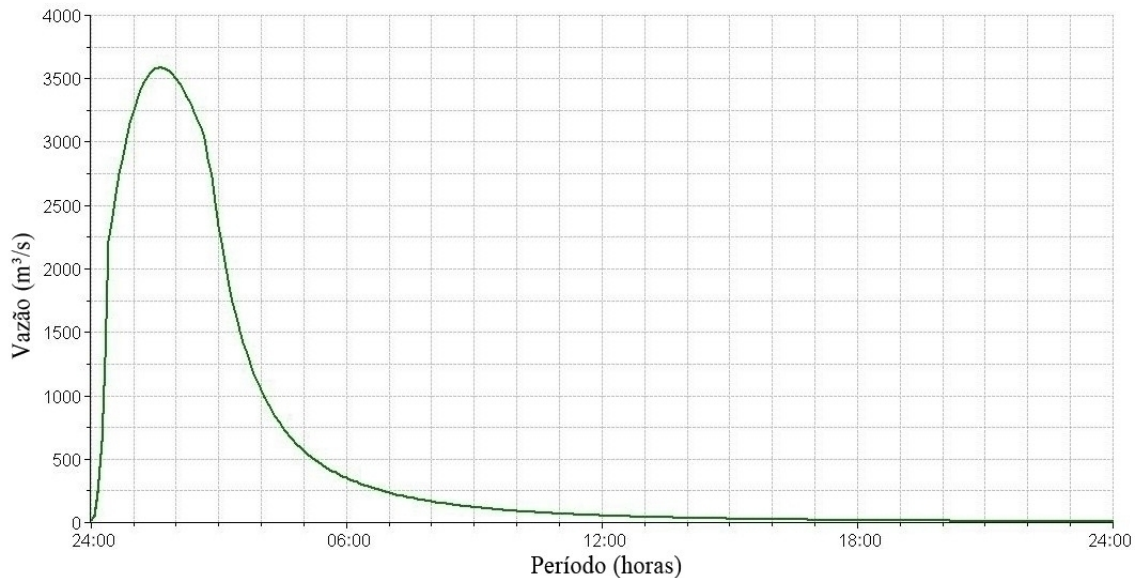


Figura 5 - Hidrograma resultante do rompimento da barragem do rio São Bento simulado no HEC-RAS 2D.

As Figuras 6, 7 e 8 mostram o momento de chegada da onda de cheia nas três comunidades atingidas. Na comunidade de São Bento Alto o tempo estimado de chegada da onda de cheia foi de 55 minutos, com a profundidade máxima (Figura 6a) e a velocidade máxima (Figura 6b) da água de 0,30 m e $1,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. Em São Bento Baixo o tempo de chegada da onda de cheia foi de 2h45 min, com uma profundidade máxima (Figura 7a) de 0,8 m e a velocidade máxima (Figura 7b) de $1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Já na região central do município de Forquilha a onda de cheia chegou em 4h30min, com uma profundidade máxima (Figura 8a) de 0,6 m e uma velocidade máxima (Figura 8b) de $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ as margens do trecho do rio São Bento.

Para o valor de IP calculado no momento de chegada da onda de cheia nas comunidades, obtido pela Equação 8 e caracterizado segundo Prevene (2001), observa-se que: na comunidade de São Bento Alto, na maior área o perigo é baixo (Figura 6c), porém já apresenta em alguns locais perigo médio e alto, ou seja, desde a chegada da onda, as pessoas já estão em perigo, dentro ou fora de suas casas e com alta possibilidade das construções serem destruídas; já na comunidade de São Bento Baixo (Figura 7c) e na região central de Forquilha (Figura 8c), o perigo é alto apenas na calha do rio, sendo que para a comunidade o perigo é baixo, assim, as pessoas possuem baixa ou inexistente possibilidade de fatalidades, porém as construções podem sofrer algum tipo de dano.

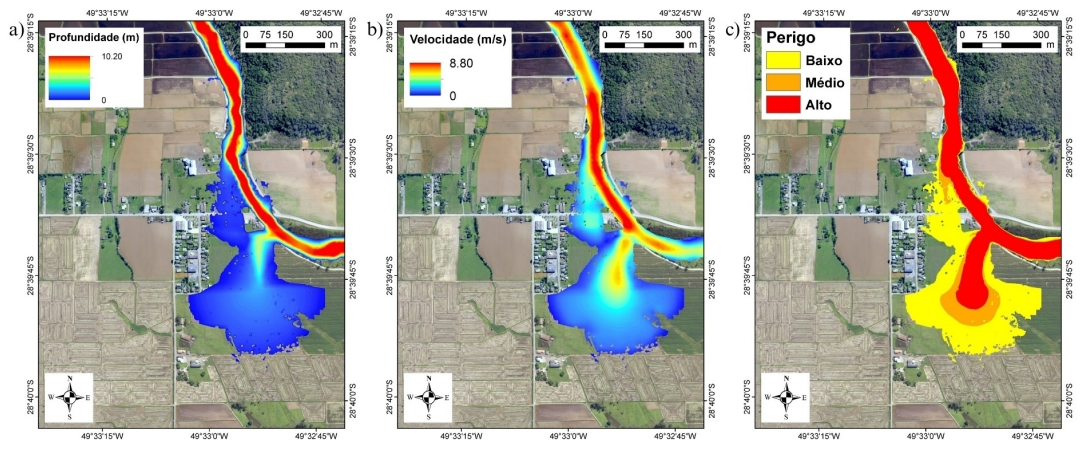


Figura 6 - Situação no momento da chegada da onda na comunidade de São Bento Alto: (a) Profundidade; (b) velocidade; e (c) índice de perigo.

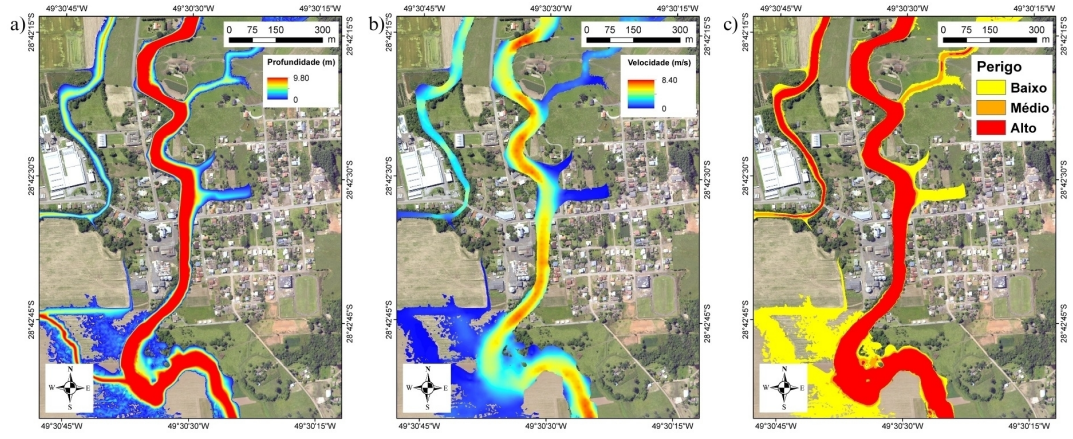


Figura 7 - Situação no momento da chegada da onda na comunidade de São Bento Baixo: (a) Profundidade; (b) velocidade; e (c) índice de perigo.

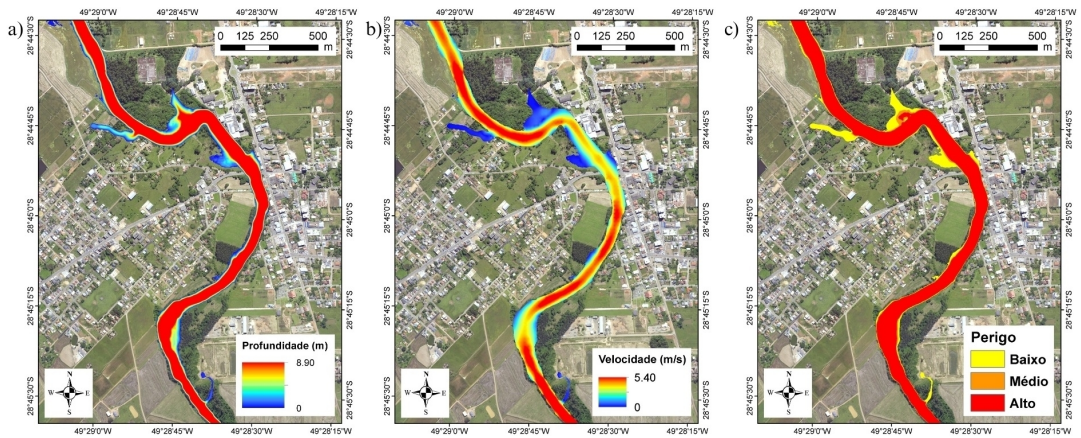


Figura 8 - Situação no momento da chegada da onda em Forquilha: (a) Profundidade; (b) velocidade; e (c) índice de perigo.

MAPA DE ÍNDICE DE PERIGO

O mapa de IP de inundação representa a distribuição espacial do dano potencial que a onda de cheia pode causar. Assim, para mapear as áreas com determinado potencial de perigo de inundação para a área a jusante da barragem de São Bento, calculou-se o valor de IP considerando a profundidade e a velocidade do fluxo resultante do rompimento hipotético da barragem, simulados com o modelo HEC-RAS 2D.

A Figura 9 mostra os mapas de profundidades e velocidades máximas e de índice de perigo de toda área inundada a jusante da barragem. Verifique-se que, na maior parte da área a profundidade da lâmina d'água não ultrapassou a 2 m e a velocidade da água ficou abaixo de 2 m.s⁻¹, principalmente nas áreas mais planas, onde predominam plantios de arroz irrigado. Entretanto, nos locais mais próximos da barragem (até 6 km de distância), a profundidade chegou a 12 m e a velocidade foi de aproximadamente 20 m.s⁻¹, assim como nas calhas dos rios, principalmente nos trechos de maior declividade ou com presença de curvas, onde as velocidades atingiram de 6 a 8 m.s⁻¹ e a profundidade entre 10 a 12 m.

Como resultado da multiplicação do mapa de profundidade pelo mapa de velocidade, obteve-se um mapa onde cada pixel representa um IP (Figura 9c). Esse mapa foi classificado em três classes de perigo (Tabela 3). Observa-se que a maior área inundada (36,68 m²) foi classificada como perigo baixo, representando 56,60 % da área total (Tabela 4), ou seja, a onda de cheia apresentou valores de IP < 0,5 m².s⁻¹. Nessas regiões, conforme a classificação de Prevene (2001), as pessoas possuem baixa ou inexistente possibilidade de fatalidades, porém as construções podem sofrer algum tipo de dano.

Nível de Perigo	Área (km ²)	Porcentagem
Baixo	36,68	56,60
Médio	9,96	15,37
Alto	18,16	28,02
Total	64,80	100,00

Tabela 4 - Classificação das áreas de inundação em km² para cada grau de perigo

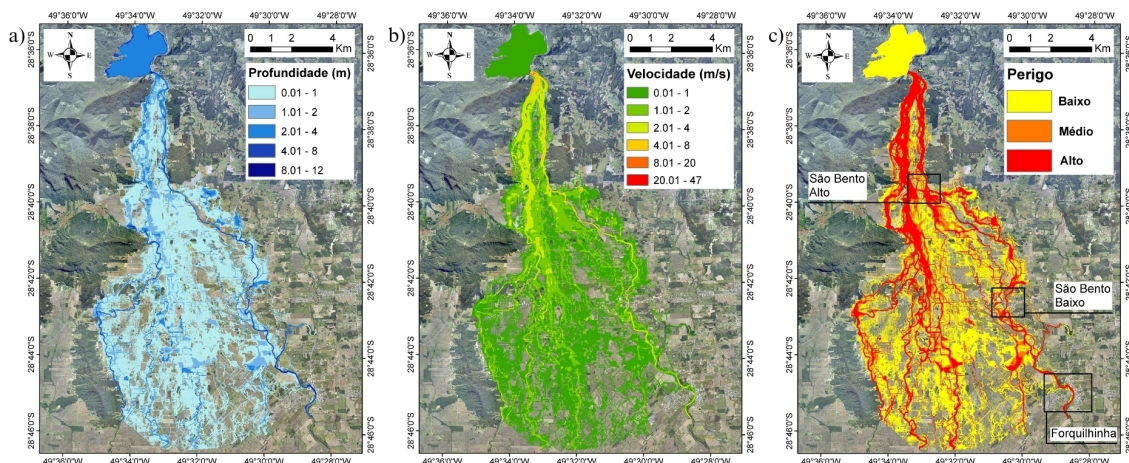


Figura 9 - Mapas da área inundada em toda extensão após o rompimento da barragem de São Bento: (a) profundidade; (b) velocidade; e (c) índice de perigo.

As Figuras 10, 11 e 12 mostram os mapas de profundidade máxima (a), velocidade máxima (b) e índice de perigo (c), das três comunidades atingidas. Na comunidade de São Bento Alto (Figura 10), a profundidade máxima é de 2,90 m e a velocidade máxima é de 5,70 m.s⁻¹, desta forma, o nível de perigo alto é o que predomina na região, assim, as pessoas estão em perigo dentro ou fora de suas casas e com

alta possibilidade de as construções serem destruídas. Já na comunidade de São Bento Baixo (Figura 11), a onda de cheia atinge parcialmente as residências, com uma profundidade máxima de 2,60 m e a velocidade máxima de 2,00 m.s⁻¹, prevalecendo o perigo alto na calha do rio São Bento e nas áreas com pouca ou nenhuma ocupação humana. Nas áreas mais habitadas o IP predomina como baixo e alguns pontos como médio. Já na região central do município de Forquilha (Figura 12), que está mais afastada da barragem, sofre pouco com os impactos provenientes do rompimento hipotético da barragem, nas poucas áreas atingidas a profundidade máxima foi de 0,60 m e a velocidade máxima de 0,70 m.s⁻¹, tendo como nível de perigo alto principalmente na calha do rio e próximo de suas margens (20 metros), proporcionando maior preocupação as construções e às pessoas que moram próximas às margens do rio, pois têm alta possibilidade de sofrerem danos.

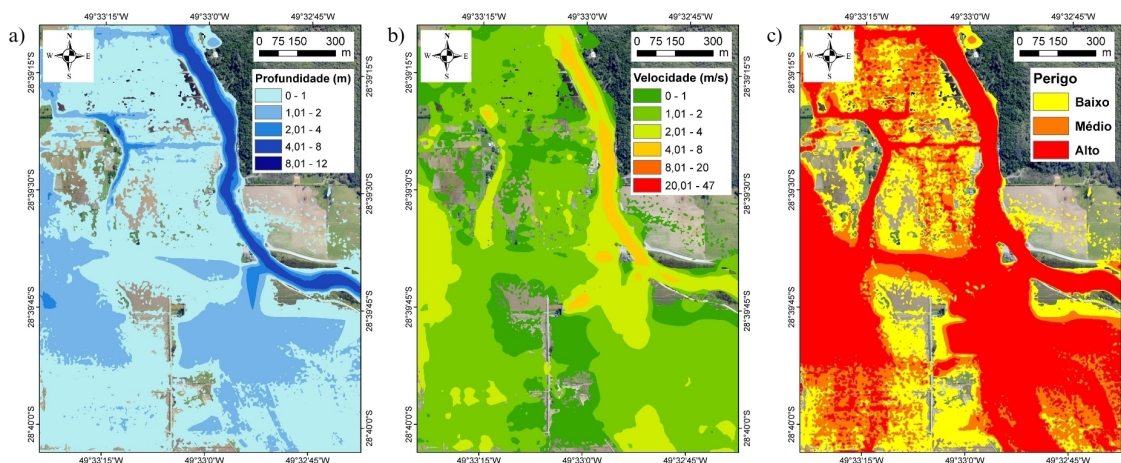


Figura 10 - Mapas de inundação na comunidade de São Bento Alto: (a) profundidade máxima; (b) velocidade máxima; e (c) índice de perigo.

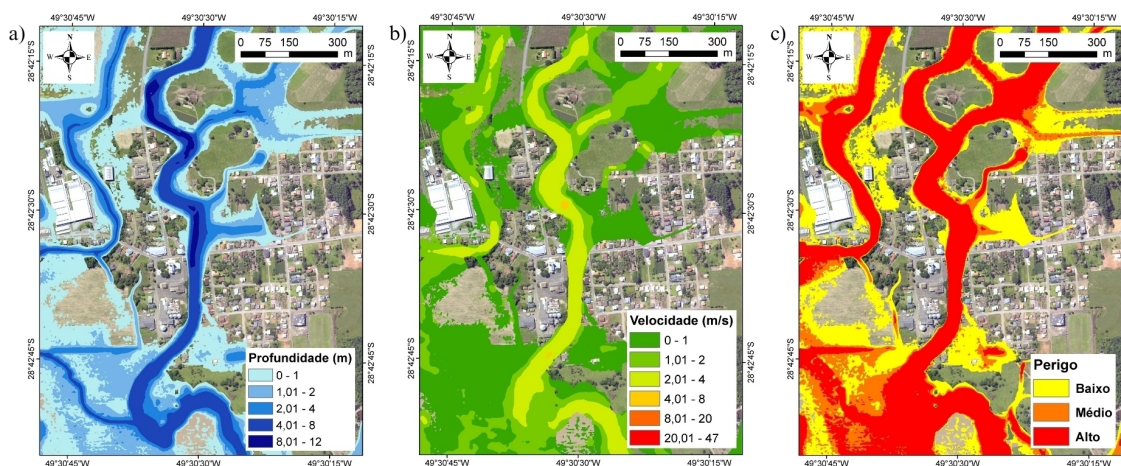


Figura 11 - Mapas de inundação na comunidade de São Bento Baixo: (a) profundidade máxima; (b) velocidade máxima; e (c) índice de perigo.

MAPEAMENTO DE ÍNDICE DE RISCO DE INUNDAÇÃO DE ÁREA A JUSANTE DE UMA BARRAGEM EM CASO DE ROMPIMENTO

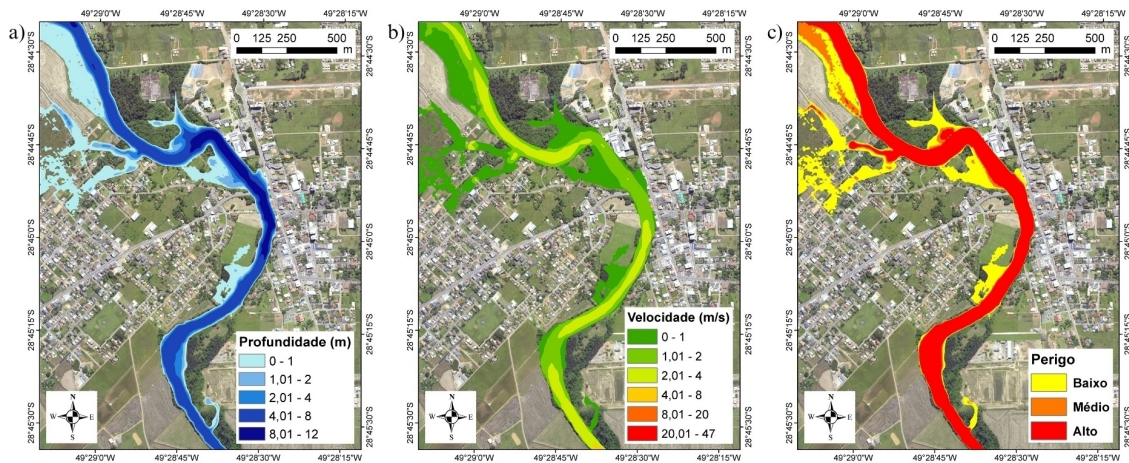


Figura 12 - Mapas de inundação em Forquilha: (a) profundidade máxima; (b) velocidade máxima; e (c)  ndice de perigo.

MAPA DE ÍNDICE DE VULNERABILIDADE

A Figura 13 apresenta as seis variáveis censitárias utilizadas para estimar o  ndice de vulnerabilidade.

No trecho a jusante da barragem os setores mais populosos (Figura 13a) possuem maior área territorial, porém com baixa densidade demográfica (Figura 13b), entre 6,84 a 166,4 habitantes.km⁻² e número médio de moradores por domicílio (Figura 13c)   de 2,87 a 3,43. Os setores com maior densidade demográfica têm entre 1474,78 a 4075,56 habitantes.km⁻², entre eles, estão as comunidades de São Bento Alto, São Bento Baixo e região central do município de Forquilha. Apesar da baixa densidade demográfica na zona rural, essa é uma área onde a maioria dos moradores tem idade acima de 60 anos (Figura 13d).

Isso aumenta a vulnerabilidade das pessoas ao perigo de inunda o, no caso do rompimento da barragem. Reis et al. (2016), que utilizaram a mesma metodologia proposta por Goerl et al. (2012) para definir as variáveis censitárias do  ndice de vulnerabilidade, também encontraram menor densidade demográfica e maior taxa de dependentes nos setores rurais analisados correspondentes aos municípios de Alto Feliz e São Vendelino, no Rio Grande do Sul.

Na Figura 13f observa-se que a popula o de baixa renda está concentrada mais próxima da barragem (até 9 km). Já os setores com maior renda per capita estão localizados em áreas mais distantes da barragem (20 km), principalmente na zona urbana do município de Forquilha. Reis et al. (2016) também verificaram que os setores urbanos apresentam maior renda em rela o aos setores rurais.

Com rela o à taxa de analfabetismo de pessoas acima de 12 anos, por setor censitário, o mapa mostra que a região não tem uma distribui o homog nea (Figura 13e), porém apresenta uma rela o com a popula o de baixa renda, demonstrando que setores onde a renda   maior, tende a ter uma taxa de analfabetismo menor.

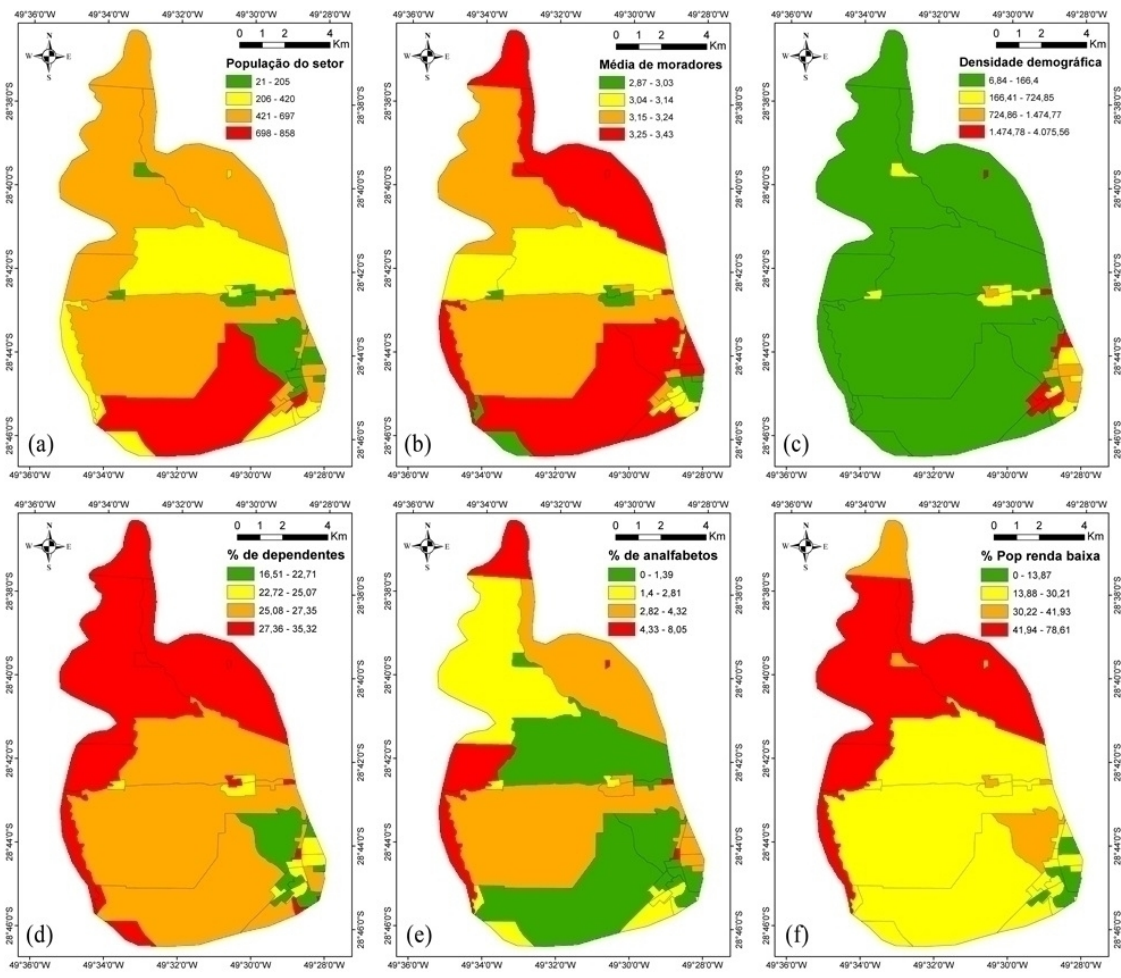


Figura 13 - Mapas das variáveis censitárias: (a) população total do setor; (b) média de moradores por residência; (c) densidade demográfica; (d) % de população dependente; (e) % de analfabetos; e (f) % da população com baixa renda.

A Figura 14 mostra o mapa de índice de vulnerabilidade, que teve uma variação de 0,85 a 5,92, classificado em quatro categorias, usando o método Natural Breaks: Baixa (< 1,53); Média (1,53 a 2,70); Alta (2,70 a 3,80); Muito Alta (> 3,80).

Entre os 35 setores censitários analisados, dentro da área inundada simulada pelo HEC-RAS 2D, apenas 2 apresentaram baixa vulnerabilidade, sendo estes os setores F509 e F510, os quais apresentaram valores baixos para todas as variáveis analisadas (Figura 12). Observa-se também que, os setores mais próximos da barragem apresentaram a vulnerabilidade alta e muito alta. Esse aspecto, chama atenção em relação a inundação causada por um possível rompimento da barragem do rio São Bento, devido à falha na sua estrutura. Outros setores mais afastados da barragem também apresentaram vulnerabilidade muito alta, como por exemplo, os setores N1002, F505, F507, F513 e F514. No entanto, o setor N1002, apresentou o maior valor de índice de vulnerabilidade devido ao maior número de moradores (858), elevada média de moradores por domicílio (3,34), alta densidade demográfica (3844,65 habitantes.km-2) e uma elevada taxa de dependentes (29,72 %).

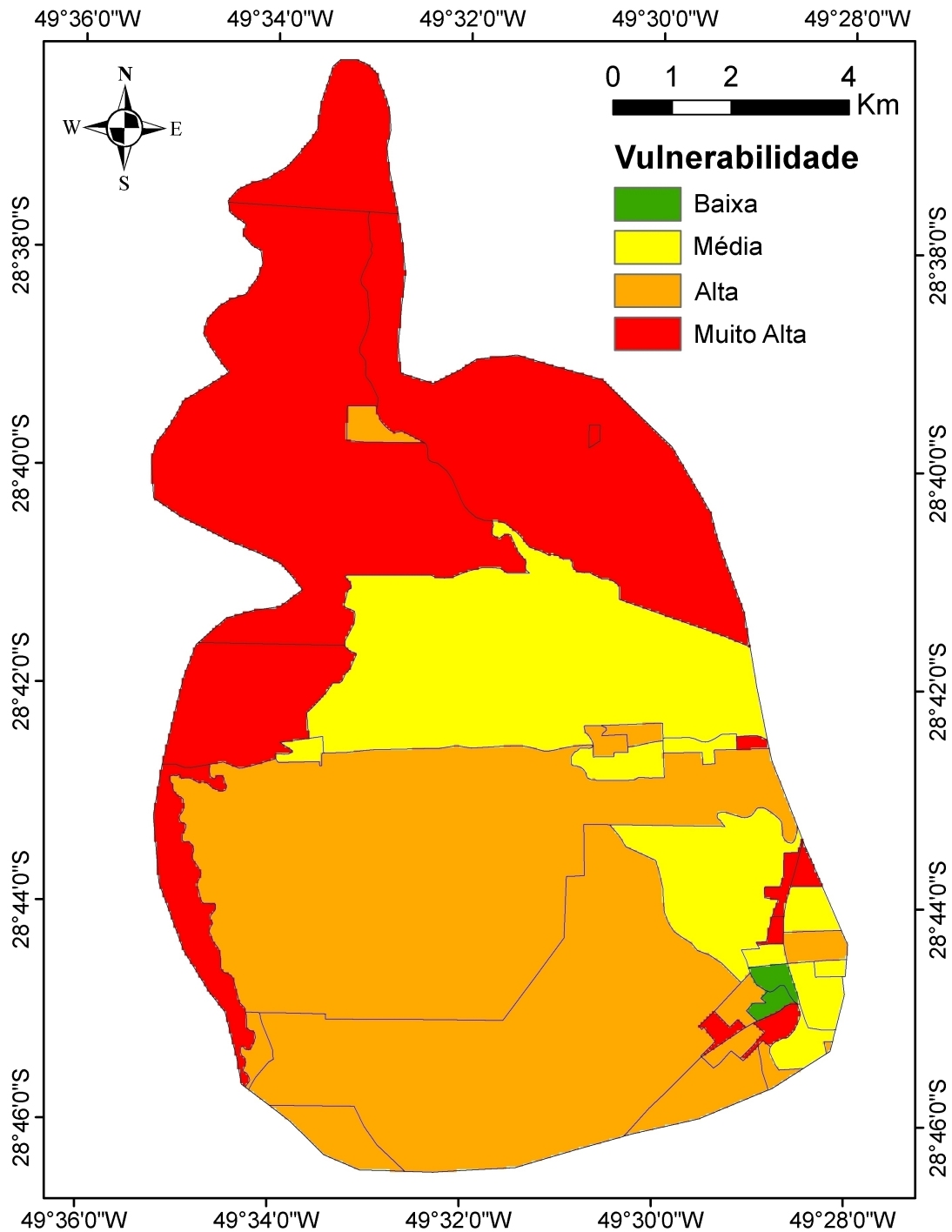


Figura 14 - Mapa de vulnerabilidade por setor censitário.

MAPA DE ÍNDICE DE RISCO

O mapa de índice de risco é apresentado na Figura 15. Nesse mapa os níveis de risco foram caracterizados em três classes: baixo, médio e alto, seguindo os mesmos critérios adotados para o IP (Tabela 3), pois é através da onda de inundação, com determinada velocidade e profundidade, que é possível dimensionar os danos potenciais para a população e para às construções a jusante da barragem de São Bento.

Observa-se que mapa de risco ficou parecido com o mapa de perigo (Figura 9c), porém a área de risco alto foi maior (36,53 km²) e representa 56,37 % da área total simulada (Tabela 5). Esse resultado foi devido ao fato do IV, calculado com base nas variáveis socioeconômicas, que potencializou o risco decorrente de um possível rompimento da barragem. Os 6 km após a barragem apresentaram o índice de risco alto, mesmo a região apresentando baixa densidade demográfica. Por ser uma área rural, as pessoas estão mais vulneráveis ao perigo, pois possuem idade acima de 60 anos e são de baixa renda. Observa-se que, mesmo algumas regiões apresentando um índice de vulnerabilidade muito alto, o risco é zero, porque não apresenta perigo de ser inundada. Isso mostra que, o risco está diretamente relacionado ao perigo de inundação com o rompimento da barragem.

Nível de Risco	Área (km ²)	Porcentagem
Baixo	18,68	28,83
Médio	9,59	14,80
Alto	36,53	56,37
Total	64,80	100,00

Tabela 5 - Classificação das áreas de inundação em km² para cada grau de risco.

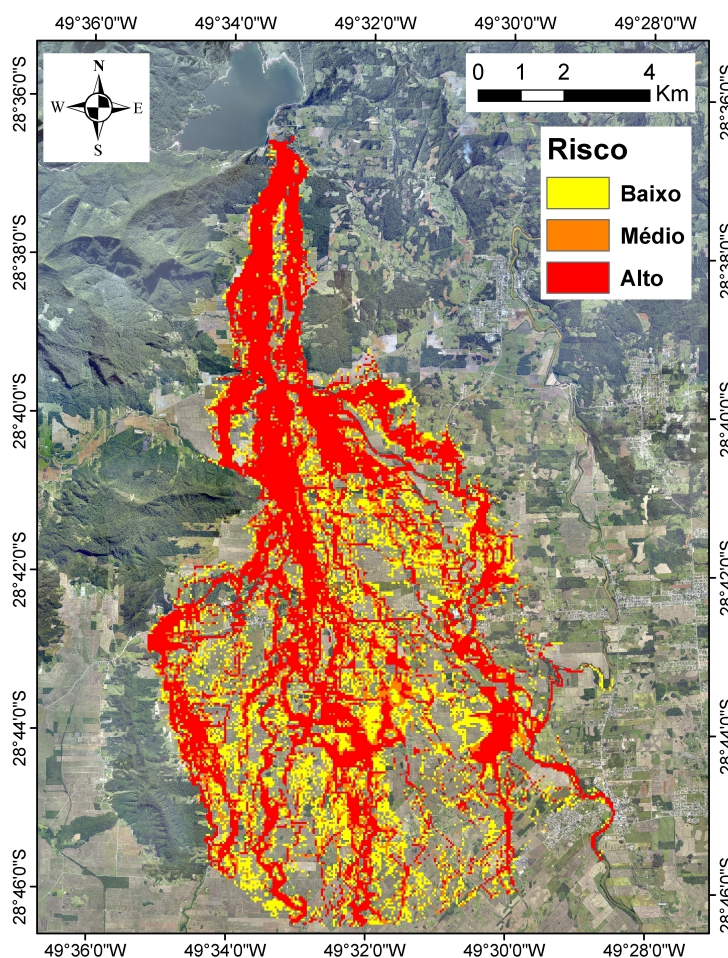


Figura 15 - Mapa de risco.

No mapa de risco (Figura 15) também se observa que, a comunidade de São Bento Alto foi totalmente atingida pela onda de inundação, sendo classificada como de risco alto. Por outro lado, a comunidade de São Bento Baixo, que também foi classificada de risco alto, foi parcialmente atingida

pela onda de cheia. Já a região central de Forquilha, apresentou um índice de risco alto apenas nas regiões próximas das margens do rio São Bento (cerca de 20 m).

Ressalta-se que, nas áreas que apresentaram risco alto e médio há muitas residências, escolas, unidades básicas de saúde, comércios, postos de combustíveis, indústrias, restaurantes, entre outras infraestruturas. Nesses locais, as pessoas não estão seguras dentro e fora das edificações, porque há probabilidade de serem destruídas devido à profundidade e velocidade média da água.

CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o índice de risco de inundação devido ao rompimento da barragem do rio São Bento, região sul catarinense, calculado em função do perigo de inundação e da vulnerabilidade da área a jusante.

O índice de perigo foi calculado pela equação proposta por Stephenson (2002), multiplicando a velocidade e a profundidade da lâmina d'água, simuladas pelo HEC-RAS 2D. A vulnerabilidade foi calculada considerando-se seis variáveis do censo demográfico de 2010 do IBGE e o setor censitário como unidade de análise.

O resultado obtido na forma de mapa de índice de risco permite inferir que nas áreas mais próximas da barragem (até 6 km de distância) o nível de risco é alto. Ainda, na área possível de ser atingida pela onda de cheia, existem residências, escolas, comércios e indústrias. Nesses locais, as pessoas não estão seguras dentro das edificações, porque têm alta possibilidade de serem destruídas devido à velocidade e profundidade da onda de cheia.

A Política Nacional de Segurança de Barragem (Lei nº 12.334/2010) no Brasil exige para a construção de algumas barragens um plano de ação de emergência (PAE), que não aborda o mapeamento de vulnerabilidade da região a jusante. Porém, o estudo demonstrou que o índice de vulnerabilidade influencia no cálculo do índice de risco de inundação, devido ao rompimento da barragem, pois considera na sua determinação fatores socioeconômicos da região afetada. Portanto, o mapeamento de índice de vulnerabilidade se mostra uma importante ferramenta para identificar os locais prioritários para a implementação de políticas públicas e ações de prevenção e mitigação em situações de emergência no caso de rompimento de barragens.

O mapeamento de risco é de extrema importância para identificar de forma especializada a propagação da onda de cheia devido ao possível rompimento da barragem do rio São Bento, uma vez que leva em consideração a profundidade e a velocidade da água, bem como a vulnerabilidade das pessoas que moram a jusante da barragem.

Os desastres relacionados com rompimento de barragens acontecem quase todos os anos no Brasil. Assim, metodologias de baixo custo, como o mapeamento de risco, podem ser adotadas como medida de prevenção. Além desse aspecto, esse mapa pode auxiliar na elaboração de um plano de ação emergencial, bem como um instrumento de educação para as comunidades e para o planejamento territorial, para futuras construções e infraestruturas urbanas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar as variáveis utilizadas para calcular o índice de vulnerabilidade, analisando as relações destas com o índice de risco e de perigo, para verificar quais influenciam significativamente nestes cálculos. Também recomenda-se realizar a simulação do rompimento hipotético dos diques primário e secundário do reservatório da barragem do rio São Bento e avaliar o comportamento da onda de cheia, no caso destes apresentarem falha na sua estrutura.

AGRADECIMENTOS

À Engenheira Sanitarista e Ambiental Fabiane Andressa Tasca Goerl – Gerente Universidade Corporativa – CASAN – Companhia Catarinense de Águas e Saneamento pela disponibilização dos dados referente a barragem do rio São Bento.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J.L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

AMARAL, G. L. Análise das diferentes formulações de parâmetros definidores da formação da brecha de ruptura de uma barragem: avaliação das variações nos hidrogramas de ruptura. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Vitória da Conquista, 2019.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 21 de março de 2020.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – Volume IV – Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE. Brasília – DF, 2016.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Relatório de Segurança de Barragens 2020. Brasília – DF, 2021.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb>. Acesso em: 21 de março de 2020.

ANDRADE, M. M. N. De; ANDRADE, Á. de S.; BEZERRA, P. E. S. Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais no estado do Pará (Brasil). *Revista Desarrollo Local Sostenible*, v. 30, p. 1–9, 2017.

ARAUJO, T.A.; BARTH, J.F.; CRUZ, J.C. Aspectos técnicos de barragens. In/CRUZ, J.C. e SILVEIRA, G.L. Seleção ambiental de barragens: análise de favorabilidades ambientais e escala de barragens. 2 e. rev. amp. Santa Maria, RS. Ed. UFSM, Porto Alegre, RS-ABRHidro, cap. 7, p. 275-350, 2019.

ARMADA, C.A.S. Os desastres ambientais de Mariana e Brumadinho em face ao estado socioambiental Brasileiro. *Territorium: Revista Internacional de Riscos*, n.28 (I), p. 13-22, 2021.

BACK, Á. J. Informações climáticas e hidrológicas dos municípios catarinenses (com programa HidroClimaSC). Florianópolis: Epagri, 2020. 157p.

BACK, Á. J; POLETO, C. Distribuição espacial e temporal da erosividade das chuvas no estado de Santa Catarina, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 22, p.381-403, 2018.

BRASIL. Decreto Nº 7.257, de 4 de agosto de 2010. Regulamenta a Medida Provisória no 494 de 2 de julho de 2010, para dispor sobre o Sistema Nacional de Defesa Civil - SINDEC, sobre o reconhecimento de situação de emergência e estado de calamidade pública, sobre as transferências de recursos para ações de socorro, assistência às vítimas, restabelecimento de serviços essenciais e reconstrução nas áreas atingidas por desastre, e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.

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, 2010.

BRITO, T. R. R. L. Modelagem hidrológica e hidráulica a partir de dados TRMM aplicada a análise de risco em áreas inundáveis: estudo de caso do município de Atalaia. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

CASAN - COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO. Manual de operação do reservatório: barragem do rio São Bento. 2003.

CASAN - COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO. Programa de gerenciamento de risco da barragem São Bento. 2004.

CHOW, V. T. Open-channel hydraulics. New York, McGraw-Hill, 1959. 680 p.

CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Resolução nº 143 de 10 de julho de 2012. Publicada no Diário Oficial da União em 04/09/2012.

COSTA, P. R. Processos hidrológicos aplicados ao controle hidráulico-operacional de reservatórios de acumulação de água: o caso da barragem do rio São Bento – SC. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2008.

DEBORTOLI, N. S. et al. An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. *Natural Hazards*, v. 86, n. 2, p. 557–582, 2017.

ESRI. Classifying Numerical Fields for Graduated Symbolology. Disponível em: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/map/working-with-layers/classifying-numerical-fields-for-graduated-symbols.htm>. Acesso em: 26 de abril de 2021.

FERLA, R. Metodologia simplificada para análise de aspectos hidráulicos em rompimento de barragens. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

GOERL, R.F. Estudo de inundações em rio Negrinho – SC sob a ótica dos desastres naturais. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

GOERL, R.F.; KOBIYAMA, M.; PELLEIN, J.R.G.M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: Estudo de caso do município de Rio Negrinho - SC. *Boletim de Geografia, Maringá*, v. 30, n.1, p. 81-100, 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Malhas digitais - Censo 2010 - Unidades censitárias. Disponível em: http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm. Acesso em: 12 de março de 2021.

JUNG, C. G.; KIM, S. J. Comparison of the Damaged Area Caused by an Agricultural Dam-Break Flood Wave Using HEC-RAS and UAV Surveying. *Agricultural Sciences*, v. 8, p.1089-1104, 2017.

KOHLER, A.; JÜLICH, S.; BLOEMERTZ, L. Risk Analysis – a basis for disaster risk management. *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)*, Eschborn, 2004. 76p.

KUHLKAMP, J. F. Análise do efeito em cascata da propagação da onda de cheia gerada pelo rompimento hipotético de uma das barragens existentes no rio Irani-SC. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

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

LEOUL, A.; KASSAHUN, N. Dam Breach Analysis Using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: The Case of Kesem Kebena Dam. *Open Journal of Modern Hydrology*, v. 9, p.113-142, 2019.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas - Coleção 5 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. Disponível em: <http://mapbiomas.org>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2021.

MARANGONI, T. T.; SANTINI JUNIOR, M. A.; OLIVEIRA, J. N. A utilização do HEC-RAS para determinar a cota de inundação na ruptura hipotética de uma barragem - estudo de caso da PCH Salto Burity. *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Florianópolis, 2017.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBIYAMA, M. Mapeamento de risco de desastres naturais do estado de Santa Catarina. *Caminhos da Geografia (UFU)*, Uberlândia, v. 7, n. 17, p. 72-84, 2006.

MING, L. Sistema computacional para previsão de inundações: aplicação à bacia hidrográfica do rio São Bento - SC. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MONTE, B. E. O.; GOLDENFUM, J. A.; MICHEL, G. P.; CAVALCANTI, J. R. A. Terminology of natural hazards and disasters: A review and the case of Brazil. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 52, 2021.

MONTE, B. E. O.; TSCHEDER, A. DA F.; GOLDENFUM, J. A. Índice de risco aplicado a potencial rompimento de barragem por simulações 1d e 2d. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, 2017.

MONTEIRO, L. R.; KOBİYAMA, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. *Revista REGA- Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 10, n. 2, p. 13-25, 2013.

MONTEIRO, L. R.; SANTOS, C. I.; KOBİYAMA, M.; CORSEUIL, C. W.; CHAFFE, P. L. B. Effects of return periods on flood hazard mapping: an analysis of the UFSC Campus Basin, Florianópolis city, Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 26, n. 9, p. 1-13, 2021.

MOREIRA, L. L.; KOBİYAMA, M. Panorama de estudos sobre índice de vulnerabilidade às inundações no Brasil através de revisão bibliográfica. *Revista Caminhos de Geografia*, v. 22, n. 79, p. 309-320, 2021.

MOTA, K. R. R. Rompimento hipotético e delimitação da área de inundação da barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

NETO, A. R.; FERREIRA, L.; BATISTA, D. R.; COUTINHO, R. Q. Metodologias para Geração de Mapa de Indicadores de Perigo e Áreas Inundáveis: Município de Ipojuca/PE. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 2, p. 377-390, 2016.

PREVENE. Contribution to "Natural" Disaster Prevention in Venezuela. Cooperation: Venezuela – Switzerland – PNUD. 2001.

REIS, J.T.; KOBİYAMA, M.; ZAMBRANO, F.C.; MICHEL, G.P. Correlação das variáveis para mapeamento de vulnerabilidade aos desastres hidrológicos no Arroio Forromeco-RS. *Ciência e Natura*, v.38, n.3, p.1361–1371, 2016.

SCHWALM, H. Geoprocessamento aplicado à análise ambiental: estudo de caso da barragem do rio São Bento, Siderópolis, Santa Catarina. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2008.

SDE – SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL. Aerofotogrametria 2010. Disponível em: <http://sigsc.sc.gov.br/download/index.jsp>. Acesso em: 12 de maio de 2020.

SILVA, M. F. Análise espacial dos impactos socioambientais provocados pelo rompimento de duas barragens de rejeitos de mineração: Fundão, na cidade de Mariana e Córrego do Feijão, no município de Brumadinho (Minas Gerais – Brasil). *Territorium: Revista Internacional de Riscos*, n.28 (I), p. 67-92, 2021.

SMITH, G., DAVEY, E., COX, R. (2014). Flood hazard (WRL Technical Report 2014/07). Sydney: UNSW.

SOUZA, V. R.; GAVENAGHI, S.; ALVES, J. E. D. Mapeamento dos óbitos por local de ocorrência dos acidentes de trânsito na cidade do Rio de Janeiro. *Anais do XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais*. Caxambu: ABEP, 2006.

STEPHENSON, D. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. *Urban Water* v. 4, p.425-430, 2002.

TSCHIEDEL, A. F. Avaliação de fontes de incerteza em estudos de rompimentos de barragens. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

UNDP - United Nations Development Programme. Reducing Disaster Risk: a Challenge for Development. New York, 2004.

UNISDR. Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction United Nations General Assembly. Genebra. Disponível em: https://www.preventionweb.net/files/50683_oiewgreportenglish.pdf. Acesso em: 24 de junho de 2021.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS River Analysis System, User's Manual. Hydrologic Engineering Center, Version 5.0, Davis, 2016.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Using HEC-RAS for Dam Break Studies. Hydrologic Engineering Center, Davis, 2014.

VEIZAGA, F. M.; DE PAES, R. P.; ELEUTÉRIO, J. F.; ROCHA, F.; PALMIER, L. R. Modelagem hidráulica de inundação e estimativa de danos diretos causados por rompimento real da barragem São Francisco, Mirai, Minas Gerais. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, p. 1–8, 2017.

VERÓL, A. P. Simulação da propagação de onda decorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

VISCHER, D. L.; HAGER, W. H. Dam Hydraulics. Zürich: John Wiley E Sons Ltd, 1997. 316 p.

WISNER, B.; BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. At Risk Natural hazards, people's vulnerability and disasters. Second ed. London, 2004.

XIONG, Y. A Dam Break Analysis Using HEC-RAS. Journal of Water Resource and Protection, p. 370–379, 2011.

Afiliação dos Autores

Alves Junior, F. M. - Engenheiro Civil na Salvador Engenheiros Associados, Criciúma (SC), Brasil.
Kobiyama, M. - Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brasil.
Corseuil, C.W - Professor da Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá (SC), Brasil.

Contribuição dos Autores

Alves Junior, F. M. - O autor propôs a pesquisa, coletou dados e analisou os dados.
Kobiyama, M. - O autor revisou as análises e auxiliou na redação e revisão dos resultados.
Corseuil, C.W - O autor propôs a pesquisa, analisou os dados, revisou as análises e auxiliou na redação e revisão dos resultados.

Editores Responsáveis

Jader de Oliveira Santos
Lidriana de Souza Pinheiro