

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

COMPARAÇÃO ENTRE TOPOGRAFIAS PARA A DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE INUNDAÇÃO EM CASOS DE RUPTURA DE BARRAGENS.

ESTUDO DE CASO: BARRAGEM DA PAMPULHA

Thiago Vieira Matos¹ & Adolfo Pedro de Resende²

RESUMO

Os estudos de ruptura hipotética de barragens são ferramentas importantes para entender qual a região atingida, caso um evento dessa magnitude ocorra. Tais estudos possuem uma série de incertezas inerentes ao seu desenvolvimento, podendo ser citados: a geometria da brecha, a fração do volume propagado, no caso de barragens de rejeito, topografia utilizada, etc. A topografia utilizada nas simulações possuem grande influência nos resultados finais encontrados, assim é válido a realização da comparação entre algumas topografias gratuitas, mais especificamente, SRTM, ASTER e ALOS PALSAR, com o tratamento através da ferramenta *stream* do software ArcGIS. Foi selecionada a barragem da Pampulha para a realização das simulações, pois na região a jusante da mesma existe um levantamento de boa resolução, realizado pela PRODABEL. Neste trabalho é realizada uma comparação entre os resultados encontrados com várias topografias gratuitas, com e sem tratamento no software ArcGIS, para avaliação da área de inundação decorrente de uma eventual ruptura da barragem da Pampulha.

ABSTRACT

The dam break studies are important tools to estimate the affected areas if this type of collapse occurs. This kind of study has a lot of uncertainties, such as the breach geometry, the material volume released for downstream in the case of tailings dams, the quality of topographic data, etc. The topography used in the simulations has a great influence on the final results, so it is valid to evaluate some free topographies, like SRTM, ASTER and ALOS PALSAR, with some kind of treatment with the ArcGIS software stream tool. The Pampulha dam was selected as case study, because good resolution topography is available for this area, carried out by PRODABEL. In this work a comparison between the results found with several free topographies, with and without treatment in the ArcGIS software, is carried out to evaluate the flood area due to an eventual collapse of the Pampulha dam.

Palavras-Chave – Estudos de ruptura de barragens, modelos digitais de elevação, barragem da Pampulha

1) WALM Engenharia, Rua Antônio de Albuquerque, 156, 13 andar, Funcionários, Belo Horizonte-MG, 31 3234-4003, thiago.matos@walmengenharia.com.br / t.agovieira@gmail.com

2) WALM Engenharia, Rua Antônio de Albuquerque, 156, 13 andar, Funcionários, Belo Horizonte-MG, 31 3234-4003, adolfo.resende@walmengenharia.com.br / adolfo.resende@hotmail.com

INTRODUÇÃO

Desde o início da humanidade estruturas destinadas ao armazenamento de água sempre possuíram importância no cotidiano do homem. Inicialmente usadas para o abastecimento e irrigação, estas estruturas foram ganhando mais funcionalidades no avançar dos tempos. Controle de cheias, geração de energia, navegação, lazer e contenção de rejeitos de mineração são exemplos de funções que foram agregadas a elas. Desta forma, as barragens começaram a serem construídas com dimensões elevadas, pois assim, um melhor aproveitamento dos recursos naturais seria possível.

A ampliação das dimensões das estruturas aumenta proporcionalmente os prejuízos causados em função de uma possível ruptura. A realização de estudos de ruptura hipotética se torna uma ferramenta extremamente importante para possibilitar a atuação dos órgãos competentes na tentativa para minimizar os problemas decorrentes de um evento dessa magnitude.

Um estudo de ruptura hipotética de barragens possui inúmeras incertezas inerentes ao seu desenvolvimento. Uma das principais é a topografia utilizada na região a jusante da estrutura analisada no caso da realização de uma simulação bidimensional ou tridimensional.

Visando verificar a influência da topografia utilizada na região a jusante de barragens, o presente trabalho realizou uma comparação de resultados de simulação com topografias de bases distintas. Foi comparado os resultados de simulações tendo como base topográfica levantamento de alta precisão realizado pela PRODABEL para toda a cidade de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais. As outras topografias utilizadas foram àquelas disponibilizadas de forma gratuita, sendo elas: ALOS PALSAR, SRTM, ASTER. Dentre essas a ALOS PALSAR possui precisão espacial de 12,5 x 12,5 m, enquanto as demais possuem quadrantes de 30 x 30 m.

A área de estudo selecionada para comparação entre os locais atingidos foi a barragem da Pampulha, localizada em Belo Horizonte, estado de Minas Gerais. Para as topografias gratuitas foi realizado um tratamento no software ArcGIS com a ferramenta *stream*, que permite a inserção do curso d'água na geração da topografia resultante. Assim os resultados finais foram comparados entre si para verificar a diferença encontrada entre topografias de diferentes resoluções, além da influência do tratamento com a ferramenta *stream* do ArcGIS.

O hidrograma de ruptura foi gerado a partir da formulação de Froehlich (2016) e a modelagem realizada de forma bidimensional no software HEC-RAS, amplamente indicado na literatura para a simulação de eventos da magnitude igual (WASHINGTON, 2007; COLORADO, 2010). Ressalta-se que não foram levadas em conta as incertezas dos outros parâmetros necessários para a realização de estudos de ruptura hipotética, a saber: parâmetros de formação da brecha, coeficiente de rugosidade de Manning, bem como a porcentagem de volume propagada para jusante, pois a barragem da Pampulha se encontra em elevado grau de assoreamento. Grande parte das informações necessárias

para a realização do estudo foram retiradas do estudo de Vianini Neto (2016), em que o mesmo realizou a retroanálise da ruptura ocorrida na barragem da Pampulha no ano de 1954, além de efetuar a simulação para a ruptura atual da mesma.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Histórico de ruptura de barragens

As diferentes maneiras de ocorrência de colapso em barragens têm sido coletadas desde a década de 1850. Por mais que tenha ocorrido o avanço tecnológico dos métodos de construção, operação e manutenção dessas estruturas ainda podem ser observados vários eventos de ruptura de barragens pelo Brasil e pelo mundo, podendo citar mais recentemente as barragens de Mount Poley, em 2014 no Canadá; Fundão e barragem I, em 2015 e 2019, respectivamente, no Brasil.

ICOLD (1995) indica que casos de ruptura de barragens de terra e/ou enrocamento são mais prováveis de acontecer quando comparados aos casos de barragens de concreto; essa conclusão foi determinada pela análise de casos de colapso desse tipo de estrutura, sendo que 65% dos mesmos foram em maciços de terra e/ou enrocamento. Esse número seria de 7% em barragens de concreto. Uma explicação apresentada por Serafim (1981) *apud* Collischonn (1997) é o maior número de estruturas de terra comparado àquele de estruturas de concreto. Contudo, quando é observado o número proporcional de rupturas nesses dois tipos de estruturas, as probabilidades de falha são próximas.

Estudos de ruptura de barragens

O desenvolvimento de estudos de ruptura hipotética de barragens pode ser dividido em etapas, sendo: a escolha do modo de ruptura e desenvolvimento da brecha, definição do hidrograma de ruptura, propagação do hidrograma gerado e, por fim, estimativa do potencial decorrente da onda de cheia a ruptura. As incertezas inerentes em todas as etapas desse tipo de estudo são elevadas.

O modo de falha escolhido foi o piping e os parâmetros de formação da brecha foram calculados seguindo a proposição de Froehlich (2016). A Equação 1 e 3 apresentam as equações desenvolvidas pelo autor para a determinação da largura média e do tempo de formação da brecha, respectivamente.

$$B_m = 0,28 * k_m * k_h * V_w^{\frac{1}{3}} * W_m^{-\frac{1}{6}} * H_b^{\frac{1}{6}} \quad (1)$$

$$k_h = \begin{cases} \left(\frac{H_b}{H_s}\right)^{\frac{1}{2}}, & \text{quando } H_b < H_s \\ 1,0, & \text{quando } H_b \geq H_s \end{cases} \quad (2)$$

$$t_f = 50 * \sqrt{\frac{V_w}{gH_b^2}} * \left(\frac{W_m}{H_b}\right)^{1/4} \quad (3)$$

Em que: B_m = largura média da brecha, em m; k_m = coeficiente que depende do tipo de ruptura; caso a mesma seja por galgamento o seu valor é igual a 1,5, mas quando a falha ocorre por erosão interna

o seu valor é igual a 1,0; V_w = volume de água acima do fundo da brecha, em m^3 ; W_m = largura média do maciço, em m; H_b = altura da brecha, em m; H_s = constante igual a 6,1 m quando o cálculo é feito adotando-se o Sistema Internacional de unidades; t_f = tempo de formação da brecha, em horas; e g = aceleração da gravidade, em m/s^2 .

A inclinação dos lados dos taludes da brecha pode ser considerada constante para casos de erosão interna como 0,6H:1,0V.

Tschiedel & Paiva (2018) realizaram diversas simulações para avaliar as incertezas dos parâmetros necessários em estudos de ruptura hipotética de barragens. Os autores estudaram dois cenários com características distintas, tanto na estrutura como no vale a jusante, um considerando o vale a jusante encaixado e íngreme e outro com o vale mais plano e aberto. Os mesmos indicaram que a topografia utilizada possui certa influência nos resultados finais nesse tipo de estudo.

Modelos Digitais de Terreno

Os modelos digitais de elevação (MDEs) são importantes ferramentas para a modelagem hidráulica e as informações disponíveis são as maiores fontes de incertezas em estudos que necessitam de modelagem hidráulica, caso de um estudo de ruptura hipotética de barragem.

Fraser & Ravanbakhsh (2011) mostram que a limitação do uso dos MDEs é justamente referente à qualidade dos dados levantados, que depende do modo de aquisição, seu tratamento e das características da região de interesse. Levantamentos realizados a partir de imagens de satélite possuem menor precisão e maiores erros associados quando comparados com os obtidos a partir do uso dos sistemas LiDAR (*Light Detection And Ranging*) e IfSAR (*Interferometric synthetic aperture radar*).

No site do USGS se encontra o projeto *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), sendo bastante usado por ser uma base gratuita para buscar os MDEs. O SRTM foi concebido em fevereiro de 2000, cobrindo uma área de 85% de toda a superfície da Terra. O ASTER (*Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) GDEM (*Global Digital Elevation Model*) é um modelo com resolução espacial de 30 m desenvolvido por estereofotogrametria. O ALOS PALSAR foi uma missão lançada pela agência espacial japonesa no ano de 2006, a partir dos dados do satélite foram disponibilizados arquivos com resolução de 12,5 m.

Os modelos digitais de terreno (MDT), em sua maioria, são formados a partir de curvas de nível ou levantamentos de campo por GPS onde são demarcados pontos específicos para melhor representação da região analisada. Um modo alternativo de geração de MDTs é o sistema LASER SCANNING, que possibilita a determinação de uma nuvem de pontos com as coordenadas X, Y e Z (VIANINI NETO, 2016). O último sistema foi aquele usado pela PRODABEL para determinação da topografia da cidade de Belo Horizonte.

Área de estudo

A estrutura escolhida para o desenvolvimento do trabalho foi a barragem da Pampulha, localizada em Belo Horizonte-MG.

Vianini Neto (2016) indica que, atualmente, a lagoa da Pampulha se encontra em elevado grau de assoreamento, indicando um volume de sedimentos na lagoa de aproximadamente 10 Mm³ (estimativa realizada de acordo com a curva cota-volume levantada pela SUDECAP/Consominas Engenharia em 2014), uma porcentagem relevante do seu volume total, estimado pelo autor em 20 Mm³. O elevado grau de assoreamento poderia representar uma dificuldade no escoamento do material do reservatório, contudo será adotada a premissa indicada por Vianini Neto (2016), que considerou o fluido como newtoniano e uma porcentagem de material propagada igual a 50%.

Na Figura 1 é apresentada a curva cota volume da barragem da Pampulha utilizada por Vianini Neto (2016), que será a mesma usada no presente estudo.

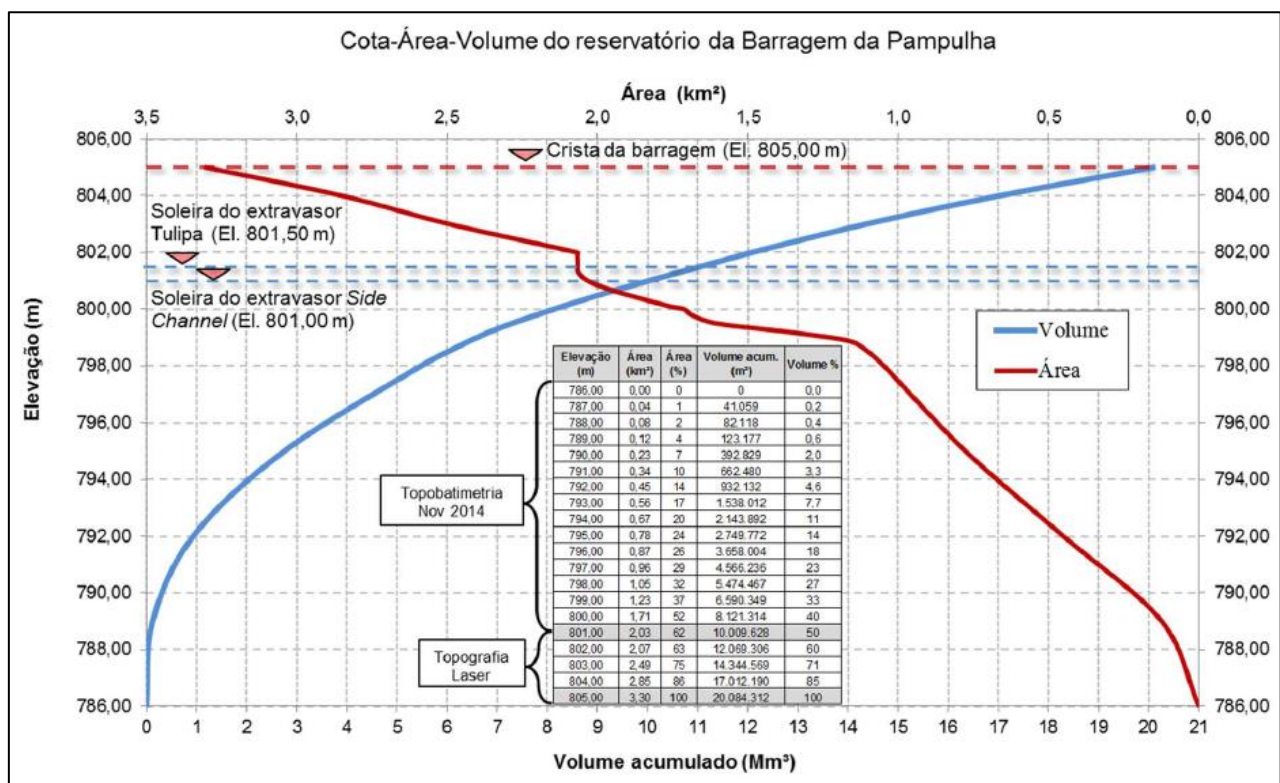


Figura 1 – Curva cota volume da barragem da Pampulha

Fonte: Vianini Neto (2016)

Para maiores informações sobre a barragem da Pampulha e o evento de ruptura ocorrido em 1954 é recomendada a leitura do trabalho de Vianini Neto (2016).

METODOLOGIA

No presente capítulo serão elencadas as etapas da metodologia adotada para a comparação entre os resultados encontrados para as diferentes topografias utilizadas nas simulações realizadas no software HEC-RAS.

Os parâmetros de formação da brecha adotados foram encontrados a partir da formulação de Froehlich (2016). O coeficiente de rugosidade adotado foi constante e igual a 0,30, tal valor é elevado para representar o material sólido presente no volume que será propagado.

O modo de falha escolhido foi a erosão interna e o nível de água considerado foi no nível máximo operacional (Elevação 801,00 m). O hidrograma de ruptura resultante foi elaborado utilizando o modelo paramétrico HEC-RAS, que permite a inserção da estrutura na simulação e consequentemente a sua propagação. Para evitar diferenças entre os hidrogramas de ruptura para cada simulação foi desenvolvido um hidrograma com a topografia disponibilizada pela PRODABEL e esse foi utilizado nas simulações das topografias gratuitas. O trecho de propagação selecionado foi por volta de 4 km, que é a parte do ribeirão Pampulha em calha natural. A Figura 2 ilustra o trecho escolhido para propagação.



Figura 2: Vista da área de propagação da onda de ruptura

Fonte: VIANINI NETO (2016)

O modelo HEC-RAS necessita de condição de contorno de montante e jusante para a realização da modelagem. Como indicado anteriormente a condição de montante para a simulação com a topografia de melhor resolução foi o próprio reservatório da barragem e a condição de contorno de jusante foi a declividade do trecho final de simulação, estimado em aproximadamente 0,002 m/m.

Para as topografias gratuitas foi realizada a inserção do ribeirão Pampulha nos arquivos a partir da ferramenta *stream*, do software ArcGIS, para verificar qual a diferença entre as áreas de inundação encontradas.

A variável comparada foi somente a área de inundação encontrada, não sendo realizada avaliação de outras variáveis de interesse em estudos de ruptura.

RESULTADOS

As manchas de inundação determinadas no modelo HEC-RAS e a comparação entre as áreas encontradas, para as topografias com a inserção do stream e sem tal inserção estão ilustradas na Figura 3 e Figura 4, respectivamente.

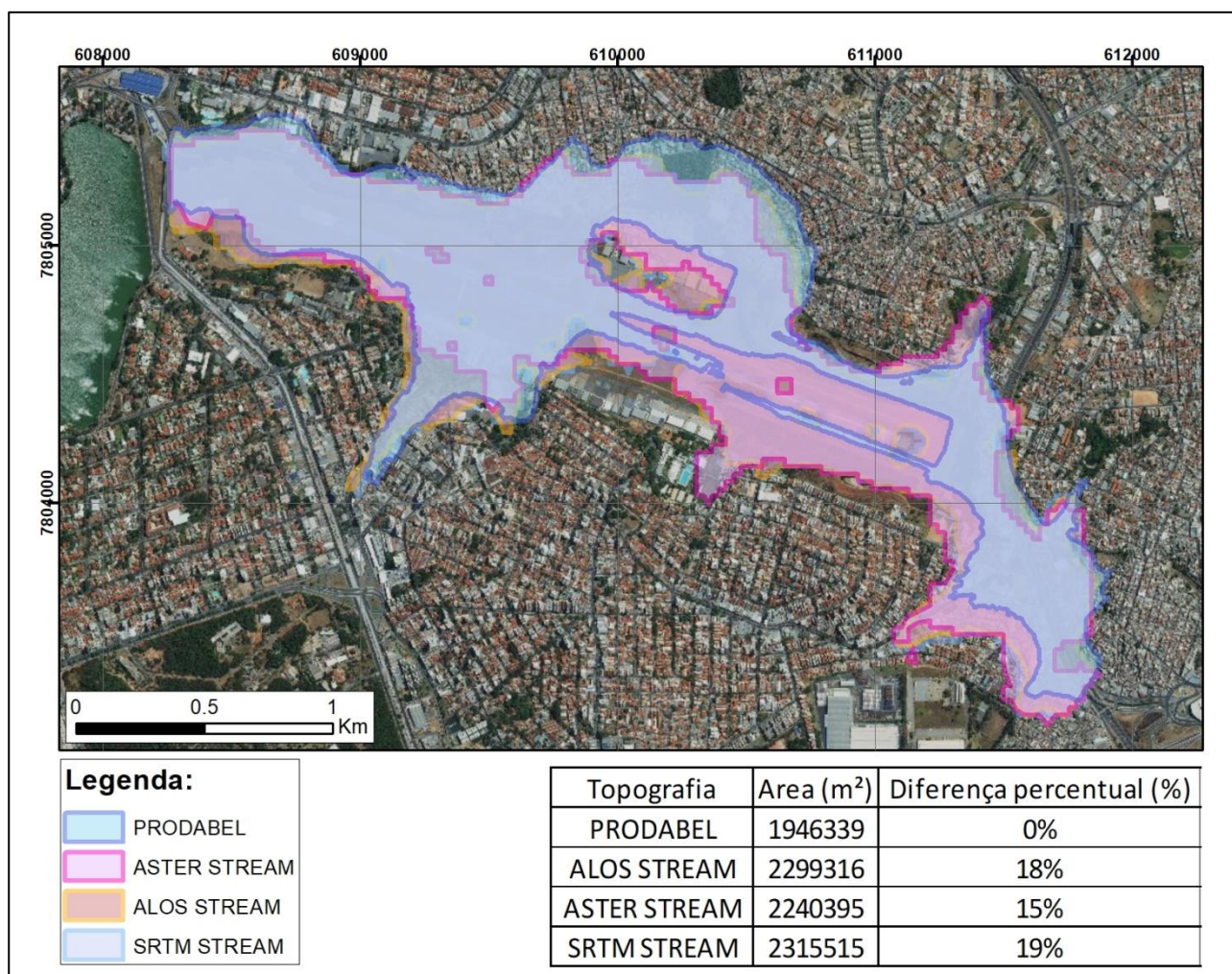


Figura 3: Comparação entre as manchas de inundação encontradas para as topografias com a inserção do stream

Pode ser observado na Figura 3 e na Figura 4 que as topografias gratuitas sempre apresentam uma área de inundação maior que a topografia levantada pela PRODABEL. As diferenças encontradas ficam entre 15 e 19% para as topografias com a inserção do *stream*, enquanto que para a topografia sem tal tratamento as diferenças encontradas ficaram entre 22 e 29%.

Esse fato indica que a inserção de um caminho preferencial de escoamento, como ocorre quando o *stream* é inserido, apresenta resultados mais próximos daqueles encontrados sem tal tratamento. Contudo sempre a mancha de menor resolução apresentou valores maiores de áreas inundadas.

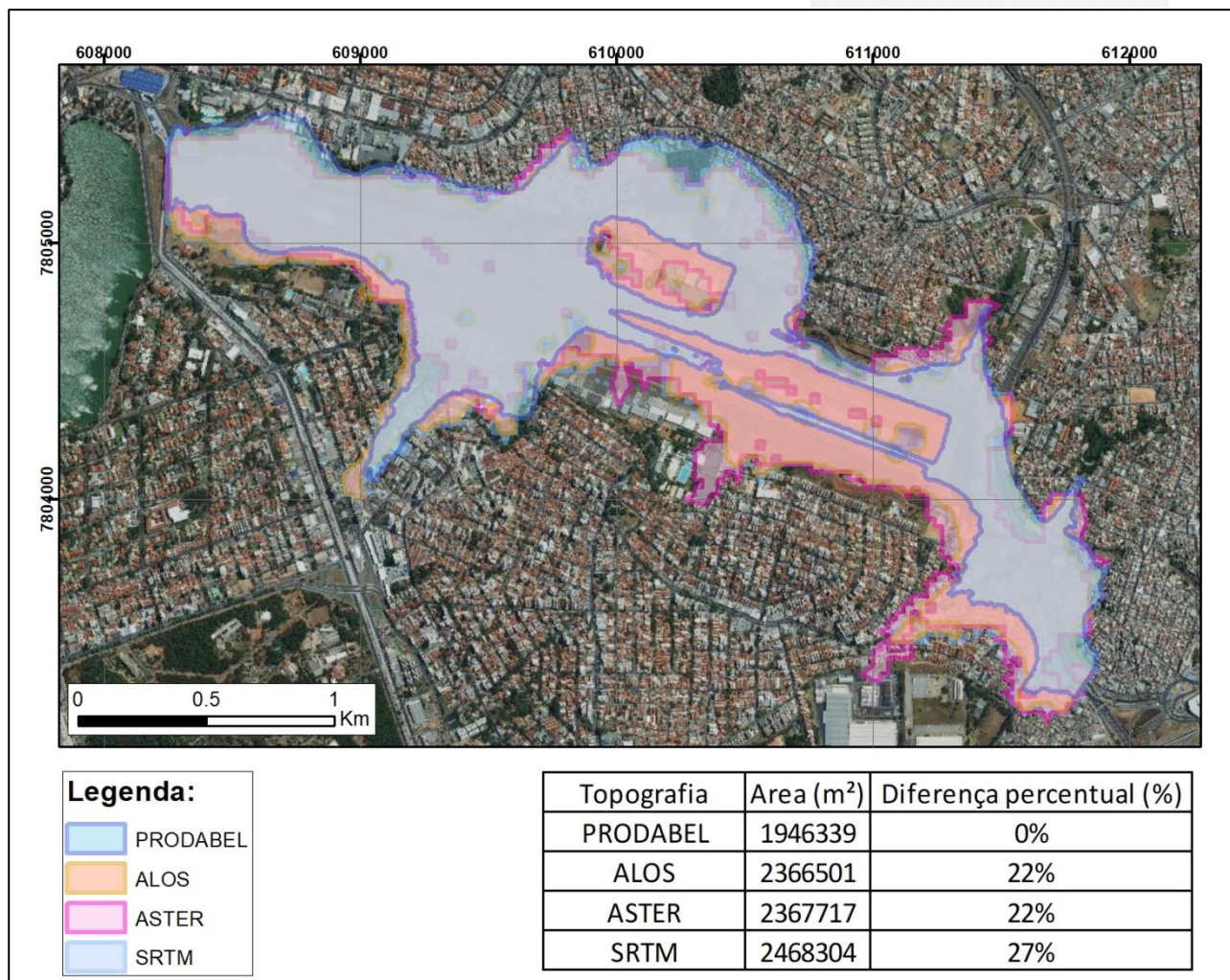


Figura 4: Comparação entre as manchas de inundação encontradas para as topografias sem a inserção do stream

Por fim, apenas a topografia da PRODABEL não atingiu completamente a área da pista do aeroporto da Pampulha, ou seja, caso o estudo fosse feito apenas com as topografias gratuitas a aeroporto seria completamente atingido pela eventual ruptura da barragem da Pampulha.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo indica considerável variação entre os resultados com topografias de diferentes resoluções. Assim pôde ser verificada qual a influência de topografias com baixa resolução com e sem a inserção da ferramenta *stream* na região de propagação definida. Tais topografias foram comparadas com uma topografia de alta resolução levantada pela PRODABEL.

As topografias de baixa resolução sempre apresentaram áreas inundadas maiores que a simulação realizada com a topografia de alta resolução.

Ressalta-se que não foram comparadas outras variáveis de interesse em estudo de ruptura, como a profundidade de escoamento e tempo de chegada da onda de ruptura, sendo avaliada somente a área de inundação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a WALM Engenharia e Tecnologia Ambiental pelo incentivo na pesquisa sobre o desenvolvimento de estudos de ruptura hipotética de barragens, visando sempre estar em contato com os novos métodos que surgem na literatura.

REFERÊNCIAS

SERAFIM, J. L. (1981) *Safety of dams judged from failures*. Water Power and Dam Construction. v. 33, Sutton, p. 32-35.

ICOLD. (1995) *Dam failures statistical analysis*. Bulletin 99. Paris, 63 p.

COLLICHONN, W. (1997) *Análise do rompimento da Barragem de Ernestina*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 203 p.

WASHINGTON (MGS Engineering Consultants) (2007) *Dam Safety Guidelines, Technical Note 1: Dam Break Inundation Analysis and Downstream Hazard Classification*, Washington State Department of Ecology Publication, No. 92-55E (revised), Washington, 34 p., 2007.

COLORADO, STATE OF. (2010) *Guidelines for Dam Breach Analysis, Office of the State Engineer Dam Safety Branch*, Departamento de Recursos Naturais do Estado do Colorado, Estados Unidos, Colorado, 68 p.

FRASER, C.; RAVANBAKHS, M. (2011) *Performance of DEM Generation Technologies in Coastal Environments*, 7th International Symposium on Digital Earth, Perth-Australia, p. 40-49.

FROELICH, D. C. (2016) *Empirical Model of Embankment Dam Breaching*, The International Conference on Fluvial Hydraulics, Saint Louis, 8 p.

VIANINI NETO, L., (2016) *Estudo de ruptura da barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: Retroanálise da Brecha do Acidente de 1954 e Ruptura hipotética na Condições Atuais*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 247 p.

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