

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA BASE TOPOGRÁFICA NA PROPAGAÇÃO DA CHEIA INDUZIDA PELA RUPTURA DE BARRAGENS

Karina Thomé Ramalho¹; Candice Schauffert Garcia²; Laertes Munhoz da Cunha³; Guilherme Rocha Peplau⁴ & Wesley Leonel de Souza⁵

RESUMO – O conhecimento prévio da área com risco potencial de danos, devido a ruptura de uma barragem, é uma condição importante para a preservação da vida e do meio ambiente. Modelos hidrodinâmicos auxiliam na determinação dessas áreas e na compreensão do processo de propagação da onda de enchente. Para estudos dessa natureza, torna-se necessária a caracterização topográfica da área de estudo, podendo esta ser obtida por diversos métodos, com precisões e custos variados. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar a influência dos dados cartográficos de elevação do terreno na determinação da área de inundação e na propagação da onda de enchente causada pela ruptura de uma barragem, considerando três alternativas de modelo digital do terreno (MDT), obtidos através de métodos diferentes. O estudo é parte integrante do projeto “Elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE) para compor o Plano de Segurança das Barragens e Usinas Hidrelétricas da CHESF”, desenvolvido pela empresa RHA Engenharia e Consultoria, em Consórcio com a Hiparc Geotecnologia, em atendimento à demanda da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF. As simulações foram realizadas para a UHE Sobradinho, localizada no estado da Bahia, cerca de 40 km a montante das cidades de Juazeiro/BA e Petrolina/PE.

ABSTRACT– The previous intelligence of the area in potential hazard due to a dam collapse is an important resource to life and environmental preservation. Hydrodynamic models help the determination of these areas as well as the understanding of the flood process. Knowing the topographic features of the concerned area is crucial for the intended studies, this can be obtained through methods of varied costs and precision. In this context, the aim of these works was to analyse the influence of cartographic data of terrain height over the determination of the flood area and the wave expanse due to a dam break, considering three digital terrain modelling (DTM) alternatives, these obtained through different methods. The study is part of the project "Elaboration of Emergency Response" (EER) to integrate the "CHESF Safety Plan for Dams and Hydroelectric Power Plants", developed by RHA Engenharia and Consultoria and Hiparc Geotecnologia for the Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF). The simulations were executed for the UHE Sobradinho, in the state of Bahia, approximately 40 km downstream from the towns of Juazeiro-Bahia and Petrolina-Pernambuco.

Palavras-Chave – simulação hidrodinâmica, ruptura de barragens e área de inundação

¹ RHA Engenharia e Consultoria: R. Voluntários da Pátria 400, 14º andar, Curitiba/PR, (41) 3232-0732. karina.ramalho@rhaengenharia.com.br

² RHA Engenharia e Consultoria: R. Voluntários da Pátria 400, 14º andar, Curitiba/PR, (41) 3232-0732. csgarcia@rhaengenharia.com.br

³ RHA Engenharia e Consultoria: R. Voluntários da Pátria 400, 14º andar, Curitiba/PR, (41) 3232-0732. lmunha@rhaengenharia.com.br

⁴ CHESF: Rua Delmiro Gouveia, 333 - San Martin – Recife/PE, (81) 3229-3485. gpeplau@chesf.gov.br

⁵ RHA Engenharia e Consultoria: R. Voluntários da Pátria 400, 14º andar, Curitiba/PR, (41) 3232-0732. wlsouza@rhaengenharia.com.br

1. INTRODUÇÃO

A história das barragens, com todos seus benefícios e acidentes, fez com que fossem criadas normas regulamentadoras para prevenção de acidentes e mitigação dos danos humanos e materiais. Dentre elas tem-se a Lei 12.334/2010 - Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), as resoluções 143/2012 e 178/2016 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), a resolução 236/2017 da Agência Nacional de Águas (ANA) e algumas resoluções e portarias das entidades reguladoras estaduais.

A Lei nº 12.334/2010 estipula, como um dos seus instrumentos, a elaboração do Plano de Segurança de Barragem, no qual está inserido o Plano de Ação de Emergência (PAE), que define e estabelece as ações a serem executadas em caso de situações de emergência, tais como a ruptura da barragem ou a ocorrência de uma cheia excepcional.

No Brasil chama a atenção o número de barragens rompidas nos últimos anos, principalmente no estado de Minas Gerais, onde sete barragens ruíram, sendo seis delas nos últimos 15 anos: Barragem da Pampulha em 1954, Barragem de Fernandinho em 1986, Barragem de Macacos em 2001, Barragem em Cataguases em 2003, Barragem de Herculano em 2014, Barragem de Fundão em 2015 e, recentemente, Barragem da Mina do Feijão em 2019.

Além desses rompimentos, citados em Minas Gerais, podemos destacar os acidentes com a Barragem de Orós no rio Jaguaribe (1960), UHE Euclides da Cunha e UHE Limoeiro no rio Pardo (1977), Barragens de rejeitos de mineração no rio Verde (2001), Barragens de rejeitos no rio Pomba (2003) e Barragem Camará (2004).

As consequências decorrentes de acidentes com barragens apresentam categorias de riscos e de gravidade de grandes proporções, sendo de fundamental importância o conhecimento prévio das áreas potencialmente afetadas, representadas em um mapa de riscos, que serve de base a tomada de decisão para atendimento às estratégias de proteção previamente definidas.

A avaliação da propagação da onda de cheia e dos mapas de inundação pode ser realizada a partir da aplicação de um modelo hidrodinâmico, que permite obter o perfil da linha de água de escoamentos gradualmente variados em regime subcrítico, supercrítico ou misto.

Para as simulações hidrodinâmicas é necessário informar ao programa alguns dados de entrada, que sumariamente classificam-se em:

- Dados hidrológicos e hidráulicos: séries históricas de vazão e cota, dados de medição de vazão e de níveis de água, levantamentos de marcas de cheias, curvas-chaves, dados da barragem e seu reservatório, dados estruturais e operacionais do empreendimento.

- Dados topográficos: descrevem o relevo do terreno, fornecendo as características geométricas do sistema em estudo, por meio de elementos como área, volume, largura, declividade e profundidade.

A caracterização topográfica da região de estudo é uma parcela muito importante da simulação numérica, cuja descrição parcial ou pouco detalhada, interfere na interpretação do terreno pelo modelo computacional.

Existem várias metodologias que podem ser aplicadas para a obtenção de altimetria, com precisões e custos bastante variados. O desafio consiste em definir de antemão qual precisão altimétrica atende às necessidades de cada aplicação, equilibrando o orçamento disponível e a confiabilidade da informação altimétrica desejada, sem prejuízos à qualidade do estudo.

Desta forma, o presente estudo tem por objetivo avaliar a influência dos dados topográficos de altimetria do terreno na determinação da área de inundação e na propagação de uma onda de enchente causada pela ruptura de uma barragem, considerando três alternativas de terreno, obtidos por metodologias distintas e com diferentes precisões.

As simulações hidrodinâmicas foram realizadas para o trecho a jusante da UHE Sobradinho, localizada no rio São Francisco, distante 40 km a montante das cidades de Juazeiro, estado da Bahia, e Petrolina, estado de Pernambuco.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição geral do aproveitamento hidrelétrico

O aproveitamento de Sobradinho está localizado no rio São Francisco, principal rio da região nordestina, o qual em seu curso de água de 3.200 km, desde a nascente, na Serra da Canastra em Minas Gerais, até sua foz em Piaçabuçu/AL e Brejo Grande/SE, drena uma bacia hidrográfica da ordem de 630.000 km².

O reservatório de Sobradinho é um dos maiores lagos artificiais do mundo, tendo 320 km de extensão, com uma superfície de espelho de água de 4.200 km² e uma capacidade de armazenamento de 34,1 bilhões de metros cúbicos de água em sua cota nominal.

O arranjo do aproveitamento conta com uma barragem de terra com altura máxima de 41 m e comprimento total de 12,50 km, casa de força com seis unidades geradoras, vertedouro de superfície e descarregador de fundo, dimensionados para a cheia de projeto de 22.080 m³/s (defluente), e tomada de água, com capacidade de até 25 m³/s, para alimentação de projetos de irrigação da região.

A Figura 1 apresenta o arranjo geral da UHE Sobradinho.

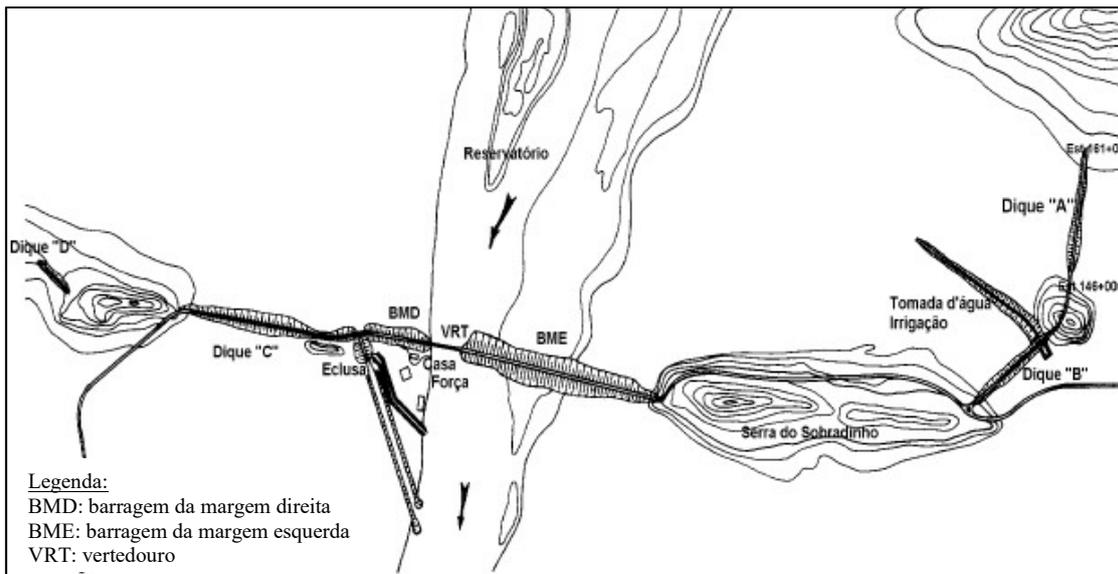


Figura 1 – Arranjo geral da UHE Sobradinho

Modelo digital do terreno para as simulações computacionais

O modelo digital do terreno, também conhecido como MDT, é uma representação matemática da distribuição espacial da característica de um fenômeno vinculada a uma superfície real (BURROUGH, 1986). O MDT constitui-se na representação do relevo da área de interesse e é obtido a partir de levantamentos de campo, digitalização de mapas, medidas fotogramétricas de modelos estereoscópicos e dados altimétricos adquiridos por GPSs, aviões ou satélites.

Neste estudo foram adotados três modelos de terreno, conforme segue:

- Cenário 1: modelo digital de elevação obtido a partir da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com altimetria à escala de 1:250.000 e resolução planimétrica de 90 m.
- Cenário 2: modelo digital de elevação obtido a partir de SRTM – mesmos dados do cenário anterior – e modelagem da calha fluvial por meio de 126 seções batimétricas.
- Cenário 3: modelo digital de elevação obtido a partir da integração de dados aerofotogramétricos e *laser* disponíveis para os estados da Bahia e de Pernambuco, com resolução espacial de 80 cm para ortofotos e 5 m para MDT, no Estado da Bahia, e 50 cm e 1 m para o Estado de Pernambuco, respectivamente. Nesse cenário também foram utilizadas as seções batimétricas para modelagem da calha fluvial.

Modelo hidrodinâmico para a avaliação da propagação da onda de ruptura

A avaliação da propagação da onda de ruptura foi realizada utilizando o modelo hidrodinâmico computacional HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*), versão 5.0.5 de

Junho/2018, do U.S. Army Corps of Engineers, de uso difundido e consolidado em estudos dessa natureza.

O programa permite obter o perfil da linha de água por meio de uma abordagem unidimensional, bidimensional ou a combinação desses métodos. No caso do presente estudo, optou-se pela modelagem bidimensional, definida por uma malha de volumes finitos, com elementos de 200x200 m, exceto no reservatório da UHE Sobradinho, representado por seções teóricas reproduzindo a curva cota x volume de projeto.

A conexão entre o trecho 1D e o 2D ocorreu na região do barramento da UHE Sobradinho, onde a última seção transversal do trecho 1D está diretamente conectada a malha do trecho 2D. A malha de elementos do trecho bidimensional estende-se até o barramento da usina de jusante, UHE Itaparica, onde foi considerada como condição de contorno a curva de descarga teórica do vertedor. O coeficiente de descarga do vertedor, tanto da UHE Sobradinho quanto da UHE Itaparica, foi assumido constante e igual ao valor necessário para garantir a passagem da correspondente cheia de projeto, com o reservatório no correspondente nível de água máximo *maximorum* projetado.

Como condição de contorno de montante do modelo, considerou-se a afluência do hidrograma obtido no estudo de frequência de cheias, com pico igual a vazão de projeto da UHE de Sobradinho. Dada a inexpressiva contribuição de vazão no trecho a jusante do empreendimento, esta foi desconsiderada nas simulações.

O valor do coeficiente de rugosidade de Manning foi selecionado a partir de valores de referência apresentados por Chow (1959). Para o escoamento na calha do rio adotou-se o valor de 0,035 e na planície de inundação, em ambas as margens, o valor de 0,15. Nos reservatórios o valor adotado para o coeficiente de rugosidade foi de 0,02.

Em todos os casos foi considerando um cenário de ruptura por galgamento, em que a formação da brecha começa quando o nível de água no reservatório da UHE Sobradinho atinge 0,15 m acima da crista da barragem, conforme recomendação da Agência Nacional de Águas - ANA.

Estimativa das características da brecha

No estudo da onda de enchente gerada pelo rompimento de uma barragem, a maior incerteza recai sobre a causa, modo, grau e duração da ruptura. O tamanho e a velocidade de desenvolvimento da brecha são os parâmetros primariamente responsáveis pela vazão de pico efluente do reservatório.

Fórmulas empíricas para prever esses parâmetros foram propostas por diversos autores, entretanto verifica-se que sua aplicação conduz a uma faixa ampla de resultados cuja relação entre o menor e o maior valor é frequentemente superior a 10 ou 15 vezes. A ANA, assim como outros órgãos e instituições envolvidas com o tema, propõe em seu “Guia de Orientação e Formulários do Plano de

Ação de Emergência” (ANA, 2016), uma faixa de valores mais restrita e que está próxima dos valores das fórmulas empíricas mais conservadoras.

Contudo, ao se adotar uma largura e tempo de formação de brecha pré-determinados – pelo critério da ANA, por exemplo – pode ocorrer duas situações opostas, e fisicamente irreais. A primeira supondo-se que, após a formação total desta brecha o nível de água do reservatório permaneça ainda alto, indicando que a maior parte do volume se encontra armazenado e com grande energia potencial. Nesta situação existe a possibilidade de ocorrência de altas velocidades na seção da brecha, com grande capacidade erosiva, mas, erroneamente, sem promover a evolução do processo. A segunda situação é o inverso da primeira e pode ocorrer, no caso de um reservatório de pequenas dimensões, quando as velocidades na brecha, mesmo não tendo mais potencial erosivo, devido à redução do nível de água do reservatório, dão continuidade ao processo de formação da brecha, dado que a largura máxima pré-estabelecida para a mesma ainda não foi atingida.

Uma alternativa para este impasse, possível de ser considerada no *software* de simulação da onda de enchente (HEC-RAS), é permitir a evolução da brecha em função das velocidades do escoamento através dela. Essa possibilidade foi adicionada ao HEC-RAS em sua versão 5.0.0 com o nome de “Simplified Physical”, na janela de parâmetros de rompimento da barragem. O dado de entrada necessário para esta nova funcionalidade é uma tabela com pares de “velocidade da água na brecha (m/s)” *versus* “taxa de erosão da barragem (m/h)”. Alguns autores, como Fujisawa (2008), Regazzoni (2008) e Hanson (2010), descrevem experimentos de laboratório e de campo para a determinação da “taxa de erosão” em que fazem uso da “equação de tensão tangencial excedente”.

Desta forma, a solução adotada no presente estudo foi utilizar a função “Simplified Physical” do HEC-RAS, calculando-se as taxas de erosão pela equação de tensão tangencial excedente. Sendo a tensão crítica de arraste “ τ_c ” estimada em função do material da barragem pela formulação de Isbash para enrocamentos (ISBASH, 1935). O coeficiente “ k_d ” foi escolhido, dentro da faixa encontrada na literatura, de modo que o rompimento calculado no HEC-RAS atenda à velocidade de formação da brecha sugerida pela ANA, ou seja, que no tempo de formação indicado pela ANA, a brecha possua a mesma largura por ela sugerida. Atingido este ponto, o HEC-RAS garantirá que a brecha continue naturalmente sua evolução caso o escoamento ainda possua potencial erosivo para tanto. Essa metodologia permite realizar uma simulação de rompimento, fisicamente possível ao mesmo tempo, em que se atende um critério sugerido pela ANA.

3. RESULTADOS

Em todas as simulações foram utilizados os mesmos critérios de ruptura e parâmetros numéricos computacionais, com exceção do terreno, que variou conforme o cenário estudado. Desse

modo, foi possível isolar e analisar a influência do terreno nos resultados das simulações, em termos de propagação da onda de ruptura e área de inundação.

A modelagem da propagação da onda foi realizada com uma abordagem bidimensional por meio do modelo hidrodinâmico HEC-RAS. O modelo mostrou-se estável para as simulações realizadas, considerando escoamento não-permanente e a formulação completa das equações de Saint Venant (*Full Momentum*).

Embora a malha 2D estenda-se até a seção da UHE Itaparica, distante cerca de 450 km da UHE Sobradinho, o trecho, a partir do quilômetro 270, não foi considerado nas análises de resultados. Isto porque, a jusante desse ponto, o Cenário 1 não tem o reservatório de Itaparica representado (não tem a batimetria) e a diferença de profundidade com e sem o reservatório é muito grande.

Para avaliar a influência do terreno na propagação da onda de ruptura foram comparados resultados de vazão, nível de água e tempo de chegada da onda em 4 seções ao longo do trecho de estudo, além da seção do barramento da UHE Sobradinho. Também foi realizada uma análise com relação a amplitude da mancha de inundação em termos de área.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nas simulações.

Tabela 1 – Resultados das simulações

| Localidade | Distância ⁶ (km) | Cenário 1 (SRTM) | | | Cenário 2 (SRTM + Batimetria) | | | Cenário 3 (Lev. Aéreo + Batimetria) | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------|-----------|--------------------------------------|-------------------|-----------|--|-------------------|-----------|
| | | Vazão máx. (m ³ /s) | NA máx. (m) | TC (h) | Vazão máx. (m ³ /s) | NA máx. (m) | TC (h) | Vazão máx. (m ³ /s) | NA máx. (m) | TC (h) |
| Barramento da UHE Sobradinho | - | 263.767 | 399,27 | - | 278.690 | 399,27 | - | 304.318 | 399,27 | - |
| Juazeiro / Petrolina | 40 | 148.405 | 389,02 | 25,0 | 155.743 | 389,00 | 24,0 | 171.703 | 388,42 | 24,5 |
| Vermelho | 118 | 101.782 | 378,35 | 68,0 | 106.430 | 377,98 | 67,0 | 115.993 | 377,15 | 64,5 |
| Santa Maria da Boa Vista | 172 | 92.070 | 370,28 | 108,5 | 96.856 | 369,13 | 104,5 | 103.169 | 368,99 | 101,5 |
| Cabrobó | 256 | 90.402 | 339,11 | 135,5 | 95.038 | 338,02 | 130,0 | 100.887 | 336,25 | 128,0 |
| Largura máx. brecha (m) | | 1.866 | | | 1.936 | | | 2.078 | | |
| Área de inundação (km ²) | | 3.632 | | | 3.529 | | | 3.898 | | |

TC – tempo de chegada do pico da vazão

⁶ A partir do barramento da UHE Sobradinho

A Figura 2 apresenta os hidrogramas e cotogramas resultantes nas quatro localidades apresentadas na Tabela 1.

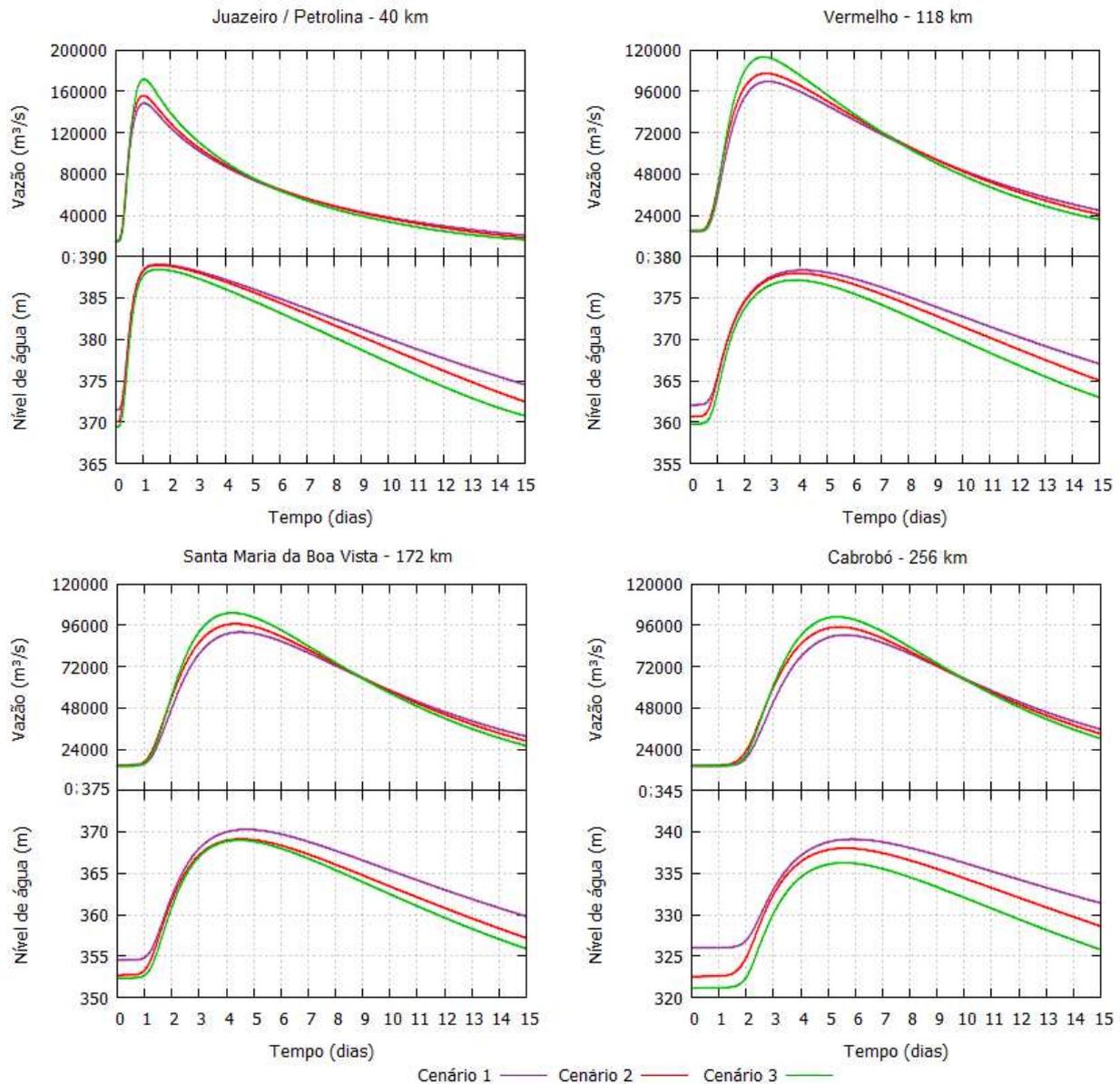


Figura 2 – Hidrogramas e cotogramas resultantes

Com base nos resultados obtidos, pode-se constatar que os Cenários 1 e 2, correspondentes ao uso de SRTM sem e com batimetria, respectivamente, apresentaram níveis de água mais elevados em relação ao Cenário 3, principalmente nas seções mais distantes do barramento de Sobradinho. A maior diferença encontrada foi da ordem de 2,90 m, obtida a partir da comparação entre o Cenário 1 e o Cenário 3. Uma avaliação expedita mostrou que em média o MDT do SRTM está 3,20 m mais alto do que o utilizado no Cenário 3.

A comparação entre os dados de ruptura, como hidrogramas, evolução da brecha no tempo e nível de água, mostrou que o MDT exerce influência na definição desses parâmetros. Os três cenários

iniciaram com uma brecha de igual dimensão e mesmos valores para velocidade e vazão. A medida que a brecha aumenta, e conseqüentemente a vazão, o nível de água de jusante começa a subir, afogando o escoamento e reduzindo gradativamente a capacidade de descarga. Como no cenário 3 o terreno está mais baixo, a vazão de pico da ruptura resultou maior, assim como a largura da brecha.

Ao comparar as áreas de inundação dos Cenários 1 e 2 observa-se que, para a ordem de grandeza das vazões do rompimento, a topografia é mais importante do que a batimetria, visto que a diferença em termos de área é inferior a 3%. Com a utilização de um terreno mais detalhado, como no caso do Cenário 3, a área inundada resulta cerca de 10% maior, isto porque o terreno das margens está mais baixo e para um mesmo nível de água, o alcance é maior.

Por fim, verificou-se que as diferenças entre os tempos de chegada do pico da onda são da ordem de horas, e que quanto mais distante do local da ruptura, maior é essa diferença. O emprego de MDT's com maior precisão, como por exemplo, o terreno utilizado no Cenário 3, apresenta potencial para resultar em tempos de chegada menores. Nesse sentido, essa variação de tempo de chegada entre um cenário e outro, pode ser importante na etapa de elaboração dos planos de contingência e resgate nas áreas afetadas.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo avaliar a influência do MDT (modelo digital de terreno) nos resultados de simulações de rompimento de barragens. Para determinação dessa influência foi realizada uma análise de sensibilidade, utilizando o módulo bidimensional do modelo hidrodinâmico HEC-RAS 5.0.5 para a propagação da onda de cheia, em que se variou exclusivamente o terreno e se observou o impacto deste em algumas variáveis hidráulicas.

As simulações foram realizadas considerando a ruptura hipotética da barragem da UHE Sobradinho, localizada no rio São Francisco, estado da Bahia. Em todos os casos, considerou-se o rompimento por galgamento, iniciando quando o nível de água no reservatório estava 0,15 m acima da crista da barragem.

Foram utilizados dados de altimetria obtidos por diferentes métodos. No Cenário 1 foram utilizados apenas dados de SRTM, sem a representação do leito do rio. Nos Cenários 2 e 3 o leito do rio foi definido por 126 seções batimétricas levantadas em campo, sendo que no Cenário 2 a altimetria das margens foi obtida do SRTM e no Cenário 3 por *laser* e aerofotogrametria.

Conforme recomendado pela ANA (2016), não havendo outra topografia disponível, a informação sobre altimetria pode ser obtida a partir de bases simplificadas, à escala de 1:250.000 e resolução planimétrica de 90 m. Entretanto, notou-se que os cenários que utilizaram o modelo digital

de elevação obtido a partir de SRTM apresentaram um erro de cerca de 10% na área de inundação e 5% no tempo de chegada do pico da onda de ruptura.

A variação do terreno mostrou que, para a ordem de grandeza das vazões de ruptura, a topografia das margens foi mais importante do que a batimetria na determinação da área inundada, vazão e tempo de chegada. No entanto, no caso de uma avaliação mais restrita à região do leito do rio, o modelo com as seções batimétricas é muito mais preciso na determinação desses parâmetros.

A caracterização mais exata da região afetada pode ser um fator determinante na elaboração do Plano de Ação de Emergência. É através dos resultados obtidos nas simulações de ruptura que são definidos os mapas de riscos que irão compor o Plano de Segurança da Barragem. Desta forma, avalia-se que é possível a utilização de dados de SRTM para a aproximação dos resultados de um rompimento de barragem, sobretudo para situações onde não se necessitam de valores com grande precisão, tendo em vista o dano potencial associado e riscos à vida humana. Para todos os outros casos, onde julga-se necessário um nível de confiança atribuído aos resultados, aconselha-se a utilização de bases topográficas com maior resolução e o levantamento batimétrico da calha do rio.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. (2016). *Guia de orientação e formulários do plano de ação de emergência – PAE*. Brasília – DF, 129 p.
- BURROUGH, P.A. (1986). *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford, Clarendon Press, 193 p.
- CHOW, V.T. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York, 680 p.
- FUJISAWA, K., KOBAYASHI A. YAMAMOTO, K. (2008). *Erosion rates of compacted soils for embankments*. *Doboku Gakkai Ronbunshuu C*, Vol.64 - No.2, pp. 403-410.
- HANSON, G. J., WAHL, T., TEMPLE, D., HUNT, S., TEJRAL, R. (2010). “*Erodibility characteristics of embankment materials*”. Association of State Dam Safety Officials Annual Conference, Seattle, WA, Set. 2010.
- REGAZZONI, P., HANSON, G., WAHL, T., MAROT, D. COURIVAUD, J., FRY, J. (2008). “*The influence of some engineering parameters on the erosion of soils*”. Fourth International Conference on Scour and Erosion, Tokyo, Nov. 2008, pp. 442-446.