

Simulação do rompimento de barragens em cascata em uma bacia hidrográfica semiárida

Simulation of cascade dam break in a semiarid watershed

• **Data de entrada:**
21/07/2020

• **Data de aprovação:**
17/11/2020

Luísa Ciriaco Silva de Oliveira¹ | Iran Eduardo Lima Neto^{1*}

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.031>

ORCID ID

Oliveira LCS  <https://orcid.org/0000-0003-0891-4571>

Lima Neto IE  <https://orcid.org/0000-0001-8612-5848>

Resumo

A Lei 12334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, exige a elaboração dos Planos de Segurança de Barragem. A exigência desses planos fez surgir a necessidade de avaliação do possível rompimento de barragens em nível nacional. Para a modelagem de ruptura no estado do Ceará, é importante considerar a densa rede de reservatórios existente. Assim, o objetivo deste trabalho é contribuir para a elaboração de estudos preliminares de ruptura de barragens em cascata, notadamente em regiões semiáridas, que possam subsidiar a elaboração de planos de contingência e estudos de mitigação de riscos. Utilizou-se o software HEC-RAS a partir da topografia extraída de um MDE com imagens SRTM para gerar os mapas de inundação. A comparação entre a área inundada obtida com o HEC-RAS e com o método simplificado MS-20S mostrou que, ao contrário do esperado, o resultado obtido pelo HEC-RAS forneceu valores mais elevados em virtude do efeito cumulativo do rompimento das barragens.

Palavras-chave: Ruptura de barragem. Simulação. Efeito cascata.

Abstract

Law 12334/2010, which establishes the National Dam Safety Policy, requires the development of Dam Safety Plans. The demand for these plans has given rise, all over the country, to the need to assess the possible rupture of dams. For dam break modelling in the state of Ceará, it is important to consider the existing dense network of reservoirs. In this way, the objective of this work is to contribute to the elaboration of preliminary studies of cascade dam break, especially in semiarid regions, which can contribute to the development of contingency plans and risk mitigation studies later on. The flood map was generated by the software HEC-RAS from the topography extracted of a digital elevation model with SRTM images. The comparison between the flooded area obtained with HEC-RAS and the simplified method MS-20S showed that, contrary to expectations, the result obtained by HEC-RAS provided higher values due to the cumulative effect of the cascade dam break.

Keywords: Dam Break. Simulation. Cascade effect.

¹ Universidade Federal do Ceará - Fortaleza - Ceará - Brasil.

* **Autor correspondente:** iran@deha.ufc.br

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a região Nordeste apresenta extremos climáticos, sendo os primeiros relatos de secas datados do século XVII (MARENGO, 2007). Tal fato se deve à grande variabilidade climática da região semiárida, que abrange cerca de 90% da área total dos estados nordestinos (IBGE, 2018). As principais características climáticas da região são o baixo índice pluviométrico, a grande variabilidade espaço-temporal das precipitações, as altas temperaturas e a predominância de um déficit hídrico (TEIXEIRA, 2003; ARAÚJO, 2011; TROLEIS E SANTOS, 2011; CAMPOS et al., 2020; COSTA et al., 2021).

Essa variabilidade climática, principalmente nas épocas de seca, sempre se apresentou como um grande desafio, em especial, para a população rural (MARENGO, 2007). A busca por meios de como enfrentar essa situação tem sido objeto de preocupação da sociedade e de organismos governamentais ao longo dos anos (RABELO E LIMA NETO, 2018).

Uma das soluções mais adotadas no Estado do Ceará foi a construção de reservatórios superficiais, iniciada ainda no século XIX. Com o passar do tempo, a política de açudagem no estado se intensificou, de forma a tentar garantir o abastecimento das populações (TEIXEIRA, 2003). Dessa forma, o número de açudes construídos no estado se elevou de forma significativa, criando uma densa rede de reservatórios. De acordo com um levantamento realizado pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), em 2008, foram registrados um total de 4.922 espelhos d'água artificiais no estado, considerando apenas os que possuem uma área a partir de 5 hectares. Contudo, estima-se que o estado tenha em torno de 25 mil barragens construídas, considerando os pequenos açudes (LIMA NETO; WIEGAND; ARAÚJO, 2011; CAMPOS et al., 2016; RABELO et al., 2021).

Em nível nacional, com a crescente quantidade de barragens distribuídas por todo o país, surgiu também a crescente preocupação com a segurança desses empreendimentos (SOUZA et al., 2017). Essa preocupação, aliada ao impacto causado pelo rompimento de barragens no Brasil, fomentou o desenvolvimento da Lei nº12334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e exige a elaboração dos Planos de Segurança de Barragens (PSB) e Planos de Ação de Emergência (PAE) (BRASIL, 2010). A exigência desses planos fez surgir a necessidade de avaliação do possível rompimento das barragens, de forma a determinar a área de inundação e basear o estudo para desenvolvimento e elaboração destes.

No contexto do Estado do Ceará, essa lei surge com grande relevância, haja vista que, além das barragens administradas por órgãos governamentais, tem-se uma grande quantidade de barragens cujos empreendedores são particulares, os quais apresentam capacidade técnica e financeira muito diferenciadas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016a), o que leva alguns deles a não tomar os devidos cuidados em relação à manutenção da segurança das barragens.

Vale salientar também que, para a avaliação do possível rompimento de barragens no Estado do Ceará, é importante considerar a densa rede de reservatórios existente; dessa forma, deve-se atentar para a possibilidade de ocorrência de rompimentos em cascata. Tal possibilidade fortalece a necessidade do desenvolvimento dos estudos de ruptura, visto que sua ocorrência pode potencializar todos os impactos catastróficos gerados pela falha de uma barragem (CAO et al., 2014; COLLISCHONN; TUCCI, 1997).

Para determinar a mancha de inundação, faz-se necessário simular a ruptura da barragem por meio de modelos hidráulicos (VERÓL, 2010). No meio científico, já foram desenvolvidos diversos

modelos para realizar a simulação do fenômeno de ruptura de barragens, sendo estes de diferentes complexidades (LAURIANO, 2009). Um dos dados de entrada a serem inseridos nos modelos para a simulação são referentes à topografia da região, descrevendo a geometria do sistema de cursos d'água. Tais dados são de grande relevância à modelagem, pois, caso sejam mal inseridos, a precisão do modelo pode ser reduzida de forma significativa. Isto posto, um dos maiores obstáculos para a realização da modelagem é a dificuldade da obtenção de dados topográficos, tendo em vista os altos custos envolvidos em levantamentos de campo (LAURIANO, 2009). Fica evidente, portanto, a dificuldade dos empreendedores em desenvolver tais planos, devido à elevada quantidade destes e à complexidade de obtenção dos dados que possibilitem a modelagem para geração das manchas de inundação.

Nesse contexto, surgem ferramentas que podem ter destaque possibilitando a realização de estudos preliminares, modelando de forma mais prática e menos onerosa, como os modelos digitais de elevação (MDE) com imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (PEREIRA et al., 2017).

Com isso, o objetivo do trabalho é contribuir para a elaboração de estudos preliminares de ruptura no Estado do Ceará, considerando o efeito de açudes de montante, que possam servir de base, fornecendo uma ideia inicial para uma modelagem posterior, mais precisa, a ser usada nos planos de contingência e estudos de mitigação de riscos. Para tanto, realizou-se uma simulação de ruptura em cascata utilizando um MDE com imagens SRTM a partir do software de modelagem HEC-RAS. Além disso, compararam-se os resultados obtidos com os resultados da metodologia simplificada MS-20S. Ressalta-se que o método MS-20S não considera o efeito da ruptura em cascata (MELO, 2015; PEREIRA, et al., 2017).

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Banabuiú apresenta-se como uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Jaguaribe. Localiza-se na região central do estado do Ceará, incluindo doze municípios e tem uma área de drenagem de 19.810km², o que corresponde a pouco mais de 13% do território do estado. O clima da região é do tipo tropical quente semiárido, caracterizado por altas temperaturas e baixas precipitações, sendo a média pluviométrica anual de aproximadamente 725mm (IPECE, 2016). A vegetação é predominantemente caatinga degradada (arbustiva densa ou aberta). Com relação ao relevo, a Bacia do Banabuiú apresenta vales abertos, com pequenas amplitudes entre os fundos dos vales e os interflúvios. Outro aspecto são as declividades dos talwegues dos rios, que são, em média, 0,095m/m (SANTANA, 2009).

Para a realização do presente trabalho, selecionou-se, como reservatório principal a ser modelado, o Banabuiú, devido ao seu papel estratégico no abastecimento dos municípios localizados dentro da bacia hidrográfica e também em outras regiões do estado, sendo este o terceiro maior do Ceará em capacidade de acumulação. A Barragem do Banabuiú possui dois afluentes principais, o Rio Banabuiú e o Rio Quixeramobim. Dessa forma, para a realização da modelagem de ruptura em cascata, selecionou-se o Rio Quixeramobim, visto que nesse rio encontra-se o Reservatório Fogareiro, o maior a montante do Banabuiú. Além disso, entre as duas barragens citadas, encontra-se também a Barragem Quixeramobim. A Fig. 1 apresenta o detalhamento das três barragens dentro da bacia hidrográfica. Além disso, a escolha foi baseada também na disponibilidade de dados de projeto para utilização nos processos da modelagem.

A Barragem Banabuiú se apresenta como um maciço de terra zoneada, com capacidade de acumulação de 1.601,00hm³, altura máxima de 57,70m e extensão pelo coroamento de 824,00m. A Barragem Quixeramobim é uma estrutura de concreto do tipo gravidade, com capacidade de acumulação reduzida de maneira significativa pelo assoreamento, passando de 54,00hm³ (dado de projeto, década de 1960) para 7,89hm³ (batimetria realizada em 2008). Sua altura máxima é de 16,89m, e a extensão pelo coroamento é de 180,00m. A Barragem

Fogareiro é uma estrutura de terra homogênea, com capacidade de aproximadamente 119,00hm³, altura máxima de 29,80m e extensão de 560,00m (SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ, 2015).

As barragens selecionadas encontram-se bem próximas umas das outras, o que reforça a ideia da densa rede de reservatórios existente e dá suporte à hipótese do rompimento em cascata. A Tabela 1 mostra a distância entre as barragens, medidas em linha reta, de maciço a maciço.

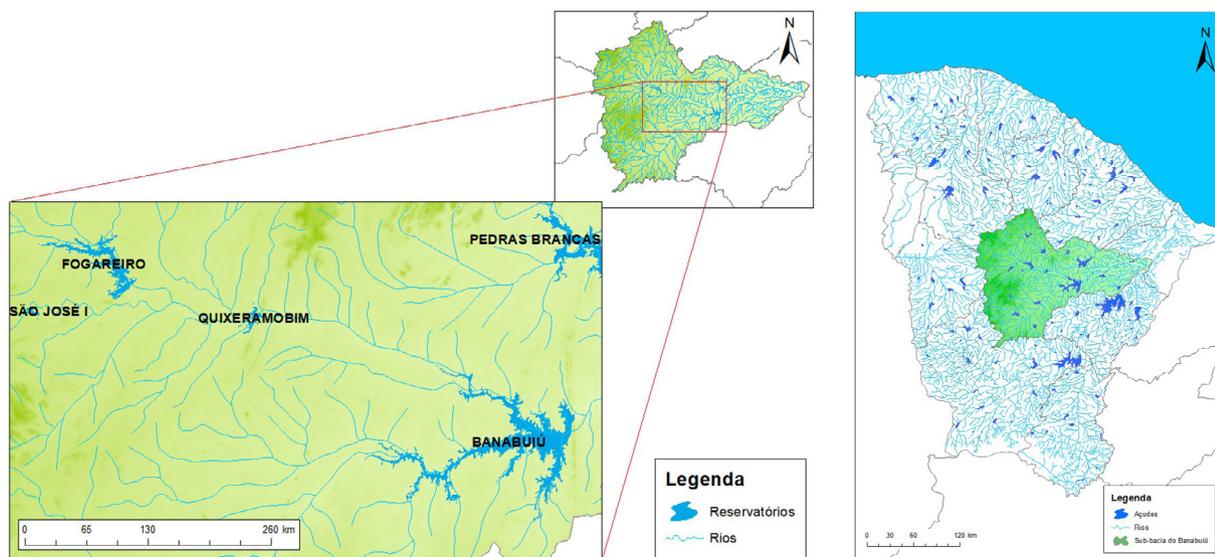


Figura 1 - Localização dos reservatórios selecionados para modelagem.
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 1 - Distância entre as barragens a serem modeladas

Trecho	Distância (km)
Fogareiro - Quixeramobim	19,90
Quixeramobim - Banabuiú	45,70

2.2 Modelagem de ruptura

As simulações desenvolvidas foram realizadas utilizando o software HEC-RAS (*River Analysis System*) na versão 5.0.3, que utiliza as equações

de Saint-Venant para cálculo do escoamento (BRUNNER, 2016). Esse programa foi escolhido por se tratar de um *software* livre e por ser um dos mais populares para realização de modelagens hidráulicas.

Assim, de acordo com o Boletim 111 do Comitê Internacional de Grandes Barragens, os estudos de rompimentos hipotéticos de barragens devem seguir as etapas de desenvolvimento descritas: elaboração do hidrograma de ruptu-

ra, propagação da onda de cheia, geração dos mapas de inundação e elaboração de planos de contingência (ICOLD, 1998). O presente trabalho será desenvolvido somente até a etapa de geração de mapas de inundação; contudo, ressalta-se a importância da elaboração de planos de contingência para os Planos de Ação de Emergência (PAE) exigidos pela lei nacional de segurança de barragens.

A elaboração do hidrograma de ruptura, primeira etapa do processo, deu-se com a aquisição do valor de vazão de pico a partir do estudo realizado pela Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH-CE), desenvolvido contemporaneamente a este trabalho, a pedido do Banco Mundial para análise da segurança da Barragem Banabuiú e posterior implantação do projeto Malha D'Água na área Banabuiú–Sertão Central. Tal estudo realizou a modelagem hidrológica no software HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) versão 4.2.1. A vazão de pico utilizada é referente a um cenário de ruptura no qual não há um evento de precipitação associado, ou seja, considera somente o volume acumulado nos reservatórios.

Dando sequência ao método, realizou-se a propagação da onda de ruptura no vale a jusante. É importante ressaltar que a Barragem Banabuiú não rompe por gálgamento, tendo em vista o cenário de vazão estudado, ou seja, o vertedouro da barragem é capaz de verter a vazão advinda da ruptura em cascata a montante (SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ, 2018; FUSARO, 2011).

Um dos dados de entrada de maior importância para a modelagem de ruptura são os dados referentes à topografia da região a jusante. Em primeiro lugar, é preciso esclarecer que a modelagem a ser realizada, caso se tenha como objetivo o desenvolvimento de Planos de Ação de Emergência (PAEs) para as barragens, deve utilizar dados topográficos bastante precisos para

que a área de inundação determinada seja a mais próxima da realidade na ocorrência de um acidente, ou seja, seria necessária a realização de um levantamento topobatimétrico nas seções transversais ao longo do rio (SALGADO, et al., 2017). Contudo, devido aos custos elevados desse tipo de levantamento, à extensão considerável da região estudada, e por se tratar de um estudo preliminar de ruptura, foi utilizado, neste trabalho, um modelo digital de elevação (MDE) a partir de imagens SRTM 30 m (*Shuttle Radar Topography Mission*), que apresentam precisão estimada das altitudes na ordem de 2 a 5 metros de erro absoluto e valores inferiores para diferenças de altitude. Outros tipos de estudos que também necessitam de uma boa precisão de dados topográficos, como a elaboração de projetos de adutoras, por exemplo, também estão utilizando os dados da SRTM para a elaboração dos estudos preliminares (MOLINAS, 2018). Além disso, buscou-se utilizar condições de topografia semelhantes à utilizada no desenvolvimento do método MS-20S. Dessa forma, com a utilização do software Global Mapper foi possível extrair, a partir do MDE com imagens SRTM, para a região de abrangência do rio, curvas de nível principais de 5 em 5 metros e secundárias de 1 em 1 metro.

Em relação à fronteira de jusante para o comprimento do rio (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016b), o critério utilizado para as Barragens Fogareiro e Quixeramobim foi um reservatório a jusante. Já para a Barragem Banabuiú, o critério selecionado foi a confluência com outro rio, no caso, o rio Sitiá. Já acerca do espaçamento entre as seções transversais de interesse, este deve se dar de forma a contemplar as contrações, expansões, modificações bruscas do leito do rio e devem representar da melhor forma o rio analisado, buscando evitar erros físicos elevados no resultado final das simulações (BRUNNER, 2014; SOUZA; MARTINS; FADIGA JUNIOR, 1991). Assim, foram desenhadas 139 seções, sendo a largura adotada de 800m, pois observou-se que

esta abrangia a calha do rio. A Fig. 2, a seguir, apresenta um pequeno trecho a jusante da Bar-

ragem Fogareiro, como exemplificação das seções transversais.

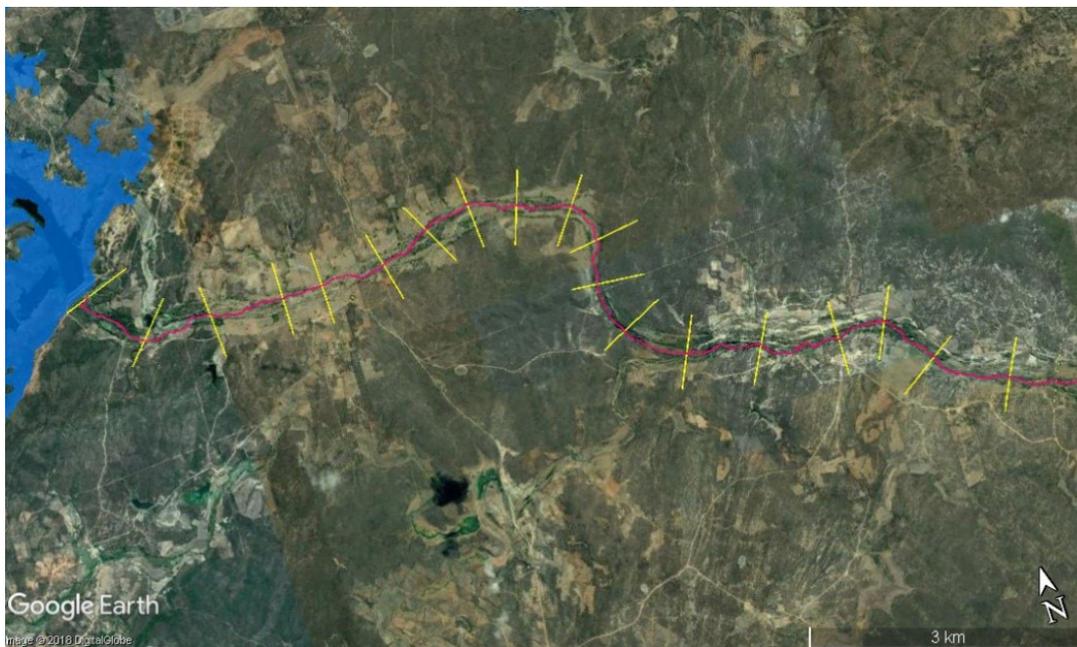


Figura 2 - Detalhe das seções transversais a jusante da barragem Fogareiro.

Fonte: Elaborado pela autora.

As dimensões da brecha, em formato trapezoidal, e o tempo de desenvolvimento desta para as Barragens Fogareiro e Banabuiú foram calculadas a partir das equações de Froehlich (2008) (BRUNNER, 2014), apresentadas na Tabela 2, sendo $B_{méd}$ a largura média da brecha, h_b a altura da brecha, V_w o volume do reservatório no momento da ruptura, K_0 uma constante que varia com o tipo de rompimento, e g a aceleração da

gravidade. Já para a brecha da Barragem Quixeramobim foram utilizados os critérios do estudo desenvolvido por Viseu (2008), apresentados na Tabela 3. Para todas as barragens assumiu-se que a altura da brecha abrange toda a altura do barramento. A Tabela 4 a seguir apresenta os valores utilizados para as dimensões da brecha e do tempo de abertura.

Tabela 2 - Equações empíricas para cálculo dos parâmetros da brecha de ruptura

Referência	Brecha	Tempo de formação	Observações
Froehlich (2008)	$B_{méd} = 0,27 \times K_0 \times V_w^{0,32} \times h_b^{0,04}$	$t = 63,2 \times \sqrt{\frac{V_w}{gh_b^2}}$	<ul style="list-style-type: none"> • K_0 (1,3 para galgamento; 1,0 para piping) • t em segundos • H:V (1:1 para galgamento; 0,7:1 para piping)

Fonte: Adaptado de Brunner (2014).

Tabela 3 - Critérios para parâmetros da brecha de ruptura em barragens de concreto

Tipo de barragem	Características da brecha	
	Dimensão	Tempo de ruptura
Gravidade	Brecha retangular correspondente a 50% da estrutura total ou 3 dos blocos maiores	30 min

Fonte: Adaptado de Viseu (2008).

Por fim, a geração dos mapas de inundação foi realizada a partir dos resultados obtidos com a propagação da onda de cheia pelo HEC-RAS. Consideraram-se os três reservatórios com sua capacidade máxima no momento do rompimento e o tipo de rompimento como galgamento (ENGEORPS, 2012). Assim, com os resultados gerados pelo HEC-RAS para a cota máxima atingida pelo nível d'água para cada seção transversal, foi possível desenhar os mapas de inundação a partir do traçado das curvas de nível extraídas do MDE no software AutoCAD Civil 3D. Para uma melhor visualização das áreas atingidas pela

inundação, exportou-se o traçado do mapa para o Google Earth.

Com as simulações realizadas, foram obtidos os resultados que serão apresentados, iniciando pela análise do perfil longitudinal do rio e das seções transversais e, em seguida, pela apresentação do mapa de inundação. Além disso, serão realizadas análises comparativas entre o mapa de inundação gerado e o mapa de inundação obtido pela metodologia simplificada MS-20S, utilizada para classificação das barragens quanto à categoria de dano potencial associado.

Tabela 4 - Parâmetros calculados para as brechas das barragens em estudo

Barragem	Largura média (m)	Tempo de abertura (h)	Inclinação lateral
Fogareiro	182,29	2,66	1
Quixeramobim	90,00	0,5	0
Banabuiú	387,89	4,29	1

Fonte: Elaborado pela autora.

2.2.1 Metodologia simplificada MS-20S

Esse método foi desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Portugal, com o objetivo de efetuar análises rápidas e ordenar, em termos de risco, conjuntos com um número considerável de barragens, utilizando formulações simplificadas e programas mais acessíveis.

É baseado em equações empíricas que permitem estimar a vazão de pico gerada em função da altura da barragem, do volume do reservatório ou da combinação de ambos e utiliza imagens satélite dos vales a jusante para definir os mapas de inundação (MELO, 2015; PEREIRA, et al., 2017). Esse método tem sua aplicação limitada a barragens com capacidade de acumulação menor que 1000hm³.

Além disso, é importante ressaltar que o modelo MS-20S deve ser utilizado somente como uma referência nos processos de segurança de barra-

gens, auxiliando na priorização de atuação de órgãos fiscalizadores, por exemplo, tendo em vista que a área de inundação gerada não pode ser utilizada nos PAEs devido à precisão insuficiente dos dados de relevo – no caso, as imagens SRTM 30m (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016c).

Nesse contexto, a comparação realizada no presente trabalho se justifica pelas entradas semelhantes em ambos, a citar: topografia extraída das imagens SRTM 30m e a onda de cheia simulada com a vazão de pico. No modelo MS-20S também não é considerado um evento de chuva simultâneo ao rompimento das barragens, condição também considerada nas simulações com o HEC-RAS.

As manchas de inundação da metodologia simplificada foram geradas pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH, 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação realizada apresentou os perfis longitudinais para os três trechos do rio indicados na Fig.3. Ressalta-se que o trecho 1 é referente ao vale de jusante da Barragem Fogareiro, o trecho 2 ao vale de jusante da Barragem Quixeramobim e o trecho 3 se refere à região a jusante da Barragem Banabuiú. Os trechos possuem, respectivamente: 25 km, 60 km e 43 km aproximadamente.

Fazendo a diferença média entre a cota alcançada pela água em seu nível máximo e a cota do terreno, temos o nível d'água máximo médio em cada trecho do rio (Fig. 4). Observa-se que, mesmo com o amortecimento da onda de cheia, os níveis d'água atingidos são bastante elevados, podendo causar danos bastante expressivos. É importante salientar, porém, que a modelagem realizada não considerou aportes intermediários entre as barragens, já que se admitiu a não ocorrência de precipitação durante o processo do rompimento. Ou seja, em um cenário de ruptura

com ocorrência simultânea de precipitações, os resultados seriam ainda mais críticos.

Cao et al. (2014), a partir de uma modelagem de ruptura em cascata de barragens, e Xue et al. (2011), a partir de um experimento em calha de vidro retangular para simular o rompimento em cascata, concluíram que as características hidráulicas do fluxo de água devido a uma ruptura de barragens em sequência serão influenciadas pelo nível inicial de água e pela distância entre as barragens. Assim, entende-se que, apesar da ocorrência do rompimento em cascata da barragem Quixeramobim, o nível d'água máximo médio não aumenta no trecho 2, visto que tal barragem possui uma capacidade de acumulação muito baixa, se comparada com a barragem rompida a montante.

Outro aspecto observado foi que, na última seção do trecho 3, o nível d'água máximo foi de aproximadamente três metros, portanto a onda de cheia continuará sua propagação para além do limite estabelecido.

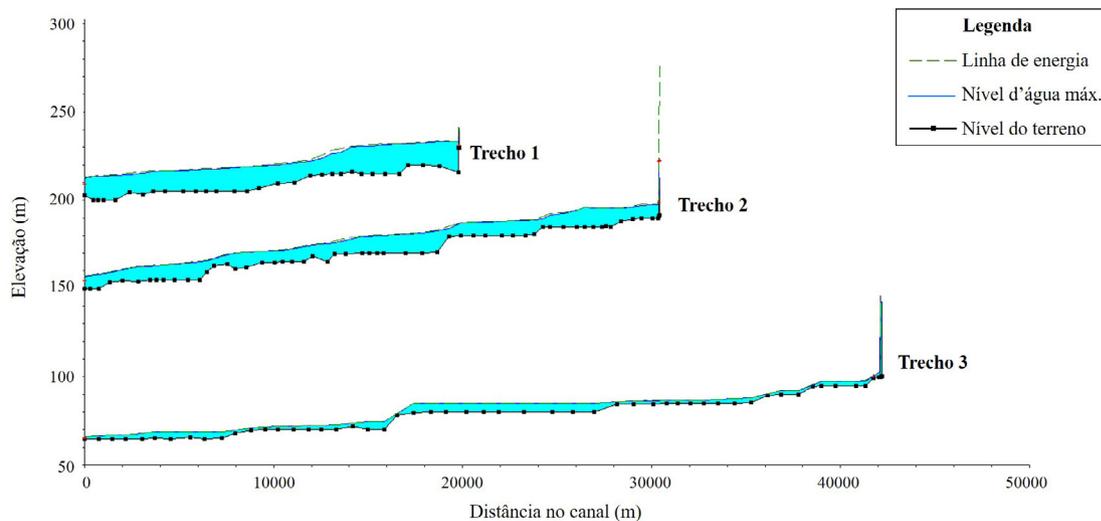


Figura 3 - Perfil longitudinal dos trechos do rio apresentando o nível máximo d'água atingido.

Fonte: Elaborado pela autora.

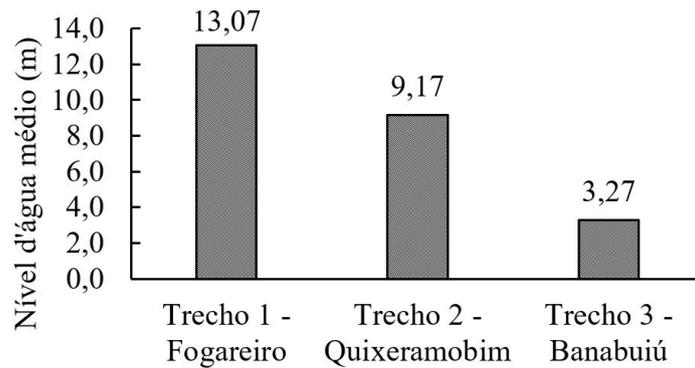


Figura 4 - Nível d'água médio por trecho calculado a partir das lâminas máximas atingidas.
Fonte: Elaborado pela autora.

O Estado do Ceará, culturalmente, vivencia um assentamento da população em áreas próximas aos corpos d'água, o que leva a uma grande ocupação das regiões a jusante das barragens. Assim, a grande maioria das barragens do estado é classificada com dano potencial associado alto (DPA), devido, principalmente, ao potencial de perdas de vidas humanas no caso de rompimento, e necessitarão de um PAE (OLIVEIRA, et al., 2018). Ao longo do vale de jusante das barragens analisadas, apesar de existirem habitações mais isoladas, o maior aglomerado de habitações existente é o Município de Quixeramobim-CE, localizado no Trecho 2 do projeto. Com isso, devi-

do à grande quantidade de seções transversais no presente estudo, optou-se por dar destaque à seção transversal do Trecho 2 mais próxima à região central do Município de Quixeramobim (Seção 35) (Fig. 5). A seção selecionada já abranja as primeiras habitações mais próximas à calha do Rio. Dessa forma, conclui-se que essas residências serão fortemente atingidas. Além disso, considerando que o rio em questão é um rio intermitente e que, mesmo com a regularização, sua profundidade é da ordem de centímetros, tem-se que o nível d'água aumenta de forma considerável, sendo mais de seis metros no ponto mais profundo.

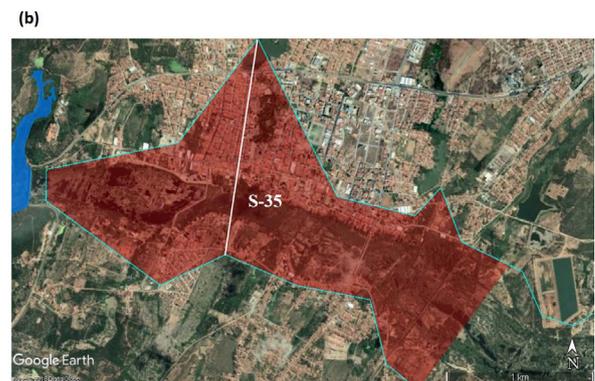
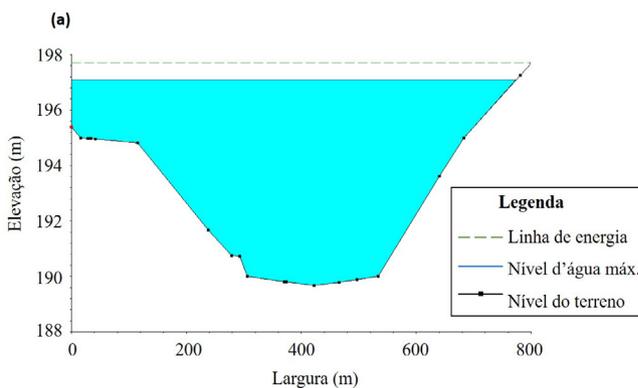


Figura 5 - Seção transversal representativa do município de Quixeramobim: (a) HEC-RAS e (b) imagem de satélite.
Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos pela verificação das seções transversais mostraram que algumas seções apresentaram transbordamento, o que significa que a largura de 800 metros, adotada para as seções, não foi suficiente em alguns locais ao longo do rio. A Seção 35 é uma das que apresentam transbordamento; logo, a água entrará mais adiante dentro da cidade, potencializando ainda mais os danos. Destaca-se ainda o fato de que o município em questão é pequeno, não sendo, portanto, muito verticalizado em suas construções. Dessa forma, uma lâmina de três metros, por exemplo, já submergiria a maior parte das residências.

Com relação às velocidades máximas atingidas pela onda de cheia gerada pelo rompimento das

barragens, tem-se que a média destas por trecho apresenta valores decrescentes na sequência do rio, o que ocorre, dentre outros motivos, devido às características geomorfológicas da área em estudo, como baixas declividades e relevo mais aplainado (Fig. 6). Oliveira (2016), a partir de uma modelagem de rompimento de barragem no semiárido do Estado da Bahia – região com características bastante similares à região de estudo do presente trabalho –, concluiu que os valores de declividade influenciam diretamente a velocidade da correnteza e obteve, em sua simulação, uma redução da aceleração da onda de cheia e da energia do escoamento, o que corrobora os resultados obtidos neste trabalho.

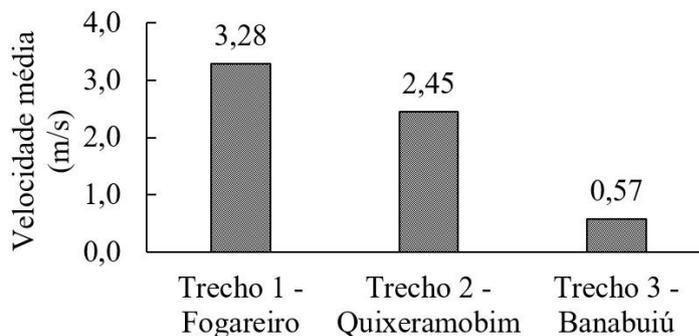


Figura 6 - Velocidade média por trecho calculada a partir das velocidades máximas atingidas.

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos dados de cota máxima atingida pelo nível d'água, obteve-se o mapa de inundação para o rompimento hipotético das barragens, apresentado na Fig. 7.

Comparando o mapa de inundação obtido e o mapa de inundação gerado pela metodologia simplificada MS-20S, observa-se que a largura média da área inundada foi maior para a simulação de rompimento hipotético realizada

pelo HEC-RAS (Fig. 8). Não foi possível realizar a comparação para a área inundada a jusante da Barragem Banabuiú, visto que esta não rompe no cenário simulado nesse trabalho e sua área inundada a jusante é decorrente somente da vazão vertida pelo sangradouro, e também porque a metodologia simplificada não se aplica para barragens com capacidade de acumulação maiores que 1.000 hm³ (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016c).

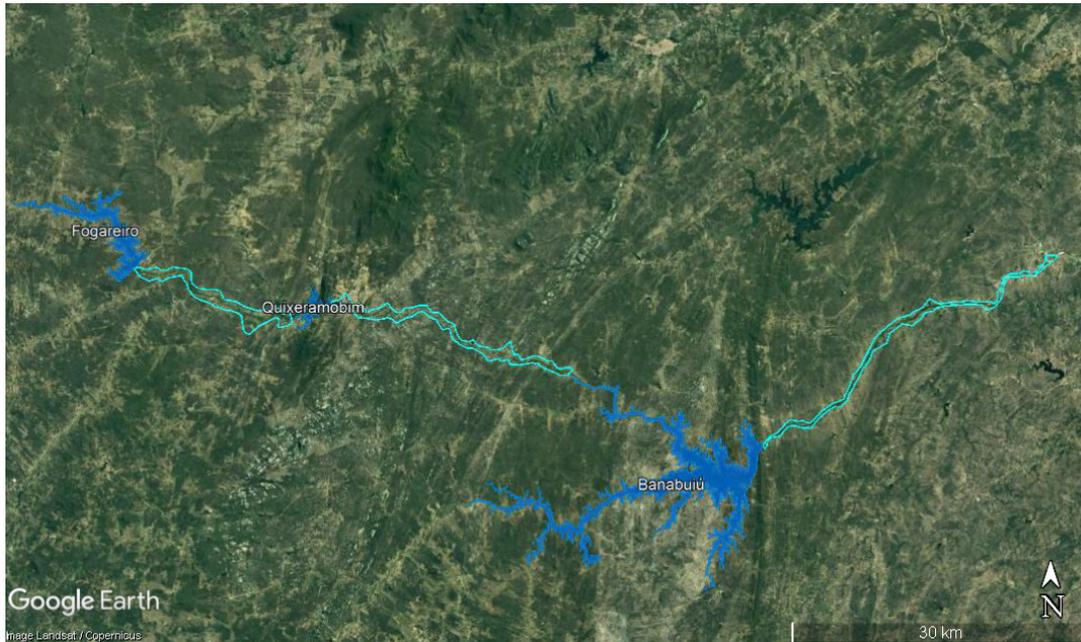


Figura 7 - Mapa de inundação resultante da simulação pelo HEC-RAS.

Fonte: Elaborado pela autora.

Pereira et al. (2017) realizaram tal comparação em simulações para três barragens isoladas e obtiveram resultados diferentes, sendo a área inundada obtida pela metodologia simplificada maior. Dessa forma, tendo em vista que a metodologia simplificada não considera a ocorrência do efeito de ruptura em cascata, caso do presente trabalho, sua aplicação para classificar o dano potencial associado em situações desse tipo

pode levar a resultados subdimensionados, não sendo a favor da segurança.

Salienta-se que os mapas de inundação gerados pelo método MS-20S não podem servir como base para o desenvolvimento dos Planos de Ação de Emergência (PAE) das barragens, devido às grandes simplificações envolvidas no processo (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016c).

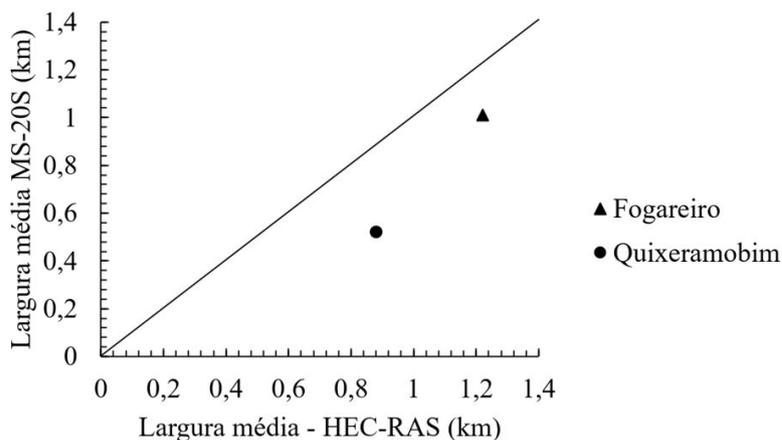


Figura 8 - Comparação entre o mapa de inundação gerado pelo HEC-RAS e pelo MS-20S.

Fonte: Elaborado pela autora.

4 CONCLUSÕES

No presente trabalho, apresentou-se um estudo preliminar de ruptura de barragens, considerando a possibilidade do efeito em cascata em três reservatórios sequenciados – Fogareiro, Quixeramobim e Banabuiú. O mapa de inundação gerado pelo software HEC-RAS a partir da topografia extraída de um modelo digital de elevação (MDE) com imagens SRTM, pode fornecer uma ideia inicial das áreas inundadas, de forma a auxiliar no desenvolvimento de modelagens posteriores exigidas para a elaboração dos PAEs das barragens, de acordo com a Lei nº 12.334/2010. As larguras adotadas para as seções transversais e o limite estabelecido para extensão do rio, por exemplo, devem ser maiores, visto que os resultados de nível d'água se apresentaram elevados em alguns pontos limites. De forma geral, porém, os resultados obtidos foram satisfatórios, apresentando um comportamento conforme o esperado em relação ao nível d'água máximo, velocidades máximas atingidas pela onda de ruptura e áreas inundadas.

A comparação realizada entre o cenário modelado e os resultados da metodologia simplificada MS-20S mostrou que, ao contrário do esperado em um primeiro momento, em que a metodologia simplificada aumentaria a área inundada, o valor obtido pelo HEC-RAS foi maior. Entretanto, tendo em vista que a metodologia simplificada não é capaz de considerar os reservatórios interligados, ou seja, não é possível simular um evento de ruptura em cascata com esse método, entende-se que a área alagada maior obtida pelos resultados do HEC-RAS esteja coerente para a simulação desejada.

Como sugestão para trabalhos futuros, podem ser feitas análises de sensibilidade dos parâmetros adotados no processo de modelagem, como as dimensões da brecha de ruptura, de forma a verificar o impacto da variação destes no mapa de inundação gerado. Além disso, outros cenários de ruptura podem ser incluídos, considerando

um evento de chuva com diferentes períodos de retorno. Sugere-se também a realização de simulações hidrossedimentológicas e de qualidade da água, que podem contribuir com novos aspectos ainda não abordados em estudos de rompimentos no Estado do Ceará e reconhecer a importância da modelagem de ruptura em diferentes esferas, como aspectos ambientais e de bem-estar humano. Para a abordagem de outros pontos de estudo preliminar, sugere-se a realização das simulações com a inserções dos próprios hidrogramas de ruptura, ao invés dos valores de vazão de pico, contribuindo para as análises relacionadas ao tempo de chegada da onda de cheia e determinação das zonas de auto salvamento preliminares.

Por fim, é importante ressaltar as limitações do presente trabalho para aplicação em casos práticos, sendo necessários ainda maiores refinamentos na modelagem. As curvas de nível geradas pelo MDE com imagens SRTM podem ser validadas a partir de algumas seções transversais levantadas.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico -CNPq pelas bolsas concedidas e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP (Processo PNE-0112-00042.01.00/16) pelo apoio financeiro para a realização do presente trabalho.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Oliveira LCS e Lima Neto IE; **Metodologia:** Oliveira LCS; **Investigação:** Oliveira LCS; **Redação - Primeira versão:** Oliveira LCS; **Redação - Revisão & Edição:** Lima Neto IE; **Aquisição de Financiamento:** Lima Neto IE; **Supervisão:** Lima Neto IE.

7 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem: Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens** Volume. Brasília: ANA, 2016a. 2 v.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE: Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens** Volume. Brasília: ANA, 2016b. 4 v.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Geração de manchas para classificação de barragens quanto ao dano potencial associado:** Metodologia Simplificada. Brasília: ANA, 2016c.
- ARAÚJO, S. M. S. A região semiárida do Nordeste do Brasil: Questões Ambientais e Possibilidades de uso Sustentável dos Recursos. **Revista Rios Eletrônica:** Revista Científica da Faculdade Sete de Setembro, v. 5, n. 5, p.89-98, dez. 2011.
- BRASIL. **Lei nº 12334**, de 20 de setembro de 2010. Brasília, 2010.
- BRUNNER, G. W. **HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 5.0.** Davis: Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, 2016.
- BRUNNER, G. W. **Using HEC-RAS for Dam Break Studies, TD-39.** U.S. Army Corps of Engineers. Davis: Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, 2014.
- CAMPOS, J. N.B., et al. Trade-off between reservoir yield and evaporation losses as a function of lake morphology in semi-arid Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** (Online), v. 88, p. 1113-1126, 2016. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201620150124>
- CAMPOS, J. N. B.; RABELO, U. P.; LIMA NETO, I. E. The Bell-Shaped Unit Hydrograph for Overland Planes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 146, p. 06020001, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0001465](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001465)
- CAO, Z., et al. Even more destructive: Cascade dam break floods. **Journal of Flood Risk Management**, v. 7, p. 357-373, 2014. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12051>
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Análise do Rompimento Hipotético da Barragem Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p.191-206, dez. 1997.
- COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS (COGERH): banco de dados. Acesso em: 14 set. 2018.
- COSTA, A. C.; ESTACIO, A. B. S.; SOUZA FILHO, F. A.; LIMA NETO, I. E. Monthly and seasonal streamflow forecasting of large dryland catchments in Brazil. **Journal of Arid Land**, v. 13, p. 205-223, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0097-y>
- ENGENCORPS. **Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigações de Campo Correlatas.** Brasília: ANA, 2012. 113 p.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Mapeamento dos espelhos d'água no Brasil.** Fortaleza: MI, 2008.
- FUSARO, T. C. **Gestão e Desempenho de Barragens:** Análise e Gestão de Riscos. Brasília: ANA, 2011.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Mapa regional Semiárido 1:27.000.000.** Brasil, 2018.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Dam break flood analysis: review and recommendations. **Bulletin 111.** Paris, 1998, 301 p.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, 2010 e 2011. **Anuário Estatístico.** Fortaleza, 2016.
- LAURIANO, A. W. **Estudo de ruptura da Barragem de Funil:** Comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS. 2009. 251 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- LIMA NETO, I. E.; WIEGAND, M. C.; ARAÚJO, J. C. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. **Hydrological Sciences Journal.** London, p. 319-333. 28 mar. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2011.553616>>. Acesso em: 05 abr. 2018.
- MARENGO, J. A. **Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade:** Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. 2. ed. Brasília: MMA, 2007. ISBN 85-7738-038-6
- MELO, J.F. Dam-Break Flood Risk Assessment. **Second International Dam World Conference**, Lisboa, p. 47 – 56, 2015.
- MOLINAS, P. **Plano de Águas da comunidade integrantes do Movimento dos Atingidos por Barragem (MAB):** Produto 5 - Proposição de Soluções. Fortaleza: Acquatool Consultoria Ltda, 2018.
- OLIVEIRA, A. M. **Mapeamento de área suscetíveis a inundação por rompimento de barragem em ambiente semiárido.** 2016. 143 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- OLIVEIRA, L. C. S., et al. Evaluation of the dams of the State of Ceará as for the classification by category of hazard potential. **Third International Dam World Conference**, Foz do Iguaçu, set. 2018.
- PEREIRA, C. E., et al. Comparação entre modelos simplificados e o modelo HEC-RAS no estudo de áreas de inundação para o caso de Minas Gerais, Brasil. **Revista Recursos Hídricos**, Lisboa, v. 38, n. 1, p.75-90, mar. 2017. <https://doi.org/10.5894/rh38n1-cti3>

- RABELO, U. P.; LIMA NETO, I. E. Efeito de secas prolongadas nos recursos hídricos de uma região semiárida: uma análise comparativa para o Ceará. **Revista DAE**, v. 66, p. 61-79, 2018. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.023>
- RABELO, U. P.; DIETRICH, J.; COSTA, A. C.; SIMSHAUSER, M. N.; SCHOLZ, F. E.; NGUYEN, T. V.; LIMA NETO, I. E. Representing a dense network of ponds and reservoirs in a semi-distributed dryland catchment model. **Journal of Hydrology**, v. 127103, p. 127103, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127103>
- SALGADO, S. R. T. et al. Avaliação do uso do SRTM na simulação de rompimento de barragens. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, 2017.
- SANTANA, E. W. (Coordenador). **Caderno regional da sub-bacia do Banabuiú**. Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Fortaleza: INESP, 2009. ISBN 978-85-87764-99-7
- SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ. Toné, et al. **Avaliação do impacto em reservatórios da onda gerada pela ruptura de barragens a montante**. Fortaleza: Célula de Segurança de Barragens, 2018.
- SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ: banco de dados. **Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos do Ceará**. 2015. Disponível em: <http://atlas.srh.ce.gov.br/infraestrutura/acudes/detalhaCaracteristicasTecnicas.php?cd_acude=71&status=1>. Acesso em: 01 mar. 2018.
- SOUZA, D. N., et al. Flood damping by reservoirs: proposition of a graphical parametric method. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, 2017. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0217170002>
- SOUZA, P. A.; MARTINS, J. R. S.; FADIGA JUNIOR, F. M. **Métodos computacionais aplicados à engenharia hidráulica**. São Paulo: Centro Tecnológico de Recursos Hídricos, 1991.
- TEIXEIRA, F. J. C. **Modelos de Gerenciamento de Recursos Hídricos: Análises e proposta de aperfeiçoamento do sistema do Ceará**. 2003. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.
- TROLEIS, A. L.; SANTOS, A. C. V. **Estudos do Semiárido**. 2. ed. Natal: Editora da UFRN, 2011.
- 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**. 2010. 237 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- WISEU, M. T. F. **Segurança dos vales a jusante de barragens: Metodologias de apoio à gestão do risco**. 2008. 420 f. Tese (Doutorado) - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.
- XUE, Y., et al. Experimental study of dam-break flow in cascade reservoirs with steep bottom slope. **J. Hydrodyn.** 2011, v. 23, p. 491-497. [https://doi.org/10.1016/s1001-6058\(10\)60140-0](https://doi.org/10.1016/s1001-6058(10)60140-0)