

**PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE CHEIA À JUSANTE DA BARRAGEM DE XINGÓ
LOCALIZADA NO RIO SÃO FRANCISCO**

Ingridy Souza dos Santos ⁽¹⁾

Graduada em Ciências Exatas e Tecnológicas, graduanda de Engenharia Civil. e-mail: santossingridy@gmail.com

Cássia Juliana Fernandes Torres ⁽²⁾

Doutoranda do Centro Interdisciplinar em Energia e Ambiente, Universidade Federal da Bahia. e-mail: torres_cjf@yahoo.com.br

Katia Núbia Chaves Santana ⁽³⁾

Graduada de Engenharia Sanitária e Ambiental. e-mail: katiasantana1@gmail.com

Andrea Sousa Fontes ⁽⁴⁾

Professora Adjunto – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB. E-mail: andreafontes@ufrb.edu.br

RESUMO

A cheia é um fenômeno que ocorre em diversas regiões, por isso, reservatórios são utilizados como amortecedores dessas. No baixo trecho do rio São Francisco, situado nos estados da Bahia, Sergipe e Alagoas, o fluxo d'água é controlado pelos reservatórios de Sobradinho e Itaparica. A barragem de Xingó, localizada à jusante do reservatório de Sobradinho, funciona a fio d'água e está localizada entre Alagoas e Sergipe. As cidades e povoados, localizados nesses Estados, são afetados quando ocorrem inundações e cheias de grandes dimensões. Desta maneira, este trabalho tem como principal objetivo estudar a propagação de ondas de cheia à jusante da barragem de Xingó no rio São Francisco, entre as estações fluviométricas de Piranhas e Pão de açúcar. A presente pesquisa foi realizada em três etapas: caracterização do rio e da ocupação das margens no trecho de estudo; avaliação dos hidrogramas das estações fluviométricas de Piranhas e de Pão de açúcar; e, simulação da onda de cheia utilizando o modelo hidrodinâmico HEC-RAS. O resultado dos hidrogramas, das variáveis hidrodinâmicas e das simulações, permitiram verificar que a onda propagada de uma estação à outra perde intensidade de velocidade e elevação devido a geomorfologia do município de Pão de Açúcar. Foi possível concluir que o modelo, apesar das limitações de dados, apresentou eficiência nas informações disponibilizadas para ações de prevenção aos danos de inundação.

PALAVRAS-CHAVE: Propagação de ondas de cheia, HEC-RAS, Barragem de Xingó.

INTRODUÇÃO

Ao longo da história, as primeiras civilizações surgiram e se desenvolveram as margens de rios. Isso aconteceu porque essa localização era favorável para o desenvolvimento socioeconômico. O processo de urbanização e aumento da densidade demográfica promoveu a ocupação desenfreada das cidades. Essa ocupação ocorreu em muitos casos, em área de risco, como por exemplo, próximos às margens de rios, o que desencadeou áreas com maior probabilidade de inundações em períodos de cheia.

Na ocorrência de grandes cheias e inundações é possível que não apenas o leito menor da calha do rio seja inundado, como também, o leito maior periódico e o leito maior excepcional. Para evitar a ocupação desses leitos maiores é necessária a definição da planície de inundação, uma vez que durante esses fenômenos a planície torna-se parte integrante da calha do rio.

Uma das medidas de contenção de cheias é a construção de reservatórios, que além dessa finalidade, tende a trazer benefícios à sociedade no atendimento dos múltiplos usos da água. As barragens funcionam como contenções de água no período seco e são responsáveis pelo controle dos escoamentos, níveis de água, e conseqüentemente, pelo controle das cheias. Dessa maneira, a presença de uma barragem no trecho de um rio pode minimizar os impactos desses eventos extremos conforme a operação de seus reservatórios, visando o amortecimento de cheias.

O estudo da propagação de ondas de cheia possui grande relevância no planejamento e gestão das águas, tendo a finalidade de indicar possíveis áreas de risco e estimar o tempo de propagação da onda, para assim, auxiliar na tomada de decisão a respeito da necessidade de retirada da população dessas áreas potenciais em caso de emergências.

Para prever cenários futuros e simular ocorrências de cheia, pode-se recorrer ao auxílio dos modelos hidrodinâmicos, os quais permitem a reprodução de escoamentos em canais e, segundo TUCCI (1998), apresenta a característica de sintetizar

as vazões em rios e em rede de canais. Modelos hidrodinâmicos utilizam, dentre outras, as equações de Saint Venant, referente às equações de continuidade e dinâmica, embora também utilizem as equações de Navier Stokes. De acordo com TUCCI (1998), as equações de Saint Venant representam a base para o estudo do escoamento superficial de bacias e o escoamento em rios. Segundo Porto (2006), tal metodologia propicia uma maior precisão na descrição do escoamento, à custa de uma maior dificuldade numérica de resolução das equações diferenciais e menor necessidade de dados que os modelos de difusão e onda cinemática.

Um dos modelos hidrodinâmicos de ampla aplicação é o *The Hydrologic Engineering Center - River Analysis System* (HEC-RAS). Esse modelo permite a simulação de escoamentos permanentes e variados, transportes de sedimentos e qualidade da água (HEC-RAS, 2010), é um modelo unidimensional, uma ferramenta livre e de fácil manipulação.

Dentro desse contexto, esse estudo visa contribuir para a identificação do comportamento de uma cheia e da planície de inundação através do modelo hidrodinâmico HEC-RAS, e identificar possíveis danos econômicos e sociais nas áreas atingidas pela propagação da onda de cheia.

OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é analisar a propagação da onda de cheia à jusante da barragem de Xingó localizada no baixo trecho do rio São Francisco, a partir da construção de hidrogramas, e identificar possíveis áreas potenciais de inundação.

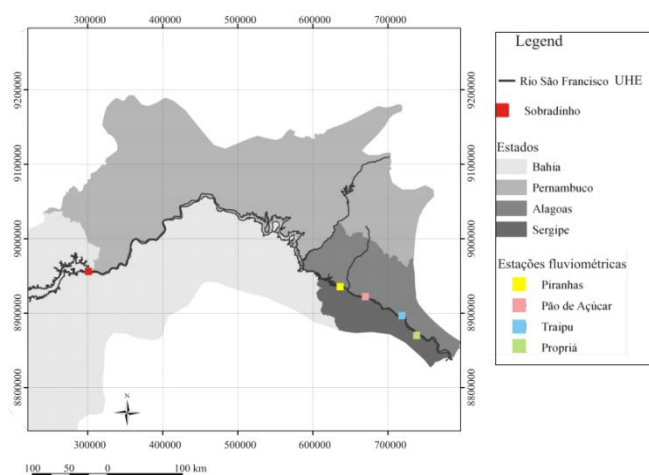
MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em três etapas: (i) caracterização do rio e da ocupação das margens do mesmo no trecho de estudo; (ii) avaliação dos hidrogramas nas estações fluviométricas de Piranhas (49330000) e de Pão de açúcar, de (49370000), a partir dos dados disponíveis; e, (iii) simulação da onda de cheia com o auxílio do modelo hidrodinâmico HEC-RAS.

Área de estudo

A área de estudo do presente trabalho está situada à jusante da usina de Xingó, localizado na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco, entre as estações fluviométricas de Piranhas (49330000) e Pão de Açúcar (49370000). A barragem encontra-se na divisa dos Estados de Alagoas e Sergipe entre as cidades de Canindé do São Francisco e Piranhas. A bacia hidrográfica do rio São Francisco possui área de drenagem de 634.781 Km² (8 por cento do território nacional), abrange 503 municípios, o Distrito Federal, e mais seis Estados brasileiros: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás (CBHSF, 2004). O trecho de estudo não apresenta barragens ou pontes, e tem aproximadamente 90 quilômetros de extensão, numa trajetória terrestre. As cidades nas quais as estações se encontram são Piranhas e Pão de Açúcar, municípios pertencentes ao Estado de Alagoas. Na figura 1 pode-se observar a delimitação do trecho de estudo do presente trabalho.

Figura 1: Localização da área de estudo



Fonte: Martins et al (2011) *apud* Santana et al. (2015)

Avaliação dos hidrogramas e propagação da onda de cheia

A caracterização à jusante foi composta por três etapas: (i) identificação das ocupações urbanas; (ii) avaliação do perfil transversal nas seções; e, (iii) identificação das cotas de inundação. Com relação à avaliação do comportamento dos hidrogramas característicos do rio São Francisco no trecho estudado, esta foi dividida em cinco partes: (i) divisão dos períodos temporais (antes e depois da construção da barragem de Sobradinho); (ii) construção dos hidrogramas médios mensais para identificação dos períodos de cheia; (iii); seleção de eventos extremos de cheia; (iv) avaliação a nível diário de eventos de cheia com magnitudes diferentes; e; (v) comparação do comportamento hidrológico das duas seções. Por fim, o procedimento da simulação foi dividido em: (i) identificação e obtenção dos dados necessários para a simulação; (ii) simulação; e, (iii) avaliação de respostas do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram analisados a partir dos seguintes aspectos: identificação da cota de inundação, análise dos hidrogramas e simulação da propagação de onda de cheia, utilizando o modelo HEC-RAS.

Nas figuras 2 e 3 estão apresentadas as cotas de inundação identificadas de acordo com o perfil transversal das cidades do trecho de estudo. O valor que os níveis d’água alcançaram foi de, aproximadamente, 28 metros para a seção de Piranhas e 18 metros para a seção de Pão de Açúcar.

Figura 2: Identificação da cota de inundação de Piranhas

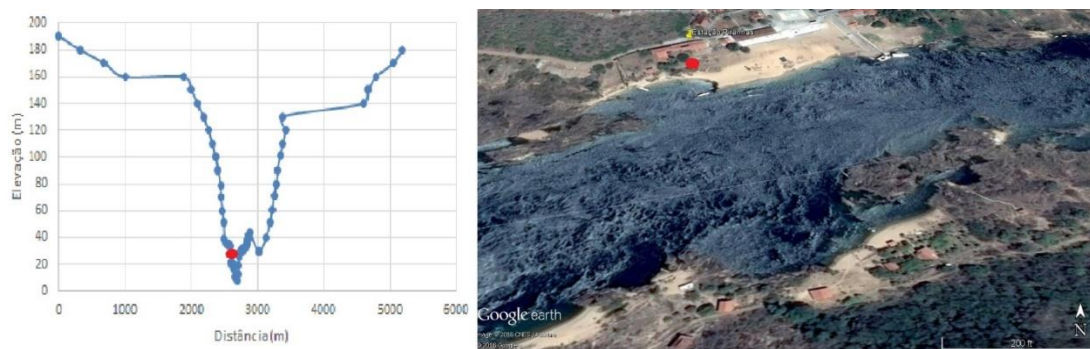
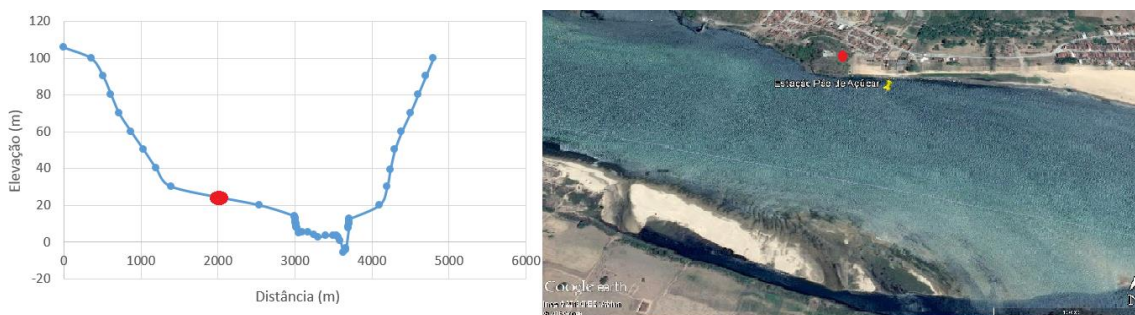
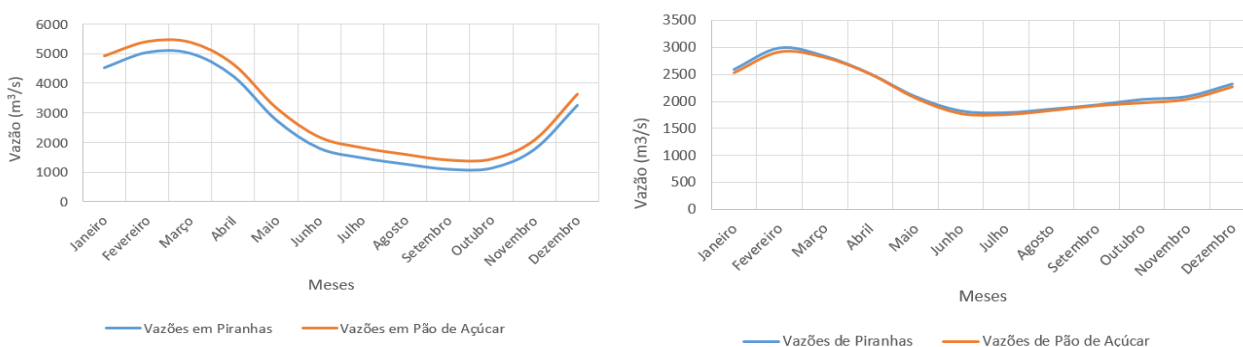


Figura 3: Identificação da conta de inundação de Pão de Açúcar



A variação das vazões médias no baixo trecho do rio São Francisco presente nas estações de Piranhas e Pão de Açúcar, referentes aos períodos de 1931-1973 e 1980 - 2015 são apresentadas na figura 4.

Figura 4: Hidrogramas mensais dos períodos de 1931-1973 e 1980-2015, respectivamente



É possível perceber através dos hidrogramas, que os índices de vazão média mais elevados encontram-se entre os meses de dezembro a abril, o que caracteriza o período de cheia, ultrapassado os 5.000 m³/s, enquanto que nos períodos de seca esse índice fica em torno de pouco mais de aproximadamente 1.000 m³/s.

Verifica-se, portanto, que as vazões médias para o período de 1931-1973 não apresentaram diferenças significativas de uma estação para outra, devido a distância entre as estações hidrométricas de Piranhas e Pão de Açúcar. Isso sinaliza que não há contribuições laterais significativas nesse trecho. Já o hidrograma referente ao período de 1980 e 2015 apresenta uma redução nessa diferença com máxima vazão média inferior a 3000 m³/s. Isso acontece porque nesse período, que representa a série temporal após a construção da barragem de Sobradinho, a qual funciona como reguladora de cheia, as vazões passam a ser controladas pelo barramento, visto que a UHE-Xingó não tem a finalidade de controlar por ser a fio d'água.

Para fazer o estudo do comportamento da vazão no tempo foram selecionados quatro eventos extremos de cheia, a nível diário. A tabela 1 mostra os eventos selecionados considerando magnitudes de vazão superiores a 8.000 m³/s, que representa a máxima operativa a jusante de Sobradinho.

Tabela 1: Eventos extremos de cheia selecionados para o estudo

| Evento | Vazão máxima (m ³ /s) | | Cota máxima (m) | | Dia da máxima | | Duração do evento (dias) |
|--------|----------------------------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------|
| | Piranhas | Pão de Açúcar | Piranhas | Pão de Açúcar | Piranhas | Pão de Açúcar | |
| 1 | 12.328,00 | 11.412,48 | 1274 | 877 | 2/24/1943 | 2/24/1943 | 59 |
| 2 | 15.056,00 | 14.342,92 | 1398 | 974 | 3/18/1949 | 3/17/1949 | 80 |
| 3 | 8.536,70 | 8.883,51 | 1051 | 729 | 3/19/1945 | 3/19/1945 | 35 |
| 4 | 8.570,40 | 8.822,55 | 725 | 725 | 2/14/1963 | 2/14/1963 | 51 |

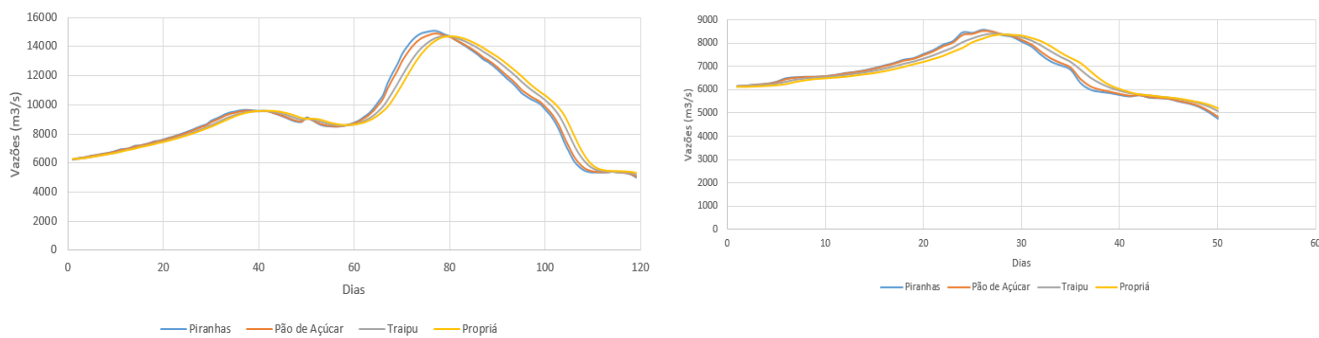
Quanto à duração dos eventos de cheia selecionados foi identificada a elevação da vazão do rio durante períodos de 20 dias. No evento 2, por haver a sucessão de dois eventos de cheia, esse período de aumento da vazão durou cerca de 80 dias para início da recessão do hidrograma. Em média, os eventos selecionados duraram 66 dias.

Os hidrogramas referentes aos eventos 1 e 2 representam as maiores cheias observadas no período estudado, superiores a 12.000 m³/s. O formato desses hidrogramas sinalizam que o tempo de escoamento da onda de cheia é inferior a escala avaliada de 1 dia, uma vez que os picos encontram-se alinhados. Entretanto, as vazões de pico identificadas na estação de Piranhas nos dois eventos são superiores às vazões identificadas em Pão de Açúcar. Isso pode acontecer uma vez que, a vazão média diária é medida em dois horários coincidentes nas duas estações, o que não possibilita o registro dessa propagação. Essa superação de valores acontece apenas quando as vazões atingem valores maiores que 11.000 m³/s.

Este fato é confirmado nos eventos 3 e 4, quando os picos não ultrapassam 9.000 m³/s e os valores das vazões de Pão de Açúcar são próximos, mas superiores as vazões em todo o evento de cheia registrado. Uma vez que os hidrogramas diários não conseguiram representar a propagação da onda de cheia entre as estações de Piranhas e Pão de Açúcar, já que o tempo de escoamento entre as duas seções é inferior a um dia, para o estudo dessa propagação foi necessário a utilização da modelagem matemática, com uso do modelo hidrodinâmico HEC-RAS. Primeiramente, para a verificação da representatividade da modelagem, foi utilizado a geometria definida em Santana et al. (2015) e a calibração do coeficiente de Manning representado por Chagas (2009). A simulação foi realizada a nível diário utilizando os dados obtidos na avaliação dos eventos de cheia, apresentados na tabela 1. Os eventos utilizados para essa simulação foram os eventos 2 e o 4.

A figura 5 apresenta os hidrogramas referentes a passagem da onda de cheia simulada de acordo com os eventos 2 e 4, para o baixo trecho do Rio São Francisco que engloba as estações de Piranhas e Pão de Açúcar, os quais foram utilizados como condição de contorno para a simulação.

Figura 5: Hidrogramas diários simulados para as vazões máximas de 15000 m³/s e 8000 m³/s, respectivamente



Os hidrogramas de Piranhas e Pão de Açúcar apresentam comportamento semelhante confirmando as análises feitas anteriormente. A defasagem entre os hidrogramas simulados só é verificado na segunda ascensão dos hidrogramas para as seções a jusante de Pão de Açúcar (figura 5).

Na simulação do evento 2 a vazão máxima alcançada foi de 14.773,60 m³/s e a elevação de 27,33 m. Superando em aproximadamente 09 (nove) metros a elevação de inundação definida para essa seção. De acordo com dados de vazão, cota e velocidade dessa seção a elevação simulada está de acordo com o esperado, correspondendo a cotas maiores que 10 m. Já na simulação do evento 4 a vazão máxima alcançada foi de 8.478,69 m³/s e a elevação de 16,66 m. Não proporcionando inundação, na área urbana adjacente.

Após avaliado o comportamento do modelo em simular os eventos diários, foi realizada a simulação considerando a escala horária para melhor discretização do tempo de escoamento da cheia entre as seções. Para o hidrograma de entrada no trecho foram atribuídos os mesmos valores das vazões diárias, entretanto, considerando um intervalo horário. Isso resultou em uma cheia com duração de cerca de 3 dias para o evento 4 e uma cheia de 8 dias para o evento 2. A Figura 6 e a tabela 2 apresentam os resultados dessas simulações.

Figura 6: Simulação horária para o evento 2

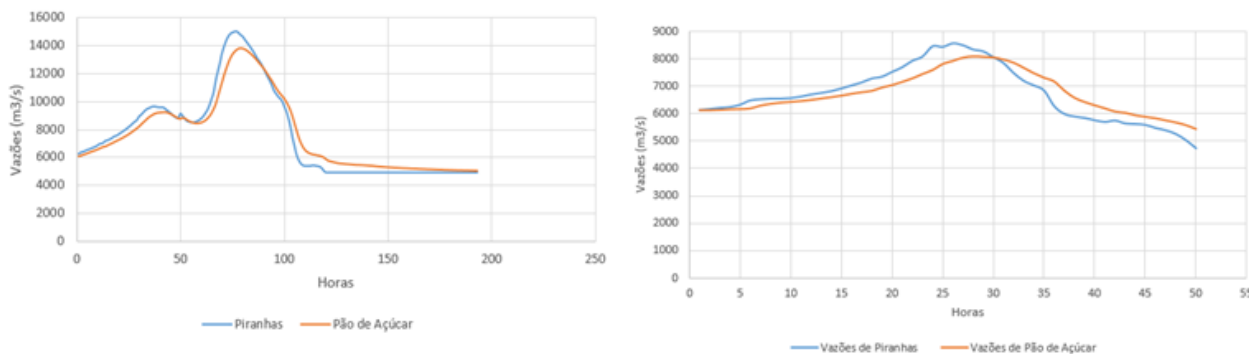


Tabela 2: Valores máximos para as variáveis simuladas

| Vazão máxima (m ³ /s) | | Elevação máxima (m) | | Velocidade (m/s) | | Tempo de escoamento (h) |
|----------------------------------|---------------|---------------------|---------------|------------------|---------------|-------------------------|
| Piranhas | Pão de Açúcar | Piranhas | Pão de Açúcar | Piranhas | Pão de Açúcar | |
| 15.056 | 13.780 | 26,38 | 19,22 | 2,9 | 1,05 | 2 |
| 8.570 | 8.085 | 20,85 | 14,3 4 | 2,34 | 0,84 | 3 |

A simulação horária resultou em um amortecimento do pico da vazão em 1.276 m³/s para o evento 2 e 500 m³/s para a segunda situação devido as características geométricas do trecho estudado. Isso refletiu na diminuição da elevação da linha de água e, conseqüentemente, a propagação da onda de cheia simulada não atingiu a cota de inundação para a seção de Pão de Açúcar na segunda situação.

CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou a propagação de onda de cheia entre duas estações fluviométricas nas quais, caracterizou-se a ocupação do vale à jusante com identificação da cota de inundação e análise das variáveis hidrodinâmicas; simulou-se a propagação de ondas de cheia e identificou-se as áreas inundadas. Desta maneira, pode-se inferir que é necessário

analisar eventos extremos de cheia em escala horária, para que seja extraída uma maior quantidade de detalhes e informações. Tem-se também que o modelo hidrodinâmico HEC-RAS se mostra bastante útil e eficiente, sendo capaz de representar os eventos de cheias escolhidos e o tempo de percurso dessas ondas, apesar de ser um modelo unidimensional.

A análise dos hidrogramas mensais pode ilustrar a não existência de diferença significativa, em relação ao comportamento das vazões nas estações estudadas, no período de 1931 a 1973, e que após a construção da barragem de Sobradinho houve uma regularização das vazões, como mostrado no hidrograma do período de 1980 a 2015.

A simulação possibilitou ainda a estimativa do tempo do escoamento da onda de cheia nas duas situações, relevando um tempo de 2 a 3 horas para a onda de cheia vinda de Piranhas até atingir o município de Pão de Açúcar. Esses resultados indicam a importância de estudo de propagação de ondas em trecho à jusante de reservatórios, para as tomadas de decisões, tal como dessa natureza para o direcionamento de ações de alerta a população ribeirinha.

REFERÊNCIAS

1. CHAGAS, R.M. Modelagem hidrodinâmica no Baixo São Francisco e análise da qualidade e quantidade de água para irrigação. In: Universidade Federal de Sergipe (dissertação de mestrado), Sergipe, 2009.
2. HEC - HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC-RAS River Analysis System: User's Manual. Version 4.1. Janeiro de 2010.
3. PORTO, R. de M. Hidráulica Básica. 4. Ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.
4. SANTANA, K.N.C; TORRES, C.J.F.; FONTES, A.S.; MEDEIROS, Y.D.P. Alteração do regime hidrodinâmico no baixo curso do rio São Francisco, Brasil. Simpósio de Hidráulica e recursos hídricos dos países de língua portuguesa, 2015.
5. SANTANA, K.N.C; TORRES, C.J.F.; FONTES, A.S.; MEDEIROS, Y.D.P. Ecological Restoration on the Lower São Francisco River, Brazil. I Specialized Conference on Ecology, Management and River Restoration: Practices and Experiences. Lisbon University/FLUVIO Programme – Federal University of Bahia/MAASA, 2015.
6. TUCCI, C.E.M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre. Editora da Universidade. UFRG. ABRH.1998.669 p.