

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ESTUDAR O RISCO DE INUNDAÇÃO: o caso de dois rios Americanos

Carla Freitas de Andrade¹; Patrícia Freire Chagas² & Raimundo Oliveira de Souza³

RESUMO - Este trabalho mostra os aspectos teóricos da modelagem da propagação de onda dinâmica em canais naturais com relação à inclinação das paredes do canal, e a suas influências no estudo das áreas de risco de enchentes próximas de um rio. O desenvolvimento da equação de propagação de cheia pela onda dinâmica é apresentado resumidamente e são discutidos e estabelecidos às condições necessárias fundamentais para sua aplicação com sucesso no processo de delimitação das áreas propícias a inundação. Um modelo computacional foi desenvolvido e proposto para descrever o comportamento da vazão, da profundidade, da área e da velocidade em canais naturais, sob a influência deste parâmetro. O modelo usa um esquema implícito de diferenças finitas, gerando resultados que, comparados com a literatura existente, garantem uma excelente eficiência do mesmo, para os valores dos parâmetros hidráulicos considerados, em cada ponto da malha $x - t$ do canal. O programa foi aplicado para dois rios americanos, onde foi avaliada a influência de seus parâmetros no estudo de planícies de inundação.

ABSTRACT – This paper shows the theoretical aspects involving dynamic wave routing modeling in natural channels, with respect to channel lateral wall slope, and their influence in the study of risk flood areas near riverine systems. The development of the dynamic wave routing is briefly presented and the fundamental necessary conditions for its successful application to the process of delimitating vulnerable areas to floods are discussed and established. A computational model is developed and proposed to describe the discharge, water depth, cross-sectional area of flow and velocity behavior in natural channels, under the influence of this parameter. The proposed computational model uses an implicit finite difference scheme, whose results, when compared with other results presented in the literature, guarantee an excellent efficiency for the hydraulic parameters considered in each point of the mesh on the $x-t$ plane. The program was applied in two American rivers, where it was verified the influences of their parameters in the flood plan studying.

Palavras-chave: Onda dinâmica, modelagem computacional, planície de inundação.

1) Doutora em Recursos Hídricos - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici – Bloco 713 – Fortaleza, Ceará – Brasil – CEP 60.451-970 – Fone: (85) 3366.9771, (85) 32625464. Fax: (85) 4008.9627 – e-mail: engenheiracarla@yahoo.com

2) Doutora em Recursos Hídricos – Instituto de Gestão de Água do Rio Grande do Norte - IGARN – e-mail: pfchagas@yahoo.com

3) Professor PHD - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici – Bloco 713 – Fortaleza, Ceará – Brasil – CEP 60.451-970 – Fone: (85) 3366.9771. Fax: (85) 3366.9627 – e-mail: rsouza@ufc.br

1 – INTRODUÇÃO

A ocupação desordenada dos centros urbanos é explicada pelo desenvolvimento histórico da utilização de áreas livres. Devido à grande dificuldade de meios de transporte no passado, utilizava-se o rio como a via principal. Em razão disso, as cidades começavam a se desenvolver às margens dos rios ou em áreas costeiras. Contudo, pela própria experiência dos antigos moradores, a população procurou habitar as zonas mais altas onde o rio dificilmente chegaria. Com o crescimento desordenado e acelerado das cidades, principalmente na segunda metade do século XX, as áreas de considerável risco, como as várzeas inundáveis, foram ocupadas, trazendo, como conseqüências, grandes prejuízos para estas populações.

Todo esse aumento da urbanização e a falta de um planejamento da cidade provocam diversas conseqüências ao regime dos cursos de água, tais como: aumento da vazão máxima e do escoamento superficial, redução do tempo de pico e aumento da freqüência da inundação nas cheias pequenas e médias.

Neste contexto, há necessidade de se estudar formas de planejamento urbano, de modo que estas ocupações sejam estruturadas e, conseqüentemente, sejam reduzidos os riscos de enchentes em áreas utilizadas, principalmente, para habitação.

Para iniciar o estudo das formas de planejamento urbano, nas proximidades de um sistema hídrico qualquer, é necessário conhecer a dinâmica do rio. Em outras palavras, procura-se saber como o rio responde a uma enchente, considerando que a propagação de uma onda de cheia, no espaço e no tempo, é um problema complexo.

Diante deste problema, estudou-se a dinâmica de dois rios americanos, cujos dados foram retirados da literatura, para saber qual a influência de determinados parâmetros hidráulicos na altura de água, devido a uma onda de cheia, e quais as precauções que podem ser tomadas nas margens destes rios.

Para tal, resolveu-se as equações matemáticas governantes, utilizando os modelos matemáticos, baseado nas equações de Saint-Venant e resolvido pelo método das diferenças finitas.

Os resultados obtidos através da solução desses modelos matemáticos podem auxiliar os responsáveis pelos programas de planejamento urbano na conscientização do desejo de construir e viver ao longo de rios com um pouco mais de segurança. Destas necessidades, vem o ímpeto de desenvolver modelos complexos de estudo de propagação de escoamento, tais como os modelos de propagação da onda dinâmica.

2 – METODOLOGIA

O tratamento matemático do escoamento em rios é bem mais complexo, mesmo em situações mais simples, como a propagação de uma onda de cheia em um canal prismático e retilíneo, no qual não ocorre extravasamento da seção, nem aporte lateral de vazão.

O escoamento da água, como fenômeno, é regido por leis físicas, e representado quantitativamente por variáveis tais como vazão, profundidade, área e velocidade. O comportamento do movimento da água, em rios e canais, é representado matematicamente por duas equações diferenciais, que controlam a conservação de massa e de quantidade de movimento do escoamento. Tais equações são comumente chamadas de equações de Saint–Venant. A dedução destas equações foi apresentada por Yen (1973), sendo a equação da continuidade dada por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q, \quad (1)$$

onde Q é a vazão em m^3/s ; A é a área da seção molhada em m^2 ; x é a distância no sentido longitudinal em m; t é o tempo em segundos; e q é a vazão por unidade de largura de contribuição lateral em $m^3/s / m$.

E a equação da quantidade de movimento expressa por:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gAS_f + gAS_e + B.W_f + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gAS_0 \quad (2)$$

As Equações (1) e (2) são as equações do escoamento unidimensional não permanente variado para canais abertos, ou **Equações de Adhémar Jean Barré de Saint–Venant**, matemático e engenheiro francês (1797–1886). Elas foram publicadas em 1870 nos Anais da Academia Francesa de Ciências, e se constituem um conjunto de equações governantes do escoamento em rios e canais, com um sistema de duas equações, com derivadas parciais em relação a x e a t , cuja integração exata é, normalmente, muito complicada e sua solução analítica só é possível em casos especiais. Entretanto, existem diferentes técnicas numéricas para sua resolução.

O emprego da Equação (1) com a Equação (2), quando são considerados todos os termos envolvendo aceleração e pressão, estabelece os fundamentos do modelo de propagação de uma onda dinâmica de cheia, denominado *modelo hidrodinâmico*. Esta será a onda a ser considerada na influência de uma onda de cheia sobre dois determinados rios americanos.

Para resolver estas equações, utilizou-se o método das diferenças finitas para discretizá-las. Após as substituições, devido a discretização, obteve-se, para a equação da continuidade, a seguinte expressão, conforme Andrade (2003):

$$\begin{aligned} & \theta \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1-\theta) \frac{Q_{i+1}^j - Q_i^j}{\Delta x_i} + \frac{A_i^{j+1} + A_{i+1}^{j+1} - A_i^j - A_{i+1}^j}{2\Delta t_j} + \\ & \theta \frac{q_i^{j+1} + q_{i+1}^{j+1}}{2} + (1-\theta) \frac{q_i^j + q_{i+1}^j}{2} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

E para a equação da quantidade de movimento, obteve-se:

$$\begin{aligned} & \frac{Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j+1}}{2\Delta t_j} - \frac{Q_i^j + Q_{i+1}^j}{2\Delta t_j} + 2 \left[\theta \frac{\left(\frac{Q_i^{j+1}}{A_i^{j+1}} + \frac{Q_{i+1}^{j+1}}{A_{i+1}^{j+1}} \right)}{2} + (1-\theta) \frac{\left(\frac{Q_i^j}{A_i^j} + \frac{Q_{i+1}^j}{A_{i+1}^j} \right)}{2} \right] \\ & \left[\theta \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1-\theta) \frac{Q_{i+1}^j - Q_i^j}{\Delta x_i} \right] - \\ & \left[\theta \frac{\left[\frac{(Q_i^{j+1})^2}{(A_i^{j+1})^2} + \frac{(Q_{i+1}^{j+1})^2}{(A_{i+1}^{j+1})^2} \right]}{2} + (1-\theta) \frac{\left[\frac{(Q_i^j)^2}{(A_i^j)^2} + \frac{(Q_{i+1}^j)^2}{(A_{i+1}^j)^2} \right]}{2} \right] \\ & \left[\theta \frac{A_{i+1}^{j+1} - A_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1-\theta) \frac{A_{i+1}^j - A_i^j}{\Delta x_i} \right] + g \left[\theta \frac{A_i^{j+1} + A_{i+1}^{j+1}}{2} + (1-\theta) \frac{A_i^j + A_{i+1}^j}{2} \right] \\ & \left[\theta \frac{y_{i+1}^{j+1} - y_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1-\theta) \frac{y_{i+1}^j - y_i^j}{\Delta x_i} \right] - g \left[\theta \frac{A_i^{j+1} + A_{i+1}^{j+1}}{2} + (1-\theta) \frac{A_i^j + A_{i+1}^j}{2} \right] S_0 + \\ & g \left[\theta \frac{A_i^{j+1} + A_{i+1}^{j+1}}{2} + (1-\theta) \frac{A_i^j + A_{i+1}^j}{2} \right] \\ & \left[\theta \frac{S_{f_i}^{j+1} + S_{f_{i+1}}^{j+1}}{2} + (1-\theta) \frac{S_{f_i}^j + S_{f_{i+1}}^j}{2} \right] = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Embora a equação da onda dinâmica proporcione a mais precisa e compreensiva aproximação para propagação de cheias, os dados e os tempos necessários para serem computados são grandes. Um típico grupo de dados de entrada necessário inclui: (1) seção transversal do rio; (2) valores do coeficiente de rugosidade de Manning (n); (3) um perfil da superfície de água inicial; (4) um hidrograma de entrada; e (5) uma relação entre cota–vazão para a extremidade a jusante do trecho de propagação.

O movimento de uma onda de cheia propagando-se em um canal, que geralmente é aquele de um rio natural, é um dos mais importantes fenômenos de escoamento não permanente que o engenheiro possa tratar. É essencial que o engenheiro possua meios teóricos para determinar o comportamento de uma onda de cheia em um canal, de forma e declividade específica, porque ele deve ser capaz de predizer o efeito da propagação da cheia nas mudanças ocorridas ao longo do canal, a fim de sugerir modificações no rio natural, para o melhoramento do canal e para o controle de cheia.

Uma planície de inundação é, normalmente, uma área de terra seca ao lado de rios, cursos de água, lagos, baías ou oceanos, que é inundada durante eventos de cheias. Os casos mais comuns de enchentes são os transbordamentos dos cursos de águas e rios e, anormalmente, altas marés resultantes de tempestades severas.

O primeiro passo, para qualquer análise de planície de inundação, é coletar dados, incluindo mapas topográficos, dados de descarga de cheia, se uma estação de medição de vazão está próxima, dados de precipitação pluviométrica, se os dados de descarga de cheia não estão disponíveis, levantamento topográfico da seção transversal, e estimativa da rugosidade do canal para um número de pontos ao longo do curso de água. É também solicitada uma determinação da vazão de cheia, para um desejado período de retorno.

A invasão na planície de inundação, a exemplo do que ocorre por material de enchimento artificial, reduz a capacidade de carregamento da inundação, aumenta a altura de água das cheias dos cursos de água e aumenta os riscos nas áreas além da invasão.

Novas construções na planície de inundação, obstruções diversas, ou outras mudanças no uso da terra, podem afetar as vazões dos cursos de água, a elevação das superfícies de água e as velocidades de escoamento, mudando, portanto, o perfil de elevação que define a planície de inundação.

3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Procurando aplicar o modelo desenvolvido na solução de problemas práticos, fez-se a simulação do comportamento da vazão e da profundidade do escoamento para dois rios dos Estados Unidos, cujas características estão registradas em Chapra (1997). Cada um deles tem características hidráulicas diferentes. Contudo, considerou-se o lançamento de uma mesma onda de cheia para ambos os rios.

O primeiro rio a ser considerado foi o Rio Bayou Anacoco, com coeficiente de rugosidade de Manning valendo 0,058, declividade do fundo do canal igual a 0,0005 m/m e largura de 32 m.

As Figuras 1 e 2 mostram a propagação do escoamento, isto é, o comportamento da vazão ao longo do canal, para diferentes tempos, e ao longo do tempo, para diferentes seções do canal.

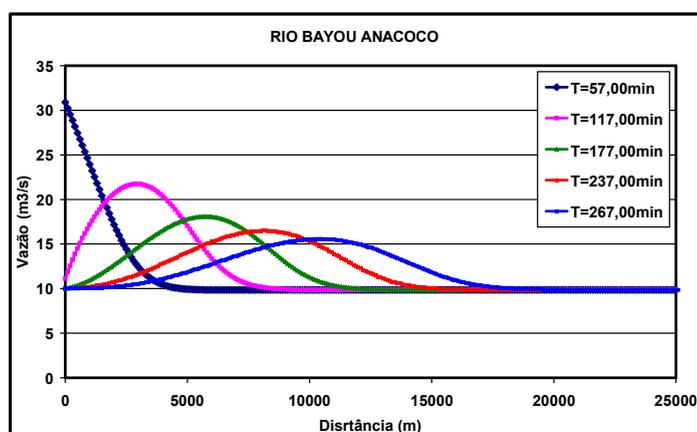


Figura 1 – Propagação da onda para diferentes tempos

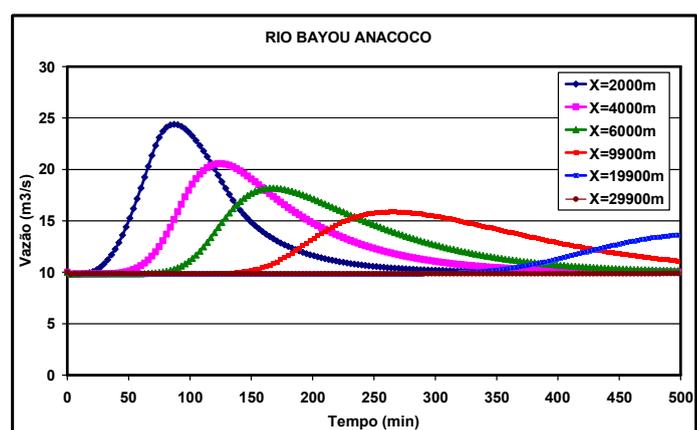


Figura 2 – Propagação da onda para diferentes seções do canal

Na Figura 1, a vazão se propaga ao longo do canal, para diferentes tempos, percebendo-se que, à medida que o trecho considerado está mais afastado da origem, o pico da vazão tende a diminuir. Com a passagem da onda, o pico vai diminuindo e o tempo de base aumentando, pois a onda vai perdendo energia e se dissipando.

Na Figura 2, observa-se, também, que, além da redução da amplitude dos picos da onda, os picos se afastam mais da origem. Para determinar a velocidade com que esta onda está se propagando ao longo do canal, basta calcular a celeridade, que é dada pela razão entre os incrementos Δx e Δt , calculados entre duas cristas consecutivas.

Ainda para o Rio Bayou Anacoco, as Figuras 3 e 4 mostram como ocorre a variação da profundidade do escoamento ao longo do canal, para diferentes tempos, e a variação da profundidade ao longo do tempo, para diferentes seções do canal.

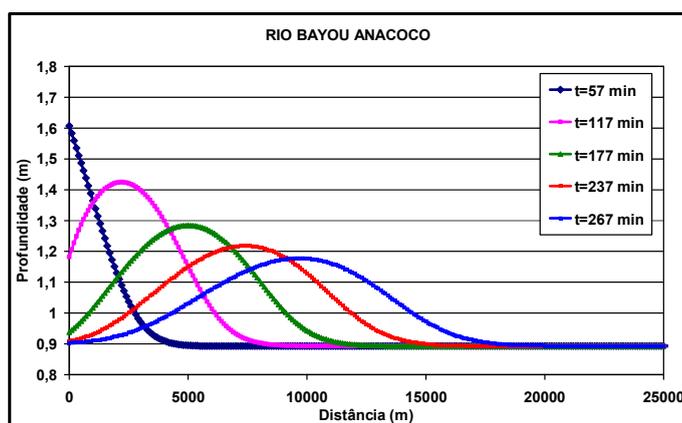


Figura 3 – Comportamento da profundidade para diferentes tempos

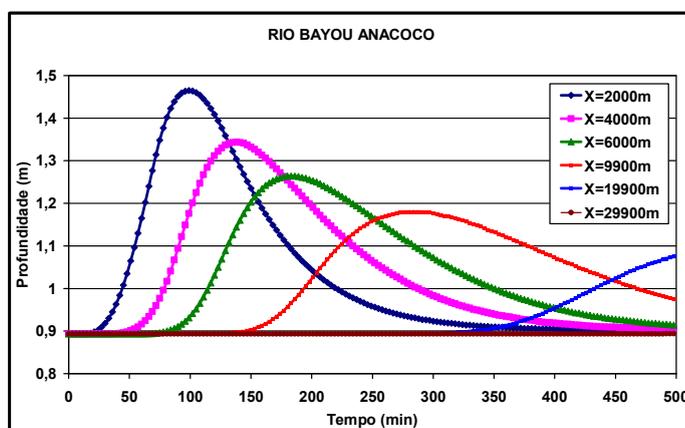


Figura 4 – Comportamento da profundidade para diferentes seções do canal

Observa-se a coerência entre as Figuras 1 e 3 e entre as Figuras 2 e 4, pois, para esta situação, onde os parâmetros hidráulicos foram mantidos constantes, há uma concordância entre a variação de vazão e a variação da profundidade do escoamento no canal. Em outras palavras, se a vazão diminui, ou seja, se a quantidade de água que chega a uma determinada seção do canal é menor, a altura do nível de água também tende a diminuir (ANDRADE, 2006). Também se nota, através das Figuras 3 e 4, que as alturas vão diminuindo à medida que a onda passa, com um pico de vazão menor.

Todas as observações feitas para o Rio Bayou Anacoco, também podem ser notadas para o caso do Rio Copper, na Virgínia. As Figuras 5 a 8, apresentadas a seguir, ilustram as simulações realizadas para tal rio, cujo coeficiente de rugosidade de Manning vale 0,076, a declividade do fundo do canal é 0,0013 e a largura do canal é de 17 m.

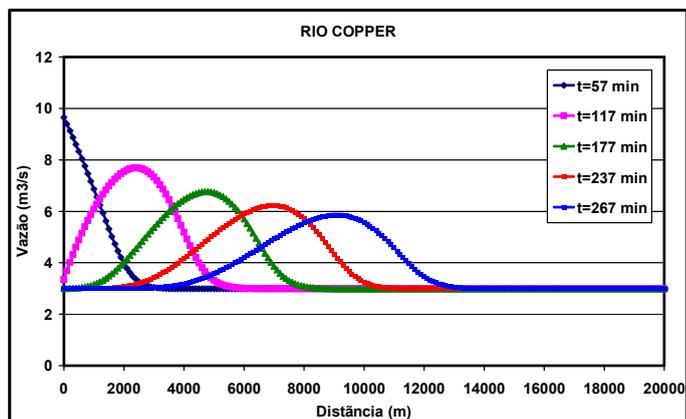


Figura 5 – Propagação da onda para diferentes tempos

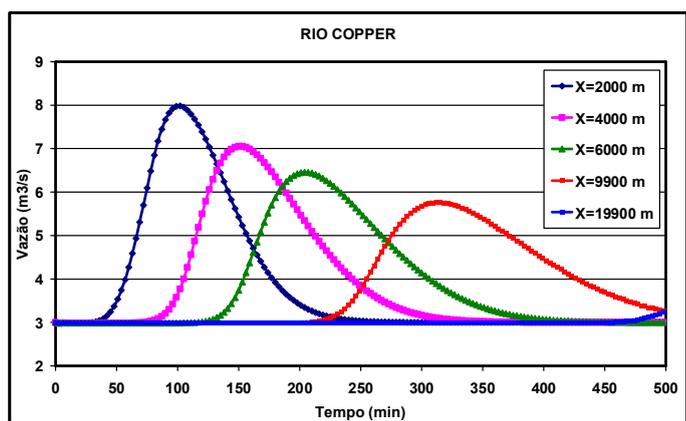


Figura 6 – Propagação da onda para diferentes seções do canal

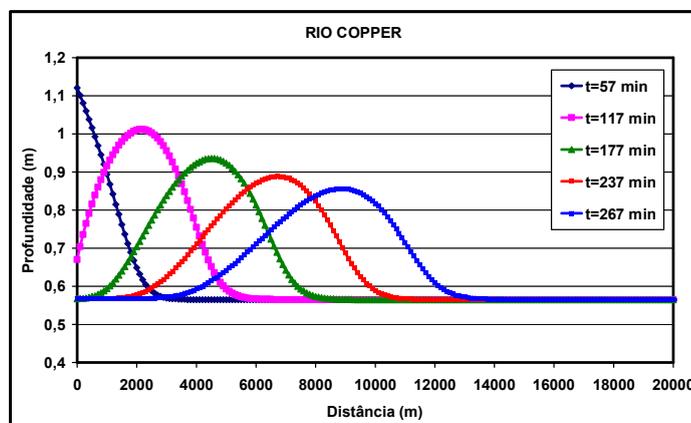


Figura 7 – Comportamento da profundidade para diferentes tempos

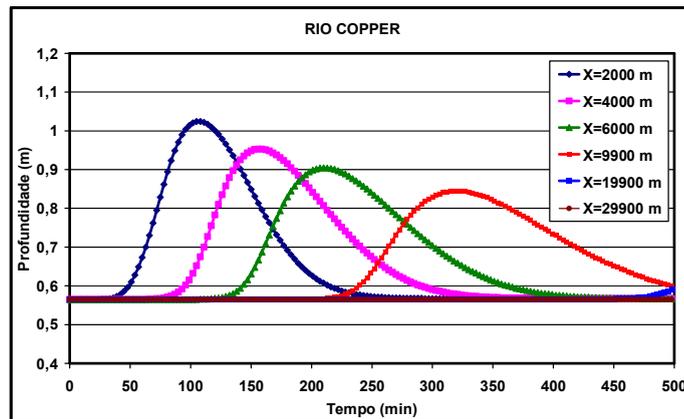


Figura 8 – Comportamento da profundidade para diferentes seções do canal

Um estudo comparativo pode ser mostrado com relação à profundidade do escoamento e a vazão dos rios Bayou Anacoco e Cooper.

Nas Figuras 9 a 12, é feita uma comparação entre estes dois rios com características hidráulicas diferentes, considerando o comportamento da profundidade do escoamento e o comportamento da vazão. As Figuras 9 e 10 comparam as profundidades de escoamento. Percebe-se que o Rio Copper tem maiores valores do nível de água. Isto pode ser explicado pelo fato de que, apesar do rio ter uma vazão média menor do que o Rio Bayou Anacoco nas áreas que estão sob o ataque da propagação da onda, como pôde ser visto na Figura 11, possui coeficiente de rugosidade maior, declividade maior e uma largura menor, o que garante uma maior profundidade para o Rio Copper. A combinação destes três parâmetros acaba por alterar a vazão de escoamento no canal. Vale ainda salientar que pela Figura 12, o Rio Copper tem uma menor celeridade, tendo, portanto, uma menor energia de propagação. Este fato é explicado pela combinação dos parâmetros hidráulicos do rio.

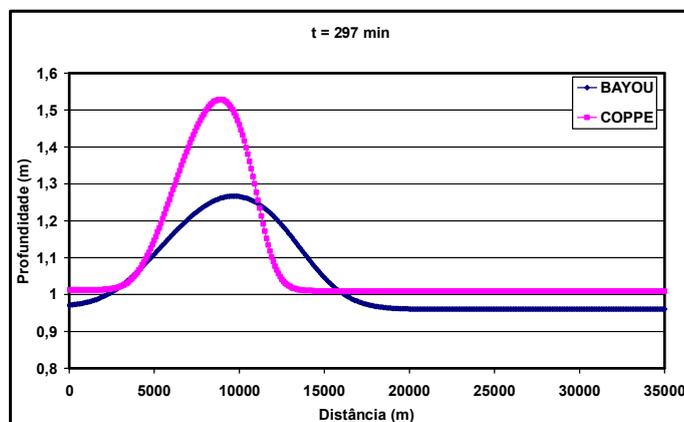


Figura 9 – Comparação das profundidades ao longo do canal para $t = 297$ min

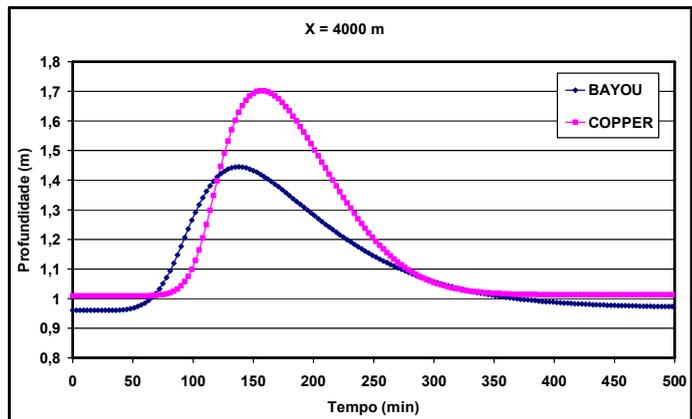


Figura 10 – Comparação das profundidades ao longo do tempo para $x = 4.000$ m

Pode ser observado, através das Figuras 11 e 12, que a análise anterior vale também para a propagação da onda de cheia.

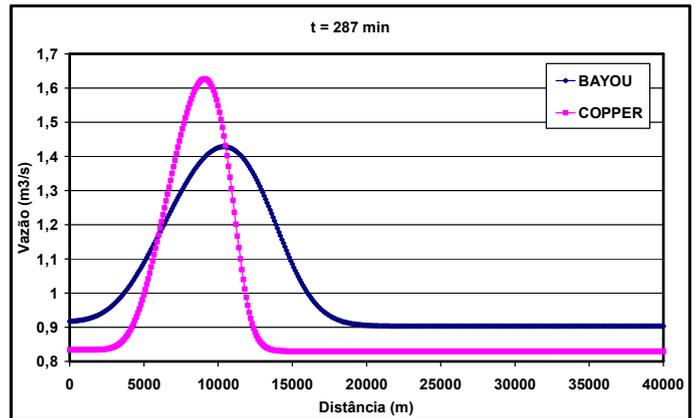


Figura 11 – Comparação das vazões ao longo do canal para $t = 297$ min

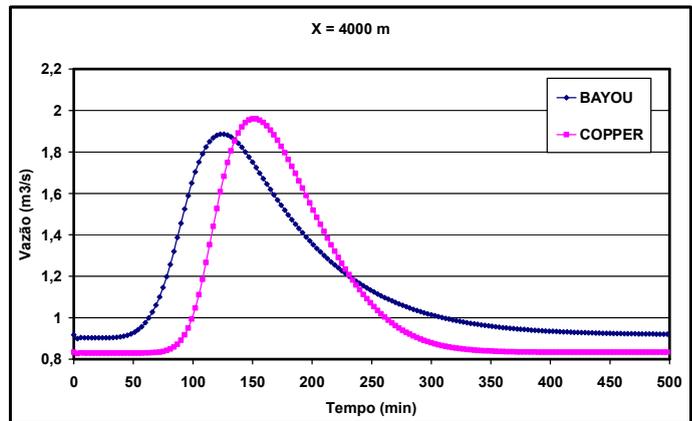


Figura 12 – Comparação das vazões ao longo do tempo para $x = 4.000$ m

Ciente da eficiência e da versatilidade do programa computacional desenvolvido para o modelo aqui proposto, procurou-se explorar a sua robustez, através da avaliação do comportamento da vazão e da profundidade do escoamento diante de variadas situações simuladas.

4 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo foi testado na simulação da propagação de uma onda de cheia para dois rios dos Estados Unidos, cujos parâmetros hidrológicos são conhecidos através de dados registrados na literatura. O objetivo foi mostrar como uma onda de cheia se propaga em dois rios com parâmetros hidráulicos diferentes. Os resultados permitiram concluir que esta propagação se desenvolve em função das características hidráulicas de cada rio. Por exemplo, as simulações mostraram que o Rio Copper, com suas características próprias, onde a rugosidade é maior, a declividade é também maior, porém com uma largura menor, tem, para uma mesma onda de cheia, possibilidades de inundação maiores do que o Rio Bayou Anacoco;

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Carla Freitas. (2003). *Aplicação dos Modelos Hidrodinâmicos para Estudar Índices de Poluição em Rios Urbanos, em Função dos Seus Parâmetros Hidráulicos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 165fl. Fev.

ANDRADE, Carla Freitas. *Estudo de Planícies de Inundação através da análise dos parâmetros hidráulicos do canal principal e sua influência na avaliação do risco fuzzy de enchentes*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 212fl. Set.

CHAGAS, P. F., *Perspectivas da Aplicação da Teoria Fuzzy para Cálculo de Risco em Sistemas Hidrodinâmicos*, Tese defendida no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisito para o título de Doutor em Recursos Hídricos, 2005.

CHAPRA, S. C. (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. New York: McGraw-Hill, 844p.

YEN, B. C. (1973). “*Open-channel flow equations revisited*”. *Water Resources*, n. 51, pp. 979–1009.

