

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ENCHENTES FLUVIAIS E DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NUM TRECHO URBANO DO RIO ARAGUAIA

Numerical simulation of fluvial floods and sediment transport in urban stretch of the Araguaia River

Lucas Eduardo de Jesus Lima¹, Marco Donisete de Campos²



PALAVRAS CHAVE:

Enchentes;
Assoreamento;
Método das Diferenças Finitas;
Modelagem e Simulação Numérica;
Rio Araguaia.

KEYWORDS:

Flooding;
Sedimentation;
Finite Differences Method;
Numerical Modeling and Simulation;
Araguaia River.

RESUMO: O Brasil é um país privilegiado em termos de sua rede hidrográfica. Assim, o aproveitamento racional e sustentável dos seus rios constitui uma tarefa relevante. Neste trabalho é apresentada uma avaliação de cenários fluviais envolvendo enchentes e transporte de sedimentos usando o Método das Diferenças Finitas para realização da simulação numérica, bem como sua aplicação considerando dados hidrológicos pertinentes ao Rio Araguaia num trecho urbano da região de Barra do Garças, em Mato Grosso. A simulação numérica do problema das enchentes, através da solução da equação de Burgers, forneceu uma evolução temporal do volume do rio e a formação dos saltos hidráulicos que caracterizam as inundações. Essa análise é pertinente como mecanismo de alerta para a evacuação de populações ribeirinhas em situações de perigo. Já para o problema de assoreamento, as soluções numéricas descreveram as variações no fundo móvel do rio e as regiões com impacto significativo do transporte de sedimentos. Os resultados retrataram um processo erosivo significativo para o cenário de estudo, rebaixando a sua cota de talvegue na jusante em 3 m e um volume total de sólido movimentado de 759,770 m³, aproximadamente 25 m³ de sedimentos carregados diariamente. Esse conjunto de informações poderá ser utilizado no delineamento das regiões assoreadas e da quantidade de sedimentos acumulada. Poderá, ainda, servir para complementar as discussões dos órgãos ambientais, confirmando a necessidade de ações corretivas tais como dragagem, reflorestamento e desocupação das margens do rio.

ABSTRACT: Brazil is a privileged country in terms of its hydrographic network. Thus, the rational and sustainable use of its rivers is a relevant task. In this paper, an assessment of river scenarios involving floods and sediment transport using the Finite Differences Method for numerical simulation is presented, as well as its application, considering the hydrological data pertinent to the Araguaia River in an urban stretch of the region of Barra do Garças in Mato Grosso. Using the Burgers equation, the numerical simulation of the flood problem provided a temporal evolution of the river volume as well as the formation of hydraulic jumps, which characterize the floods. As for the silting problem, the numerical solutions described the variations in the moving bottom of the river and the regions with significant sediment transport impact. The results showed a significant erosion process for the study scenario, lowering its thalweg downstream quota by 3 m and a total volume of moving solid of 759,770 m³, approximately 25 m³ of sediment carried daily. They can also serve to complement the discussions of environmental agencies, confirming the need for corrective actions such as dredging, reforestation and river banks evacuation.

* Contato com os autores:

Publicado em 01 de dezembro de 2021

¹ e-mail: lucaseduardo07@gmail.com (L. E. J. Lima)

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Universitário do Araguaia – UFMT.

² e-mail: marco_donisete@yahoo.com.br (M. D. de Campos)

Doutor em Engenharia Mecânica, com área de concentração em Ciências Térmicas e Fluidos pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Prof. do Instituto de Ciências Exatas e da Terra da Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT.

1. INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

Ao longo dos anos, o desenvolvimento de modelos teóricos, em conjunto com a análise dimensional, tornou possível encontrar soluções suficientemente satisfatórias para alguns casos particulares de assoreamento e enchentes em rios. No entanto, a simulação numérica ainda é a via mais rápida, econômica e prática para tal previsão (CARMO, 2004). Os modelos numéricos apresentam-se tanto numa perspectiva de alternativa, bem como de complemento para o assunto, destacando-se pela qualidade e rapidez dos resultados na reprodução computacional das interações entre o escoamento fluido e a dinâmica sedimentar.

Nesse sentido, à guisa de ilustração, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos recentemente. Sun et al. (2015) apresentaram uma solução teórica para a evolução do canal de um rio, considerando um modelo hidrodinâmico para as variações dos fluxos instáveis. Todavia, devido à complexidade do tema, os resultados obtidos só puderam ser validados utilizando simulação numérica, pela qual confirmaram o transporte lateral de sedimentos, devido à inclinação do leito e à ação do fluxo secundário na formação de erosão ou deposição.

Em 2015, um tufão provocou uma série de inundações com transporte de sedimentos no norte do Japão e, a partir de um modelo hidrodinâmico bidimensional e do Método das Diferenças Finitas, Niroshinie, Ohtuski e Nihei (2016) reproduziram essas enchentes para as áreas localizadas à jusante e analisou a interferência do Rio Hachikenbori numa planície de inundação de 40 km². Os resultados indicaram as ondas de enchentes percorrendo toda a extensão da região modelada e, que a região de inundação, recebeu um grande volume de água e sedimentos num pequeno intervalo de tempo, ultrapassando, assim, a capacidade de escoamento dos canais dependentes e atingindo as cidades próximas.

Outra situação foi apresentada por Burkow e Griebel (2016), na qual simularam numericamente um fluxo de fluido com transporte de sedimentos provocado por processos orientados por corrente. Apresentaram um modelo tridimensional para processos sedimentares orientados por corrente, formado pela *equação de fundo móvel de Exner* e as *equações de Navier-Stokes*. Em particular, implementaram um obstáculo retangular no canal para investigar a interferência do mesmo no escoamento e quantificaram o acúmulo de partículas nos arredores da fronteira. Utilizaram um código com base no Método das Diferenças Finitas resultando em boa e precisa reprodução das marcas e formas, deixadas pelos processos de erosão e sedimentação.

Apesar das limitações existentes nos métodos computacionais, pesquisadores buscam analisar de que forma adicionar parâmetros e variáveis nos modelos hidrodinâmicos. Por exemplo, Shakibaeinia et al (2016) buscaram avaliar especificamente sedimentos coesos finos e constituintes químicos em águas com baixas temperaturas. Recorreram a um modelo hidrodinâmico unidimensional e ao Método das Diferenças Finitas para prever as características do fluxo, o transporte de sedimentos e a concentração de três metais hidrocarbonetos aromáticos policíclicos dentro de um alcance de 200 km no Rio Lower Athabasca, no Canadá. Dessa forma, puderam identificar os padrões de hidrodinâmica e transporte de partículas bem como o decréscimo na concentração de cada metal e constituintes devido às baixas temperaturas. Assim como Burkow e Griebel (2016), associaram a intensificação do transporte sedimentar aos altos fluxos gerados pelo acréscimo de energia cinética, ao longo do canal.

Já Yang et al (2017) realizaram um estudo baseado na simulação numérica de transporte de sedimentos sob mecanismos de ondas, situação semelhante à agitação das águas dos rios. Utilizaram as *equações de Navier-Stokes* para um fluxo incompressível e um código baseado no Método das Diferenças Finitas para resolução e apresentaram todo o ciclo sedimentar e o dividiram em três estágios. No primeiro, o sedimento ficou em suspensão e altamente concentrado na região inferior do canal. No segundo estágio, um movimento ascendente de água foi formado entre dois grandes vórtices para levantar o sedimento. Como resultado, o centro de massa dos sedimentos se moveu rapidamente na direção vertical e

ondulações foram projetadas. Na terceira fase, o fluxo de erosão diminuiu e as partículas ganharam velocidade horizontal. Os autores confirmaram, ainda, que essas três etapas não são influenciadas pela profundidade da água e pela inclinação das ondas, mas que a concentração em massa de sedimentos em suspensão era sensível a estes dois fatores.

Recentemente, Lai e Khan (2018) apresentaram uma solução numérica das *equações de Saint-Venant* para fluxos unidimensionais em canais abertos. O Método das Diferenças Finitas foi utilizado numa discretização semi-implícita da equação de dinâmica de onda. Esse modelo utilizado permitiu reproduzir diversos cenários de fluxos subcríticos e supercríticos, avaliando, dentre outros, escoamentos em rupturas de barragens e sob o efeito de solavanco. Os resultados mostraram ser um modelo eficiente e robusto na investigação de cenários fluviais críticos, bem como uma discretização da inclinação da superfície mais precisa e pouco difusiva, quando comparada com outras formulações existentes.

1.1 OBJETIVO

Neste trabalho é apresentada uma avaliação de cenários fluviais envolvendo enchentes e transporte de sedimentos usando o Método das Diferenças Finitas para realização da simulação numérica, bem como sua aplicação considerando dados hidrológicos pertinentes a um trecho urbano do Rio Araguaia na região de Barra do Garças, em Mato Grosso, Brasil.

2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

2.1 O MODELO MATEMÁTICO PARA ENCHENTES

As duas grandezas de interesse no modelo para enchentes são a área de seção transversal, $S(x,t)$, e a vazão, $Q(x,t)$; ambas são funções do espaço x e do tempo t . A seção transversal $S(x,t)$ é definida como a área molhada ao cortar o rio transversalmente por um plano. Já o escoamento $Q(x,t)$ é a taxa de variação do volume no tempo, no qual U é a velocidade do escoamento e h é a altura do escoamento (Figura 1).

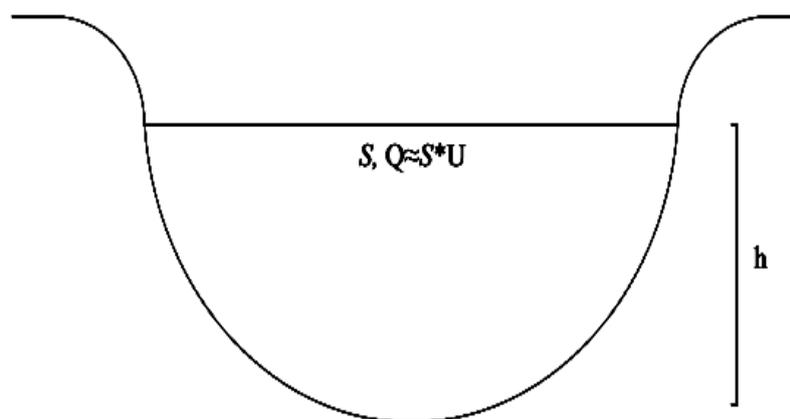


FIGURA 1: Corte transversal do rio.

FONTE: Elaborado pelo autor.

Em um segmento do rio limitado por duas seções em x_1 e x_2 , pela conservação da massa, qualquer aumento no volume de água entre dois instantes t_1 e t_1 é dado pela diferença entre volume de água que entra pela seção em x_1 e que sai em x_2 . Assim, de acordo com a Equação 1:

$$V(t_2) - V(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} [Q(x_1, t) - Q(x_2, t)] dt \quad \text{Eq. [1]}$$

sendo o volume $V(t)$ dado pela integral da seção transversal $S(x,t)$ entre os pontos x_1 e x_2 , segundo a Equação 2:

$$V(t) = \int_{x_1}^{x_2} S(x,t) dx. \quad \text{Eq. [2]}$$

Substituindo a Equação 2 na Equação 1, obtém-se a expressão dada pela Equação 3:

$$\int_{x_1}^{x_2} [S(x,t_2) - S(x,t_1)] dx + \int_{t_1}^{t_2} [Q(x_2,t) - Q(x_1,t)] dt = 0 \quad \text{Eq. [3]}$$

Pelo Teorema Fundamental do Cálculo, reescreve-se a Equação 3 na forma da Equação 4:

$$\int_{x_1}^{x_2} \int_{t_1}^{t_2} [(S_t(x,t) + Q_x(x,t))] dt dx = 0. \quad \text{Eq. [4]}$$

Assim, tem-se a equação governante do problema de enchente dada pela Equação 5:

$$S_t(x,t) + Q_x(x,t) = 0. \quad \text{Eq. [5]}$$

A Equação 5 descreve matematicamente como as variações do escoamento médio de água influenciam a evolução temporal da cota de superfície, ou seja, a variação temporal da área da seção transversal molhada. Ela possui duas variáveis dependentes, S e Q , mas, para resolver o sistema, faz-se necessário mais uma relação entre as essas duas incógnitas. Utiliza-se, então, uma curva conhecida como *Lei Hidrológica* (Figura 2) relacionando a altura da água e a velocidade média de um escoamento em vários instantes de tempo.

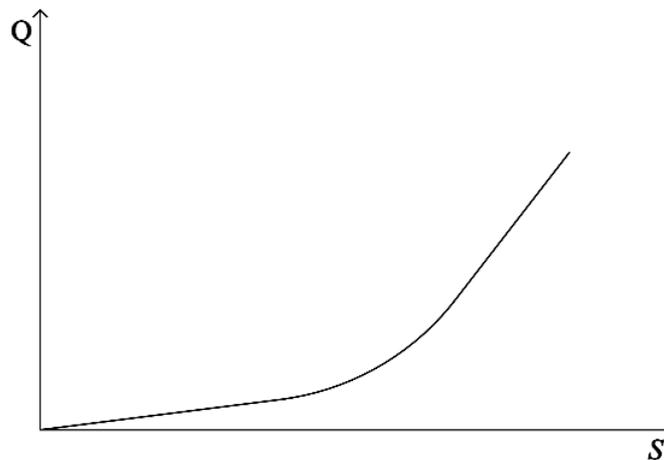


FIGURA 2: Lei hidrológica para uma seção.

FONTE: Nachbin e Tabak (1997).

Uma análise do gráfico da *Lei Hidrológica* (Figura 2) permite concluir que o comportamento da curva pode ser representado aproximadamente pela Equação 6:

$$Q = \frac{S^2}{2} \quad \text{Eq. [6]}$$

Assim, derivando a Equação 5, tem-se a Equação 7:

$$S_t(x,t) + Q_x(S(x,t)) = S_t(x,t) + Q'(S) S_x(x,t) = 0. \quad \text{Eq. [7]}$$

Ao isolar e substituir os termos da *Lei Hidrológica*, obtém-se a equação invíscida de Burgers dada pela Equação 8:

$$S_t(x, t) + \frac{1}{2}(S^2(x, t))_x = S_t(x, t) + SS_x(x, t) = 0. \quad \text{Eq. [8]}$$

2.2 O MODELO MATEMÁTICO PARA ASSOREAMENTO

A avaliação de cenários fluviais suscetíveis ao assoreamento deve ser mais abrangente e descrever a dinâmica das fases líquida e sólida. A dinâmica de fase líquida é representada pela *equação da Continuidade*, semelhante à análise feita no modelo de enchentes e, neste caso, é dada pela Equação 9:

$$\frac{\partial(A + A_0)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad \text{Eq. [9]}$$

Na qual A_0 é uma área não ativa, A é uma área ativa do escoamento, t é o tempo, Q é a vazão, x é o espaço, q_l é o escoamento lateral contínuo, por unidade de largura, adicionado ao segundo membro da *equação de Continuidade* (*positivo* se for um caudal efluente e *negativo* para a situação contrária).

A segunda equação governante para o problema de assoreamento é a *equação de Conservação da Quantidade de Movimento* dada pela Equação 10:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial(h + \zeta)}{\partial x} + \frac{n_k^2 g |Q| Q}{AR_h^{4/3}} + q_l \left(\frac{Q}{A} - u_l \right) = 0. \quad \text{Eq. [10]}$$

Na qual g é a gravidade; h é a altura; ζ a é cota do talvegue, definido como sendo constante nesse modelo; n_k é um parâmetro dependente da rugosidade; u_l representa a componente da velocidade do escoamento transversal na direção do escoamento principal e R_h o raio hidráulico da seção.

A *equação da continuidade* da fase sólida completa o sistema de equações e possibilita-nos determinar a evolução do fundo móvel em cada seção do canal. Essa equação pode ser deduzida a partir de uma análise com volume de controle, obtendo-se a Equação 11:

$$(1 - \lambda)P \frac{\partial \zeta}{\partial t} + B \frac{\partial q_{st}}{\partial x} = Q_{sl} \quad \text{Eq. [11]}$$

Na qual λ representa a porosidade do sedimento ($0.30 \leq \lambda \leq 0.40$); P é o perímetro molhado da seção do escoamento; B é a largura da seção; q_{st} é o caudal sólido total, em volume por unidade de largura; Q_{sl} é um caudal sólido lateral contínuo, por unidade de largura, e ζ a cota do talvegue, definido como constante nesse modelo.

A presença das variações locais da concentração de sedimentos, denotadas por C_s , podem ser adicionada na *equação de Continuidade* da fase sólida através da Equação 12 (CARMO, 2004):

$$(1 - \lambda)P \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + B \frac{\partial q_{st}}{\partial x} = Q_{sl}. \quad \text{Eq. [12]}$$

3. METODOLOGIA COMPUTACIONAL

3.1 METODOLOGIA COMPUTACIONAL PARA A SIMULAÇÃO DAS ENCHENTES

Como a Equação 8 não possui uma solução analítica, faz-se necessária a aplicação de um método numérico para obtenção da solução aproximada. O código computacional utilizado neste trabalho para

avaliar o problema de enchentes é uma adaptação do proposto por Nachbin e Tabak (1997), o qual utiliza o Método das Diferenças Finitas para resolução do conjunto de equações do modelo apresentado. Esse código foi executado no *software MATLAB*[®] para realizar os cálculos e obter os resultados das variações da seção do rio.

Através de aproximações em S_x e S_t na Equação [8], e avaliações no ponto x_j e no instante t_n , foi encontrada a seguinte equação de diferenças na forma não-conservativa da massa, dada pela Equação 13:

$$S_j^{n+1} = S_j^n - S_j^n \frac{\Delta t}{\Delta x} (S_j^n - S_{j-1}^n) \quad \text{Eq. [13]}$$

A qual, na forma conservativa, é descrita pela Equação 14:

$$S_j^{n+1} = S_j^n - \frac{\Delta t}{2\Delta x} ((S_j^n)^2 - (S_{j-1}^n)^2) \quad \text{Eq. [14]}$$

Em que Δt é o espaçamento no tempo e Δx é o espaçamento no espaço. O Método das Diferenças Finitas foi utilizado para discretizar a equação diferencial parcial (Equação 8) e obter as equações algébricas (Equações 13 e 14, respectivamente).

A *equação inviscida de Burgers* (Equação 8) foi resolvida numericamente para reproduzir uma evolução temporal da área de seção transversal (S) e do volume de água do rio (vol) a partir das equações não-conservativa (Equação 13) e conservativa (Equação 14). Nesta solução o volume total é, por definição, dado pela integral de S ao longo do rio. O cálculo aproximado do volume é realizado somando-se todos os S_j^n 's multiplicados por Δx , que é o espaçamento ou variação da posição conforme o número de pontos em que o rio é seccionado para efetuar o cálculo da área da seção transversal.

O código computacional reproduziu as ondas de enchentes em um trecho do *alto curso do Rio Araguaia*, definido entre a nascente do rio (17°50'31" – 18°05'41"S e 53°14'50" – 53°00' O) na cidade de Mineiros, em Goiás, e a cidade de Barra do Garças (15°53'24" S – 52°15'24" W), em Mato Grosso, conforme a Figura 3. Os dados e parâmetros de entrada foram estabelecidos de acordo com a região da cidade de Barra do Garças.

Para este cálculo, adotou-se o comprimento do rio como sendo de 400 km (correspondente à distância entre a nascente do Rio Araguaia e a área urbana de Barra do Garças, em Mato Grosso); a área de seção transversal de 1550 m², o tempo de análise em dias e, adotou-se ainda, uma condição de estabilidade $0 < S_j^n \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1$, na qual Δx é a variação da posição e Δt é a variação do tempo.

Além disso, as superfícies que supõem chuvas torrenciais por uma semana são seguidas de uma situação normal, na qual é considerada a superfície plana e sem ondas. Então, as condições iniciais e de contorno para S devem ser (NACHBIN; TABAK, 1997), segundo a Equação 15:

$$S(0, t) = \begin{cases} 0,155, & t < 0 \text{ ou } t > 7 \\ 0,155 + 0,1 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi}{7} t \right) \right), & 0 < t < 7 \end{cases} \quad \text{Eq. [15]}$$

Para o caso não-conservativo, utilizou-se a forma discretizada (Equação 13) da *equação de Burgers*. O rio que se encontra numa condição de normalidade $S(x, 0)$ e passa a receber as águas das fortes chuvas, sofrendo variações em sua área de seção transversal. Já para o caso conservativo, utilizou-se o esquema de diferenças implícito (Equação 14) para o cálculo da área de seção transversal e do volume do rio.

3.2 METODOLOGIA COMPUTACIONAL PARA A SIMULAÇÃO DO ASSOAREAMENTO

O código computacional utilizado para avaliar o problema de assoreamento foi adaptado do proposto por Carmo (2004), o qual faz uso de uma variante do Método das Diferenças Finitas conhecido por *Método Explícito de Previsão-Correção de MacCormack* para a resolução do sistema de equações dado pela Equação 16, em um conjunto com um modelo semiempírico para o cálculo das tensões de atrito no fundo. O caudal sólido total foi calculado usando o *Método de Bailard* no qual a quantidade de sedimentos transportada é proporcional à dissipação de energia nas proximidades do fundo.



FIGURA 3: Trecho do Rio Araguaia analisado para o problema de enchentes.

FONTE: Google Maps.

O cálculo dos termos de atrito foi realizado utilizando-se valores médios obtidos da área e da vazão do canal, durante o cálculo de diferenças. Por simplificação, adotou-se $A_0 = 0$. Então, o sistema de equações a ser resolvido é da forma da Equação 16:

$$\begin{cases} \frac{\partial(A + A_0)}{\partial t} + P \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{Q^2}{A} \right] + gA \frac{\partial(h + \xi)}{\partial x} + \frac{A \tau}{h \rho} + q_1 \left(\frac{Q}{A} - u_1 \right) = 0 \\ (1 - \lambda)P \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + B \frac{\partial q_{st}}{\partial x} = Q_{sl} \end{cases} \quad \text{Eq. [16]}$$

e, as sequências de previsão com diferenças regressivas para as duas primeiras equações do conjunto de Equações [16], são:

$$\begin{aligned} \tilde{A}^{n+1} &= A_i^n - \frac{\Delta t}{x_i - x_{i-1}} (Q_i^n - Q_{i-1}^n) + \Delta t q_{l_i}^n \\ \tilde{Q}^{n+1} &= Q_i^n - \frac{\Delta t}{x_i - x_{i-1}} \left(\frac{Q_i^2}{A_i} - \frac{Q_{i-1}^2}{A_{i-1}} \right) - g \Delta t A_i^n \frac{[(h + \zeta)_i - (h + \zeta)_{i-1}]^n}{x_i - x_{i-1}} \\ &\quad - g \Delta t \left[\frac{2}{n_k} \left(\frac{|\tilde{Q}| \tilde{Q}}{\tilde{A} \tilde{R}_h} \right) \right]_{i-1,i} - \Delta t \left[q_{l_i} \left(\frac{\tilde{Q}}{\tilde{A}} \right)_{i-1,i} - u_{t_i} \right] \end{aligned} \quad \text{Eq. [17]}$$

e, a de correção em diferenças progressivas para o conjunto dado pela Equação [18]:

$$\begin{aligned} A_i^{n+1} &= \frac{1}{2} \left[A_i^n + \tilde{A}_i^{n+1} - \frac{\Delta t}{x_{i+1} - x_i} \left(\tilde{Q}_{i+1}^{n+1} - \tilde{Q}_i^{n+1} \right) + \Delta t q_{l_i}^n \right] \\ Q_i^{n+1} &= \frac{1}{2} \left\{ Q_i^n - \tilde{Q}_i^{n+1} - \frac{\Delta t}{x_{i+1} - x_i} \left(\frac{Q_{i+1}^2}{A_{i+1}} - \frac{Q_i^2}{A_i} \right)^{n+1} - \right. \\ &\quad \left. - g \Delta t \tilde{A}_i^{n+1} \frac{[(h + \zeta)_{i+1} - (h + \zeta)_i]^{n+1}}{x_{i+1} - x_i} - \right. \\ &\quad \left. - g \Delta t \left[\frac{2}{n_k} \left(\frac{|\tilde{Q}| \tilde{Q}}{\tilde{A} \tilde{R}_h} \right) \right]_{i,i+1} - \Delta t \left[q_{l_i} \left(\frac{\tilde{Q}}{\tilde{A}} \right)_{i,i+1} - u_{t_i} \right] \right\} \end{aligned} \quad \text{Eq. [18]}$$

A equação da continuidade da fase sólida pode ser discretizada pelo Método de Crank-Nicolson que conduz à Equação 19 de diferenças finitas (CARMO, 2004):

$$\begin{aligned} (\xi)_i^{n+1} &= (\xi)_i^n - \delta \left\{ \theta [(q_{st})_{i+1}^{n+1} - (q_{st})_{i-1}^{n+1}] + \right. \\ &\quad \left. + (1 - \theta) [(q_{st})_{i+1}^n - (q_{st})_{i-1}^n] \right\} + \nu (Q_{sl})_i \end{aligned} \quad \text{Eq. [19]}$$

Na qual $\theta = 0.5$, $\delta = \Delta t B_i / [(1 - \lambda) P_i (x_{i+1} - x_{i-1})]$ e $\nu = \Delta t / [(1 - \lambda) P_i]$.

Para o modelo morfodinâmico unidimensional de assoreamento foi definido um canal de comprimento $L = 1000$ m com as características do Rio Araguaia, tais como a vazão, a largura, a profundidade e a granulometria médias, obtidas de Aquino et al. (2005) e Carvalho (2009). Este trecho analisado está destacado na Figura 4.



FIGURA 4: Trecho do Rio Araguaia analisado para o assoreamento.

FONTE: Google Maps.

Na simulação do transporte de sedimentos no canal considerou-se uma seção retangular constante, com largura $B = 300$ m e profundidade $h = 7,3$ m; fundo horizontal e composto por sedimentos de diâmetro médio $D_{50} = 0,433$ mm e, uma vazão líquida a montante de $Q_f = 1700$ m³/s.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

4.1 RESULTADOS NUMÉRICOS PARA A SIMULAÇÃO DAS ENCHENTES

4.1.1 Caso Não-Conservativo

A situação em que o rio que se encontra numa condição de normalidade e passa a receber as águas das fortes chuvas, sofrendo variações em sua área de seção transversal é representada na Figura 5 pelas ondas que percorrem o comprimento do rio. Essas ondas representam a variação da seção transversal do rio e indicam a localização dos saltos hidráulicos que se formam devido ao grande volume de água recebido em um pequeno intervalo de tempo. À medida que a água percorre o comprimento do canal, as ondas são transladadas na mesma direção, caracterizando, assim, um mecanismo de transporte de advecção.

O volume de água (Figura 6) foi calculado somando-se todos os S_j 's multiplicados pelo espaçamento Δx . Nos primeiros sete dias, pode-se observar um salto no gráfico devido ao volume de água recebido pelas chuvas. Este, por sua vez, deveria se manter constante pelo canal ao longo dos dias e atender à hipótese inicial adotada de conservação da massa, mas, apresenta um decréscimo significativo. Tal fato é devido à precisão de primeira ordem do modelo adotado.

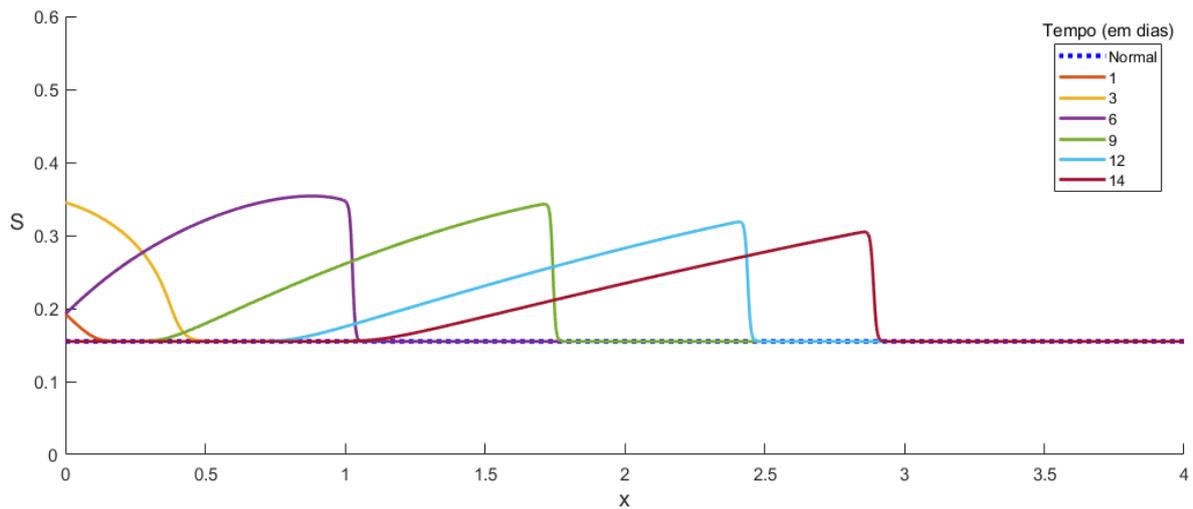


FIGURA 5: Solução numérica para $t = 1, 3, 6, 9, 12$ e 14 dias, $\Delta t = 0.001$ e $\Delta x = 0.004$.

FONTE: Elaborado pelo autor.

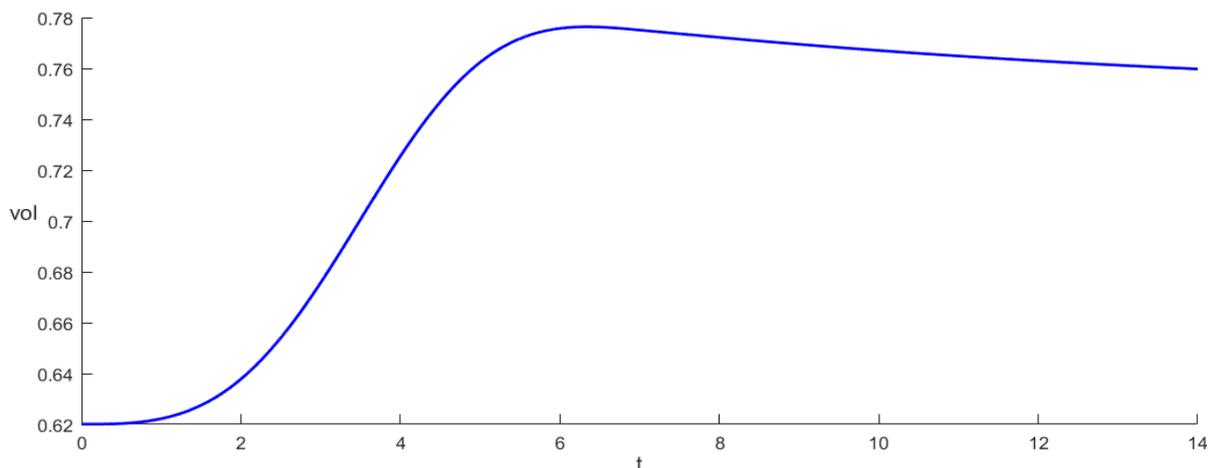


FIGURA 6: Volume total (em 10^9 m^3) de água.

FONTE: Elaborado pelo autor.

Para esse esquema explícito de diferenças finitas ocorreu um significativo vazamento de água descaracterizando, assim, o modelo de conservação da massa adotado inicialmente. O vazamento ocorre devido, principalmente, à ordem de precisão da equação de diferenças que, em sua forma explícita, apresenta um comportamento não-conservativo.

A perda de água pode ser identificada na Figura 6 pela inclinação negativa do gráfico do volume de água a partir do sexto dia. A taxa de variação do volume em relação ao tempo foi calculada e apresentou valores negativos entre o sexto e o décimo quarto dia de simulação, confirmando esse vazamento (Figura 7).

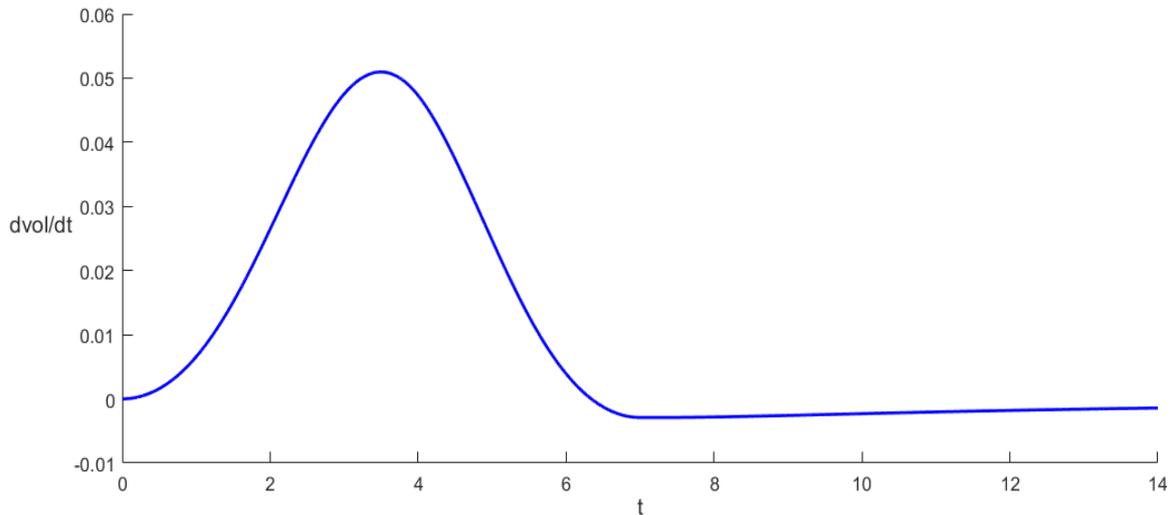


FIGURA 7: Variação do volume de água em relação ao tempo.

FONTE: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Caso Conservativo

Nesse caso, os valores para a seção transversal não apresentaram divergências em relação ao caso anterior. Observa-se, na Figura 8, o desenvolvimento dos saltos hidráulicos devido às altas precipitações na região e a posição das grandes ondas de enchentes que identificam os pontos mais suscetíveis à inundação.

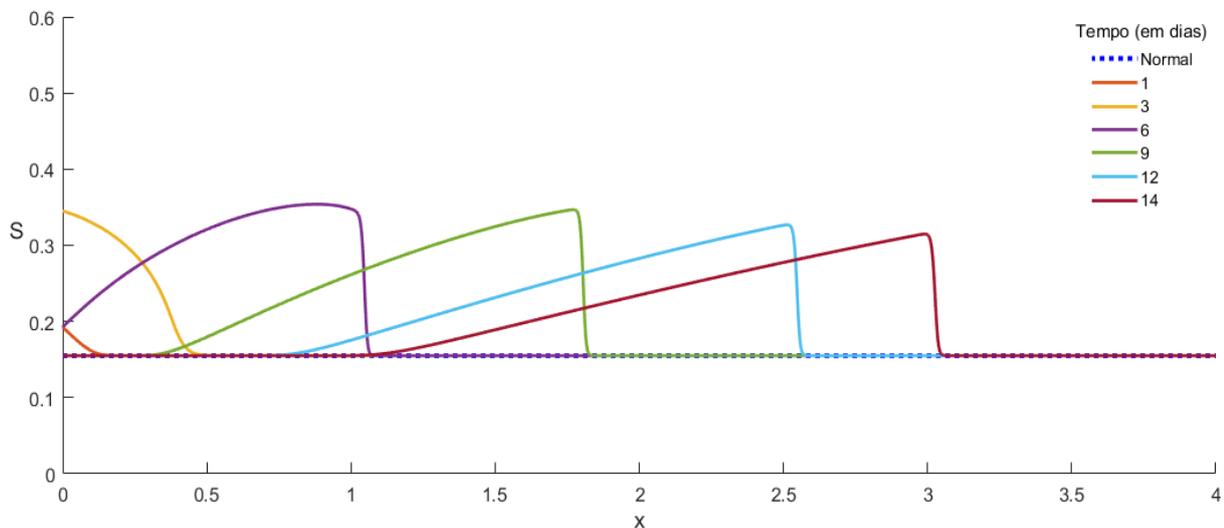


FIGURA 8: Solução numérica para $t = 1, 3, 6, 9, 12$ e 14 dias, $\Delta t = 0.001$ e $\Delta x = 0.004$.

FONTE: Elaborado pelo autor.

Ao se refinar a malha e se reduzir os espaçamentos Δx e Δt , obtém-se as posições dos saltos com maior precisão em relação aos resultados anteriores. Desse modo, utilizando-se um número maior de pontos e espaçamentos menores consegue-se corrigir a posição da onda de enchente e definir com mais segurança se esta atingirá ou não a localização de determinada população ribeirinha. Tal cenário pode ser visto na Figura 9 a qual apresenta ondas mais verticais quando comparadas aos resultados da Figura 8.

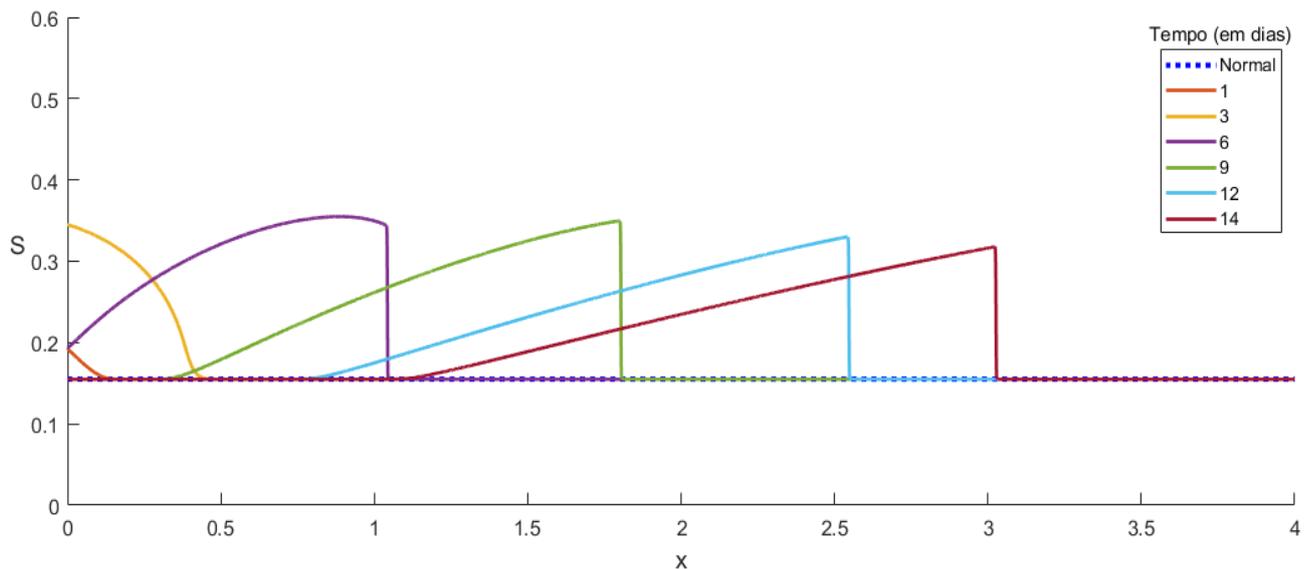


FIGURA 9: Solução numérica para $t = 1, 3, 6, 9, 12$ e 14 dias, $\Delta t = 0.0001$ e $\Delta x = 0.0004$.

FONTE: Elaborado pelo autor.

Já o volume calculado segundo a Equação 14 não sofreu nenhum extravio e atende à conservação da massa. A Figura 10 apresenta um período inicial sem precipitações significativas, representado pela condição de normalidade e, em seguida, o rio recebe um grande volume de água proveniente das chuvas que se mantém constante temporalmente.

Nesse caso, segundo a Figura 10, o gráfico do volume de água mantém uma inclinação igual a zero, sem nenhuma variação após o encerramento das precipitações. Isso pode ser confirmado pela derivada do volume em relação ao tempo mostrada na Figura 11, a qual apresenta valores nulos a partir do sétimo dia.

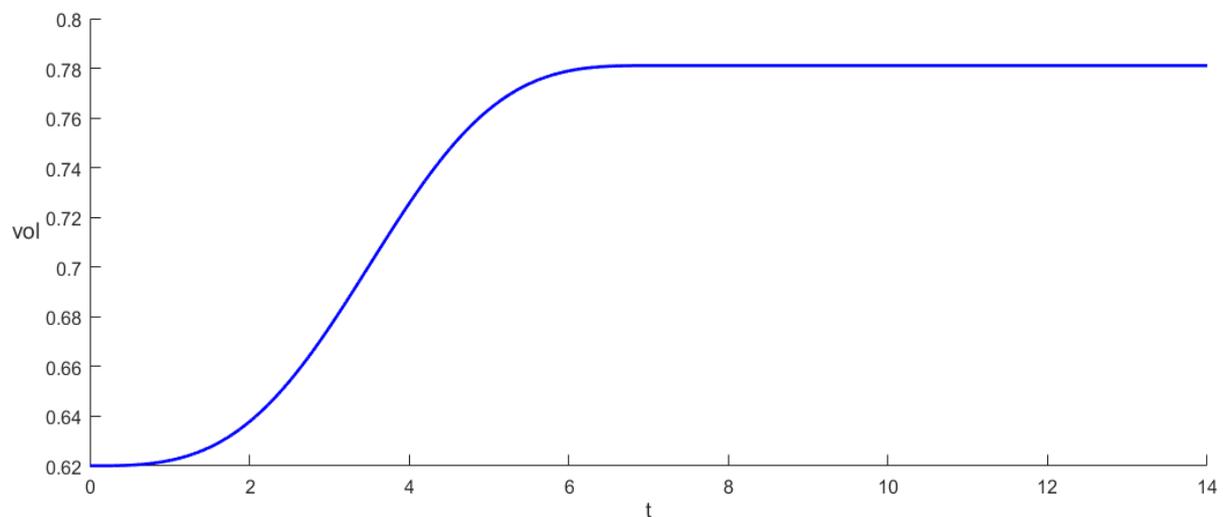


FIGURA 10: Volume total (em 10^9 m^3) de água.

FONTE: Elaborado pelo autor.

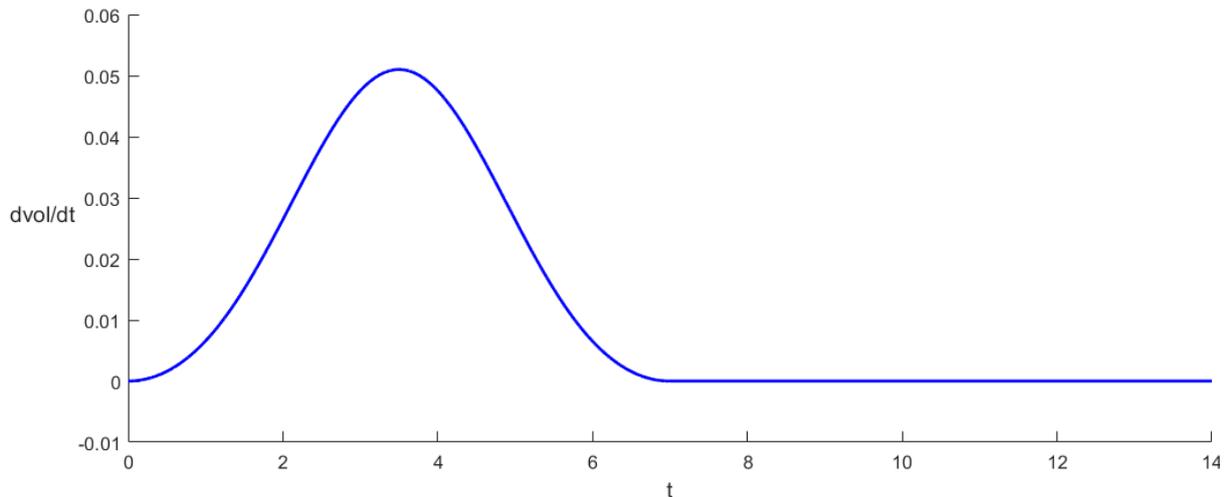


FIGURA 11: Variação do volume de água em relação ao tempo.

FONTE: Elaborado pelo autor.

4.2 RESULTADOS NUMÉRICOS PARA A SIMULAÇÃO DO ASSOREAMENTO

Para a simulação do modelo morfodinâmico unidimensional de assoreamento considerou-se o transporte de sedimentos no canal, segundo as dimensões descritas na Tabela 1, durante o período de 30 dias.

TABELA 1: Dados de entrada para o modelo de assoreamento.

	Dados	Unidades
Largura	300	m
Profundidade	7,3	m
Diâmetro médio do sedimento	0,433	mm
Vazão líquida a montante	1700	m ³ /s
Tempo total de simulação	30	dias

FONTE: Elaborado pelo autor.

A Figura 12 representa a condição inicial do canal, na qual a cota do talvegue é definida igual a zero para todo o comprimento do rio. Tal condição deve-se à ausência de contribuição sedimentar do caudal proveniente da montante. A partir dessa situação, os processos sedimentares são monitorados nesse canal e, a cada 10 dias do tempo de simulação, os valores foram visualizados.

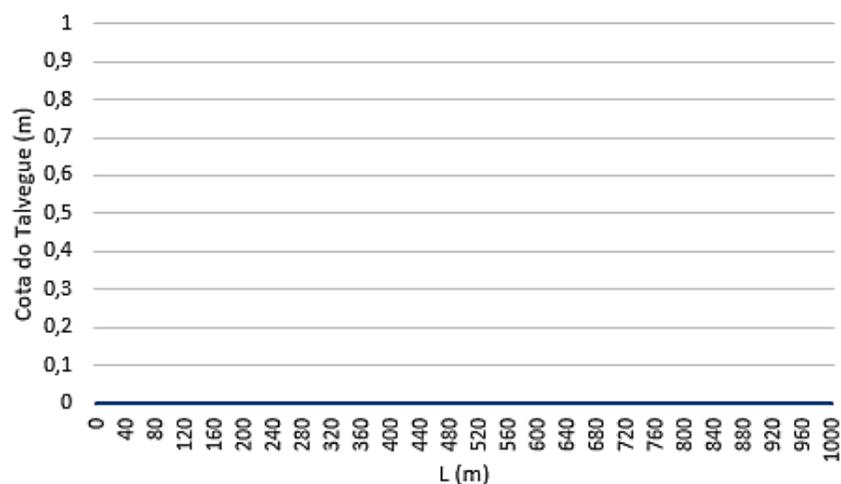


FIGURA 12: Condição inicial do canal do rio.

FONTE: Elaborado pelo autor.

A Figura 13 apresenta a solução numérica para 10 dias de simulação, na qual é possível identificar transporte de sedimentos em quase todo o trecho. A cota do talvegue decresce e se mantém em -0,001 m, caracterizando, assim, uma erosão no fundo móvel.

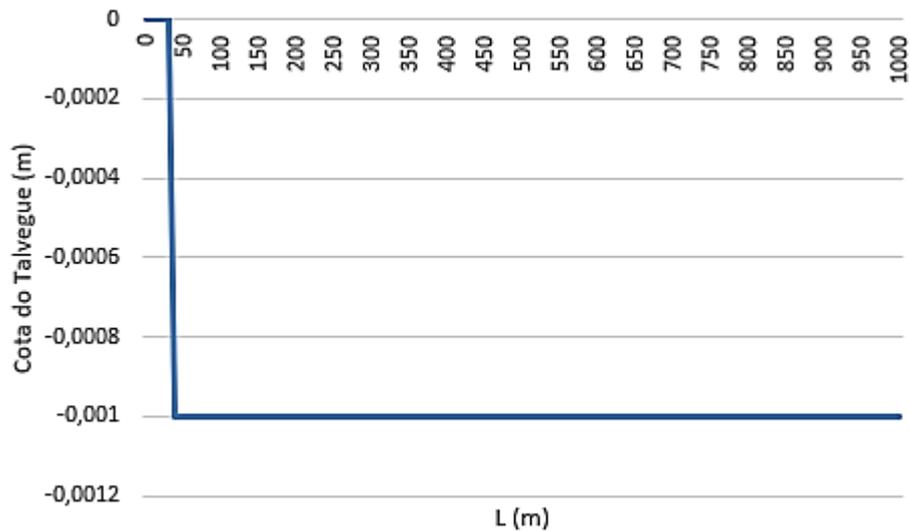


FIGURA 13: Solução numérica para $t = 10$ dias.

FONTE: Elaborado pelo autor.

Como pode ser visto nos resultados, o fundo móvel do canal se modifica à medida que o tempo de simulação avança. Essa modificação representa o processo sedimentar, no qual o material é erodido desse trecho e é transportado para um ponto superior ao comprimento do trecho, mais à frente. A Figura 14 apresenta a solução numérica para 20 dias de simulação.

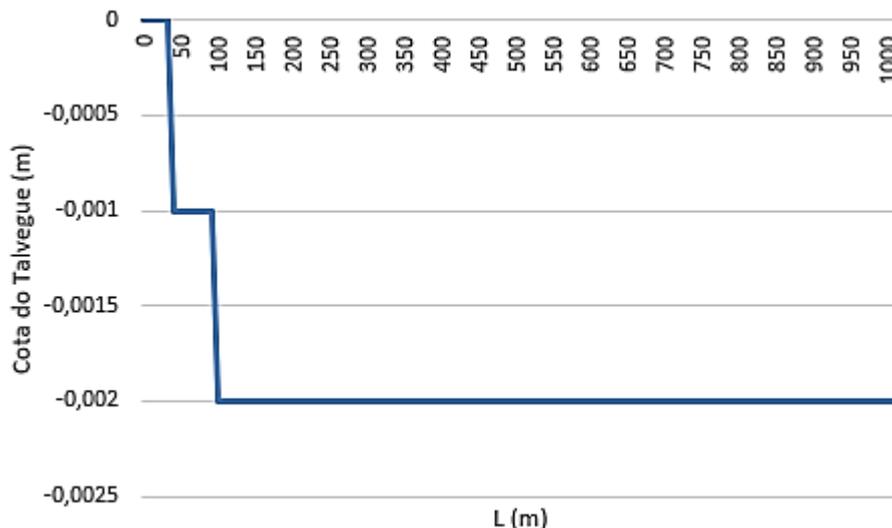


FIGURA 14: Solução numérica para $t = 20$ dias.

FONTE: Elaborado pelo autor.

Após 30 dias de simulação, o perfil longitudinal do canal apresenta modificações que evidenciam um significativo transporte sedimentar. Notou-se diferentes cotas do talvegue para o comprimento do rio (Figura 15). Entretanto, devido à condição inicial estabelecida previamente, o trecho inicial permanece sem alterações. Tal evento ocorreu porque, nessas condições, a descarga líquida interfere apenas ligeiramente após o início do canal.

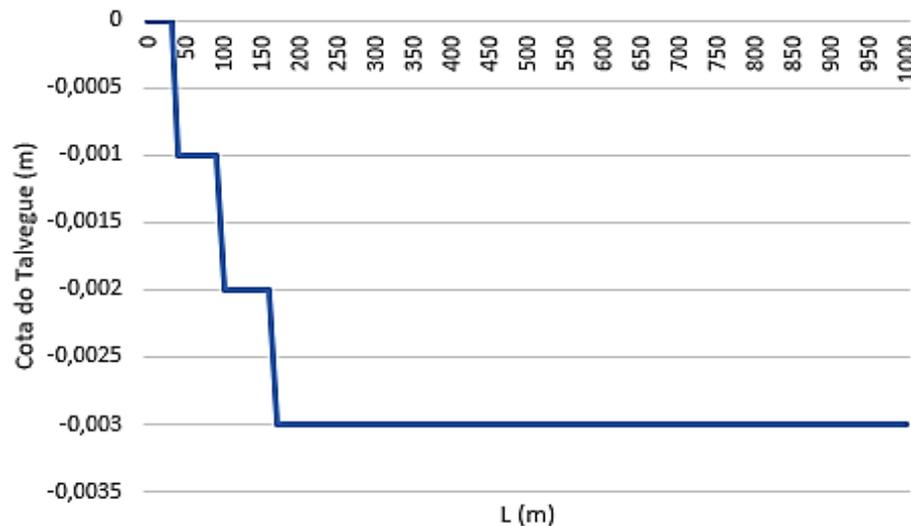


FIGURA 15: Solução numérica para $t = 30$ dias.

FONTE: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, concluiu-se que o canal sofreu um processo erosivo significativo, rebaixando sua cota de talvegue na jusante em 3 mm. O volume total de sólido movimentado foi de $759,770 \text{ m}^3$, sendo aproximadamente 25 m^3 de sedimentos carregados por dia. Adotou-se a massa específica da areia úmida como sendo de 2300 kg/m^3 (classificação segundo a granulometria média), obtendo-se, então, cerca de 57,5 toneladas de sedimentos carregados diariamente, considerando-se apenas o trecho do canal descrito.

5. CONCLUSÕES

A avaliação de fenômenos hidrodinâmicos fluviais via simulação numérica apresenta-se como uma alternativa capaz de reproduzir uma evolução temporal do problema de enchentes e de assoreamento. Os objetivos propostos foram alcançados, possibilitando, a avaliação de cenários fluviais envolvendo enchentes e transporte de sedimentos usando o Método das Diferenças Finitas num trecho urbano de Barra do Garças, Mato Grosso.

A análise numérica do problema de enchentes resultou numa evolução temporal do volume do Rio Araguaia e da formação dos saltos hidráulicos que caracterizam as inundações. Essa análise pode servir como mecanismo de alerta para a evacuação de populações ribeirinhas em situações de perigo.

Da mesma forma, o estudo do problema de assoreamento quantificou as variações no fundo móvel do rio e identificou as regiões com impacto significativo do transporte de sedimentos. Essas informações são utilizadas na determinação das regiões assoreadas e da quantidade de sedimentos transportada.

Concluiu-se que os resultados retratam os processos hidrodinâmicos e atendem às condições de estabilidade e aplicabilidade exigidas no próprio modelo. Podem, ainda, servir para complementar as discussões dos órgãos ambientais, confirmando a necessidade de ações corretivas tais como dragagem, reflorestamento e desocupação das margens do Rio Araguaia.

6. REFERÊNCIAS

AQUINO, S.; STEVAUX, J.C.; LATRUBESSE, E.M. Regime Hidrológico e Aspectos do Comportamento Morfohidráulico do Rio Araguaia. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, ano 6, n. 2, p. 29-41, 2005.

BURKOW, M.; GRIEBEL, M. A full three dimensional numerical simulation of the sediment transport and the scouring at a rectangular obstacle. *Computers and Fluids*, vol. 125, p. 1-10, 2016.

- CARMO, J.S.A. **Modelação em Hidráulica Fluvial e Ambiente**. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2004.
- CARVALHO, T.M. Avaliação do Transporte de Carga Sedimentar no Médio Rio Araguaia. **Geosul**, v. 24, n. 47, p. 147-160, 2009.
- LAI, W.; KHAN, A. A. Numerical solution of the Saint-Venant equations by an efficient hybrid finite-volume/finite-difference method. **Journal of Hydrodynamics**, vol. 30, p.189-202, 2018.
- NACHBIN, A.; TABAK, E. **Equações Diferenciais em Modelagem Matemática Computacional**. Rio de Janeiro: IMPA, 1997.
- NIROSHINIE, M. A. C.; OHTUSKI, K.; NIHEI, Y. Effects of small rivers for the inundations due to levee failure at Kinu River in Japan. **Procedia Engineering**, vol. 154, p. 794-800, 2016.
- SHAKIBAEINIA, A.; DIBIKE, Y. B.; KASHYAP, S.; PROWSE, T. D.; DROPPPO, I. G. A numerical framework for modelling sediment and chemical constituents transport in the Lower Athabasca River. **Journal of Solids and Sediments**, 2016.
- SUN, J.; LIN, B.; YANG, H. Development and application of a braided river model with non-uniform sediment transport. **Advances in Water Resources**, vol. 81, p. 62-74, 2015.
- YANG, Z.; LU, X.; GUO, X.; LIU, Y.; SHEN, L. Numerical simulation of sediment suspension and transport under plunging breaking waves. **Computers and Fluids**, vol. 158, p. 57-71, 2017.