

PROPAGAÇÃO DE ONDA DE CHEIA EM CANAIS SIMPLIFICADOS: ESTUDO COMPARATIVO DE MODELO HIDRODINÂMICO E MUSKINGUM-CUNGE

Henrique Lucini Rocha¹; Roberto Valmir da Silva² & Masato Kobiyama³.

RESUMO --- As propriedades hidráulicas que caracterizam os rios são estimadas através de modelos matemáticos e físicos. Nestas estimativas são considerados o comportamento e propagação de ondas de cheias nos canais. Dentre os modelos matemáticos desenvolvidos tem-se o *software* HEC-RAS, baseado na formulação hidrodinâmica completa, e o Muskingum-Cunge, baseado na formulação de onda cinemática. O objetivo do presente trabalho foi verificar a região de aplicabilidade do modelo Muskingum-Cunge. Foram comparados os hidrogramas de saída dos dois modelos para canais com distintas características físicas tomando como hipótese que as simulações do HEC-RAS são as que melhor representam a realidade. Foram apresentadas as diferenças percentuais dos picos nas simulações. Os coeficientes de fator de ponderação das vazões (X) e a celeridade da onda ($c_m\Delta t/\Delta x$), do modelo Muskingum-Cunge, foram mapeados. Nenhum canal simulado apresentou coeficientes dentro da área teoricamente válida. Mas como na comparação entre os hidrogramas o Muskingum-Cunge apresentou resultados coerentes, sua aplicabilidade pode ser considerada satisfatória. Nas simulações foi verificada uma diminuição no valor de vazão acumulada por parte do modelo Muskingum-Cunge e um pequeno ganho deste valor para o *software* HEC-RAS.

ABSTRACT --- The hydraulic properties that characterize the rivers are estimated through mathematical and physical models. In these estimation, the behavior and propagation of floods waves in the channels are considered. Among the mathematical models, there are the HEC-RAS based on full hydrodynamic formulation, and the Muskingum-Cunge model based on the kinematic wave formulation. The objective of the present study was to verify the applicability region of the Muskingum-Cunge model. With the hypothesis that the HEC-RAS simulations represent the reality very well, the hydrograph outputs in channels with different physical characteristics were compared between two models. The percentage differences of the peaks in simulations were calculated. The coefficients of the flow-weighting factor (X) and wave celerity ($c_m\Delta t/\Delta x$) of the Muskingum-Cunge model were mapped. No simulated channel showed the coefficients inside the theoretically valid area. However, since the comparison of the hydrographs between two models, the Muskingum-Cunge model showed consistent results, its applicability may be considered satisfactory. In the simulation, it was found a decrease in the accumulated water amount with the Muskingum-Cunge model and a small gain of this value with the HEC-RAS.

Palavras-chave: Muskingum-Cunge, HEC-RAS, propagação de onda de cheia

¹ Bolsista do Capes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Caixa Postal 476, Florianópolis-SC, Brasil, CEP 88040-900, E-mail: henrique.lucini@gmail.com.br

² Disaster Prevention Research Institute (D.P.R.I), Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan. E-mail: roberto.dasilva@flood.dpri.kyoto-u.ac.jp

³ Bolsista do CNPq, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Caixa Postal 476, Florianópolis-SC, Brasil, CEP 88040-900, E-mail: kobiyama@ens.ufsc.br

1. INTRODUÇÃO

As equações da continuidade e quantidade de movimento deduzidas por Saint Venant são o alicerce para modelar o escoamento em rios e canais. Através das equações de Saint Venant podem ser deduzidos modelos que são classificados como: (i) hidrodinâmicos, que utilizam as equações em sua forma mais completa; (ii) de difusão, que não consideram os termos de inércia; (iii) de onda cinemática, não consideram os termos de inércia, nem os termos de pressão; (iv) e de armazenamento, que levam em conta apenas os efeitos de armazenamento do escoamento.

O *software* HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center-River Analysis System*), baseado na formulação hidrodinâmica, desenvolvido pela *US Army Corps of Engineers* (HEC, 2008a; 2008b) é uma opção gratuita para simulação de escoamentos unidimensionais permanentes, variados, transporte e arrasto de sedimentos e modelar parâmetros de qualidade d'água em canais apresentando um *layout* de fácil manuseio. Já os modelos de armazenamento são amplamente utilizados em hidrologia por sua simplicidade de formulação e baixo número de dados que necessitam (Garbrecht e Brunner, 1991; Yoon e Padmanabham, 1993; Das, 2004). O modelo Muskingum, desenvolvido por McCarthy (1939) citado por Tucci (1998), foi aplicado no Rio Muskingum, permite calcular o hidrograma propagado num trecho de canal, dado hidrograma de entrada.

Com o tempo, o modelo Muskingum vem passando por algumas modificações. Uma delas foi apresentada por Cunge em 1969, conseqüentemente conhecida como Muskingum-Cunge. Apesar desta modificação ser baseada na formulação inicial do modelo Muskingum, alguns autores (por exemplo, Brutsaert, 2005; Akan e Houghtalen, 2003; Ponce e Lugo, 2001) o classificam como modelo hidráulico de onda cinemática. Isso porque, para determinar sua nova formulação Cunge baseou-se nas equações de Saint Venant adotando as simplificações do modelo de onda cinemática. Por ser um modelo mais simples e com necessidade de menos dados de entrada o Muskingum-Cunge é de fácil uso. Apesar de ser bastante utilizado, o modelo Muskingum-Cunge apresenta uma área teoricamente válida o que restringe sua aplicabilidade. A fim de verificar a área teoricamente válida, o presente trabalho realizou: (i) comparação dos hidrogramas gerados pelo HEC-RAS e Muskingum-Cunge; (ii) comparação dos hidrogramas de saída das simulações com diferença percentual média de pico; e (iii) mapeamento dos coeficientes fator de ponderação das vazões (X) e celeridade de onda ($c_m \Delta t / \Delta x$) que definem a área teoricamente válida.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Hidráulica de Canais

Nos condutos livres ou canais, a característica principal é a presença da pressão atmosférica atuando sobre a superfície do líquido. Os canais podem ser ditos naturais ou artificiais. Canais naturais são os cursos d'água existentes na natureza, como as pequenas correntes, córregos, rios, estuários, etc. Já os artificiais são aqueles construídos pelo homem como canais de irrigação, galerias, aquedutos, etc.

Um canal pode ser dito prismático, quando apresenta ao longo de sua calha seção reta e declividade de fundo constantes: caso contrário serão classificados como não-prismáticos (Chow, 1959; Porto, 2006). Tanto em canais prismáticos e não-prismáticos alguns fatores são importantes para descrever geometricamente a seção e a declividade do canal (Figura 1). As calhas dos rios, córregos e canais possuem também a função de amortecer e retardar as ondas de cheia.

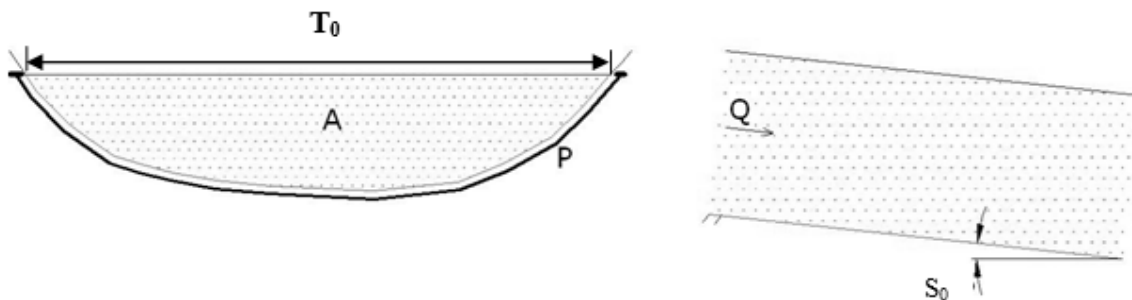


Figura 1. Elementos geométricos de canais. Área molhada (A); Comprimento de topo (T_0); Perímetro molhado (P); Raio hidráulico - relação entre A e P ; Declividade de Fundo (S_0).

2.2. Propagação de onda de cheia

Propagação de onda de cheia é reconhecida como um procedimento necessário, a fim de determinar o hidrograma em um ponto qualquer de um canal, conhecidos suas características físicas e o hidrograma em um ponto a montante (Chow, 1959; Brutsaert, 2005). Neste sentido, o significado de propagação de onda de cheia é estendido também para explicar movimento de água gerado no sistema precipitação vazão (Chow, 1959).

Na tentativa de representar a propagação de onda de cheia em canais naturais são aplicadas as equações de Saint Venant. Estas equações são divididas em continuidade e quantidade de movimento. A equação de continuidade com contribuição lateral é:

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

onde A é a área da seção molhada em m^2 ; Q é a vazão em m^3/s ; x é a distância no sentido longitudinal em m ; t é o tempo em s ; e q é a vazão de contribuição lateral por unidade de largura, $m^3/s/m$ (Tucci, 1998).

A equação (1) admite uma função contínua das variáveis ao longo do trecho. Ao desprezar a variação espacial da área (A), definir o hidrograma de entrada como I_t , o hidrograma de saída como Q_t , e o armazenamento do trecho como $S_t = A dx$, gera-se a equação de continuidade concentrada:

$$\frac{dS_t}{dt} = I_t - Q_t + Q_l \quad (2)$$

onde Q_l é a contribuição lateral do trecho ($q \cdot dx$) e as variáveis são o armazenamento no trecho e a vazão de saída.

Através da variação da quantidade de movimento e as forças atuantes num volume de controle, chega-se na equação dinâmica:

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)}_{\text{Inércia}} + \underbrace{gA \frac{\partial y}{\partial x}}_{\text{Pressão}} = \underbrace{gAS_0}_{\text{Gravidade}} - \underbrace{gAS_f}_{\text{Atrito}} \quad (3)$$

Inércia Pressão Gravidade Atrito

onde g é a aceleração da gravidade em m/s^2 ; S_0 é a declividade do canal m/m ; S_f é a declividade da linha de atrito. As equações (1) e (3) são também conhecidas como as equações do escoamento unidimensional não-permanente gradualmente variado ou as equações de Saint Venant (Tucci, 1998).

2.3. Modelos de escoamento

As equações de Saint Venant são usadas para representar a chamada onda dinâmica em fluxo unidimensional e fluido newtoniano. Chow (1959) classificou os modelos de escoamento em hidráulicos e hidrológicos, onde no primeiro grupo, a propagação de onda está baseado num sistema de equações diferenciais para resolução de vazões não-constantes em canais, enquanto o segundo não faz uso direto deste sistema, mas aproxima em algum sentido às suas soluções. Por conseguinte,

os modelos hidráulicos utilizam diretamente as equações de Saint Venant, enquanto dos hidrológicos consideram apenas o efeito de armazenamento do escoamento.

O método hidrológico é mais simples, mas em geral, falha na obtenção de resultados satisfatórios em propagações de onda em canais de grande comprimento (Chow, 1959). Ampliando esta classificação proposta por Chow (1959), Tucci (1998) apresentou os modelos utilizados para propagação de onda e os termos das equações de Saint Venant presentes ou não (Tabela 1).

Tabela 1. Resumo das características de modelos de propagação de onda.

Modelos	Distribuído	Efeito de Jusante	Termos de Pressão	Termo de Inércia	Dados Físicos
Armazenamento	Não	Não	Não	Não	Não
Onda Cinemática	Sim	Não	Não	Não	Opcional
Difusão	Sim	Sim	Sim	Não	Opcional
Hidrodinâmico	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

2.4. Modelo Muskingum e modificação Muskingum-Cunge

O modelo Muskingum é considerado de armazenamento. Foi desenvolvido por McCarthy em 1939 e aplicado no rio Muskingum. Ele permite calcular o hidrograma de saída amortecido na seção de jusante de um canal, dado hidrograma de entrada na seção de montante. Dependendo do comprimento do canal e das características de uniformidade ao longo do mesmo, pode-se representar o canal por meio de uma seção típica ou dividi-lo em diversas seções.

Para considerar o efeito de armazenamento é utilizada a seguinte equação:

$$S = K[XI + (1 - X)Q_e] \quad (4)$$

onde K é o tempo médio de trânsito da onda; X é o fator de ponderação das vazões; e S é o volume armazenado no seção do canal. Os parâmetros K and X não possuem significado físico preciso e são utilizados como uma aproximação para o canal como um todo. Usualmente, são considerados como parâmetros de ajuste (Akan e Houghtalen, 2003).

A equação de armazenamento pode ser escrita através de diferenciais finitas num tempo incremental $\Delta t = t_2 - t_1$:

$$\frac{S_2 - S_1}{\Delta t} = \frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad (5)$$

onde o índice 1 representa o início do tempo incremental t_1 , e 2 refere-se ao fim do tempo incremental t_2 . Sabendo da relação linear entre S, I e Q pode-se dizer que $Q_2 = f(Q_1)$. Pode-se representar também S_1 e S_2 em função das vazões afluente e efluente:

$$S_2 - S_1 = K[X(I_2 - I_1) + (1 - X)(Q_2 - Q_1)] \quad (6)$$

Substituindo a equação (5) em (6), tem-se:

$$Q_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 Q_1 \quad (7)$$

onde

$$C_0 = \frac{\left(\frac{\Delta t}{K}\right) - 2X}{2(1-X) + \left(\frac{\Delta t}{K}\right)} \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{\left(\frac{\Delta t}{K}\right) + 2X}{2(1-X) + \left(\frac{\Delta t}{K}\right)} \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{2(1-X) - \left(\frac{\Delta t}{K}\right)}{2(1-X) + \left(\frac{\Delta t}{K}\right)} \quad (10)$$

Aqui nota-se que $C_0 + C_1 + C_2 = 1$ e que para todos sejam adimensionais Δt e K devem possuir a mesma unidade.

A única incógnita é o valor de Q_2 , mas que é calculado através da avaliação dos coeficientes C_0, C_1, C_2 , sabendo que I_1 e I_2 são determinados pelos hidrogramas afluentes e Q_1 obtido pela condição inicial ou cálculos em seções anteriores.

Brutsaert (2005) apresentou três restrições teóricas sobre os parâmetros deste modelo:

1. Os valores de X devem obedecer à seguinte relação:

$$0 \leq X \leq 0,5$$

Pois com valores acima de 0,5 a magnitude do pico do escoamento aumenta à medida que a onda se propaga para jusante, o que nunca ocorre quando modelos de armazenamento são utilizados. Já para valores negativos de X , ocorre um aumento na taxa de escoamento saindo e conseqüente diminuição do valor de armazenamento;

2. O método envolve uma escala temporal, Δt , K e o tempo de pico t_p . Para se obter uma resolução satisfatória do comportamento temporal da onda deve-se considerar a seguinte relação:

$$\Delta t \leq a \cdot t_p$$

onde a constante a deve ser da ordem de 4 para 5 preferencialmente;

3. A fim de evitar a geração de vazões negativas nos cálculos dos hidrogramas dos trechos deve-se considerar:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \leq \frac{c_m}{2X}$$

e

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \geq \frac{c_m}{2(1-X)}$$

onde c_m representa a celeridade da onda.

Com estas restrições pode-se construir um gráfico que delimita a região teoricamente válida de aplicação deste modelo (Figura 2).

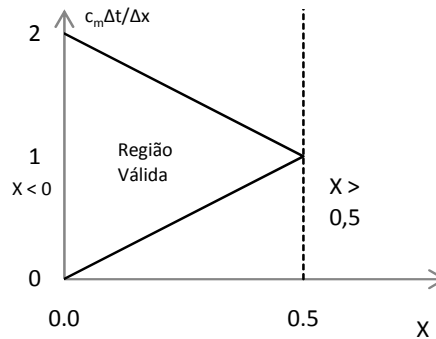


Figura 2. Região teoricamente válida para aplicação do modelo Muskingum-Cunge.

Heatherman (2004) obteve resultados diferentes a essa área considerada válida, propondo que os valores do coeficiente X estejam no intervalo de 0,5 a $-\infty$.

Por sua formulação simplificada e suas restrições o método Muskingum sofreu algumas modificações. Uma delas é a chamada Muskingum-Cunge proposta por Cunge (1969) para estimar os valores de K e X em termos de características físicas do canal:

$$K = \frac{L}{mv_0} \quad (11)$$

$$X = 0,5 \left(1 - \frac{Q_0}{S_0 m v_0 L} \right) \quad (12)$$

onde L é o comprimento do canal; m é o expoente da curva chave; v_0 é a velocidade correspondente; Q_0 é a vazão de referência; e T_0 é o comprimento de topo. O coeficiente m é obtido através da equação da curva chave:

$$Q = eA^m \quad (13)$$

Ponce e Theurer (1982) recomendam que seja realizado o teste de comprimento máximo de canal segundo a seguinte equação:

$$L \leq 0,5 \left(mv_0 \Delta t + \frac{Q_0/T_0}{mv_0 S_0} \right) \quad (14)$$

Não satisfazendo esta relação o canal deve ser dividido em trechos menores.

Na utilização deste modelo, Tang *et al.* (1999), Cunge *et al.* (2001), Collischonn *et al.* (2004), Todini (2007) e Perumal e Sahoo (2008) constataram diminuições de volume de água nos dados de saída e apresentaram modificações a fim de melhorar a resposta de saída deste modelo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Implementação do Modelo Muskingum-Cunge

O modelo Muskingum-Cunge foi implementado em “MATLAB”. Para fazer as simulações foram criados dois arquivos de formulação. O primeiro apresenta a formulação completa do modelo e faz testes de compatibilidade de execução pela equação (14). Caso seja necessário dividir o canal em trechos menores, o segundo arquivo é utilizado para calcular os parâmetros desses trechos.

3.2. Canais Simplificados

Foram criados canais com seções retangulares (5 m de altura e 34,5 m de largura), variando seu comprimento entre: 5.000; 10.000; 25.000 metros; bem como para cada comprimento foi variada a declividade de fundo entre: 0,01; 0,005; 0,001; e 0,0005 m/m totalizando 12 canais.

3.3. Hidrograma de entrada

Escolheu-se um hidrograma que: (i) apresentasse duração suficiente para simulação; e (ii) possuísse vazões que não causassem transbordamento nos canais. Ele foi utilizado para todas as simulações com discretização do tempo Δt de 2 minutos. Na Figura 3 se encontra o hidrograma padrão.

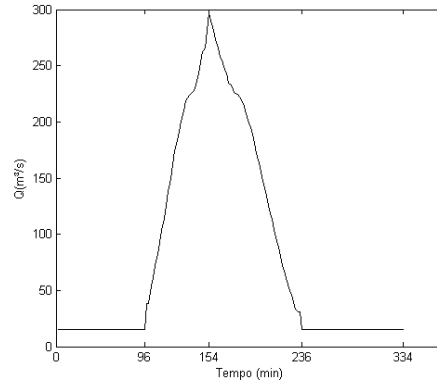


Figura 3. Hidrograma padrão.

3.4. Simulações no HEC-RAS

O fluxograma da Figura 4 representa as etapas para a simulação no *software* HEC-RAS:

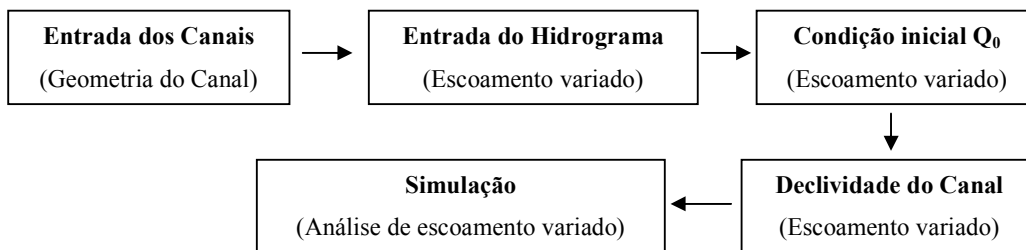


Figura 4. Fluxograma da simulação com HEC-RAS.

Na etapa de simulação são definidos os dados: (i) do intervalo computacional; (ii) do canal; (iii) do hidrograma; e (iv) da necessidade ou não de considerar tanto escoamento subcrítico como supercrítico para a simulação. Além disso, constata-se a necessidade ou não de dividir o canal em trechos menores. As saídas do modelo foram as consideradas até metade do comprimento total dos canais para evitar influências de jusante.

3.5. Simulação do Modelo Muskingum-Cunge

Foram feitos testes do comprimento do canal para verificar a viabilidade da simulação. Caso fosse necessário diminuir o comprimento do canal, através da verificação da equação (14), este foi dividido, e foi utilizada a segunda formulação para determinar os dados de saída.

Os canais foram simulados, assim como no HEC-RAS, apenas até a metade do comprimento total para evitar os efeitos de jusante. Ao final pede-se para gravar o hidrograma de saída e os coeficientes X e $c_m \Delta t / \Delta x$. Os hidrogramas de saída foram comparados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Comparação dos hidrogramas de saída entre o HEC-RAS e Muskingum-Cunge

Para os canais simulados uma curiosidade foi apresentada. O valor acumulado da vazão obtido nos hidrogramas de saída apresentaram valor acima do hidrograma de entrada. Ou seja, um ganho de vazão após as simulações (Tabela 2).

Tabela 2. Diferença percentual entre vazões acumuladas na simulação com o HEC-RAS.

L(m)/ S₀(m/m)	0,01	0,001	0,005	0,0005
5.000	0,05%	0,05%	0,04%	0,02%
10.000	0,10%	0,07%	0,08%	0,02%
25.000	0,24%	0,17%	0,19%	0,04%

Assim como nos hidrogramas de saída do HEC-RAS, os hidrogramas do Muskingum-Cunge também apresentaram mudança no valor de vazão acumulada. Entretanto, neste caso, para menos. Este resultado de perda de volume (Tabela 3) já foi apresentado por Tang *et al.* (1999), Cunge *et al.* (2001), Collischonn *et al.* (2004), Todini (2007) e Perumal e Sahoo (2008).

Tabela 3. Diferença percentual entre vazões acumuladas na simulação com o Muskingum-Cunge.

L(m)/ S₀(m/m)	0,01	0,001	0,005	0,0005
5.000	- 1,47%	- 3,14%	- 1,80%	- 4,34%
10.000	- 4,75%	- 5,68%	- 5,44%	- 6,56%
25.000	- 18,79%	- 10,45%	- 19,13%	- 10,00%

A Tabela 4 mostra os canais e o respectivo valor percentual da diferença entre os picos para as simulações com HEC-RAS e com Muskingum-Cunge. Desta forma, demonstra-se o grau de aceitação das simulações do Muskingum-Cunge.

Tabela 4. Valores de diferença percentual entre os picos do HEC-RAS e Muskingum-Cunge.

L(m)/ S₀(m/m)	0,01	0,001	0,005	0,0005
5.000	8,13%	8,89%	9,32%	12,70%
10.000	13,00%	12,06%	13,66%	13,13%
25.000	22,29%	15,76%	22,35%	13,73%

4.2. Mapeamento dos coeficientes fator de ponderação das vazões e celeridade de onda

Na Figura 5(a) é apresentado o mapeamento dos coeficientes para apresentados os canais com declividade de 0,0005m/m. Para esses canais percebe-se grande dispersão do coeficiente X . Como a declividade é relativamente baixa (0,05%), o teste de comprimento de trecho, apresentado na equação (14), apresenta valores pequenos de L . Desta forma a relação da equação (12) resulta em valores maiores que 1, causando variação e valores negativos de X . Durante a passagem da onda de cheia ocorre um pequena variação da velocidade, como os demais valores são constantes para cada simulação tem-se também uma pequena variação do coeficiente $c_m\Delta t/\Delta x$, sabendo que esta relação é igual a $\Delta t/K$.

A Figura 5(b) apresenta o mapeamento dos coeficientes para apresentados os canais com declividade de 0,001m/m. Assim como para os canais com declividade de 0,0005 m/m percebe-se grande dispersão do coeficiente X . Já com relação a variação do coeficiente $c_m\Delta t/\Delta x$, nota-se uma maior variação nos valores obtidos para este coeficiente. Isso se explica já que para o aumento da declividade ocorre também uma maior variação em escala da velocidade e assim maior dispersão dos valores do coeficiente. Esse aumento pode ser notado em maior escala nas Figuras 5(c) e 5(d), nas quais se encontra a diminuição da dispersão dos valores de X . Seguindo a mesma linha de raciocínio das anteriores, com o aumento da declividade diminui-se o comprimento máximo dos trechos simulados. Com isso diminui-se a escala de variação da relação da equação (12) e subsequente menor dispersão.

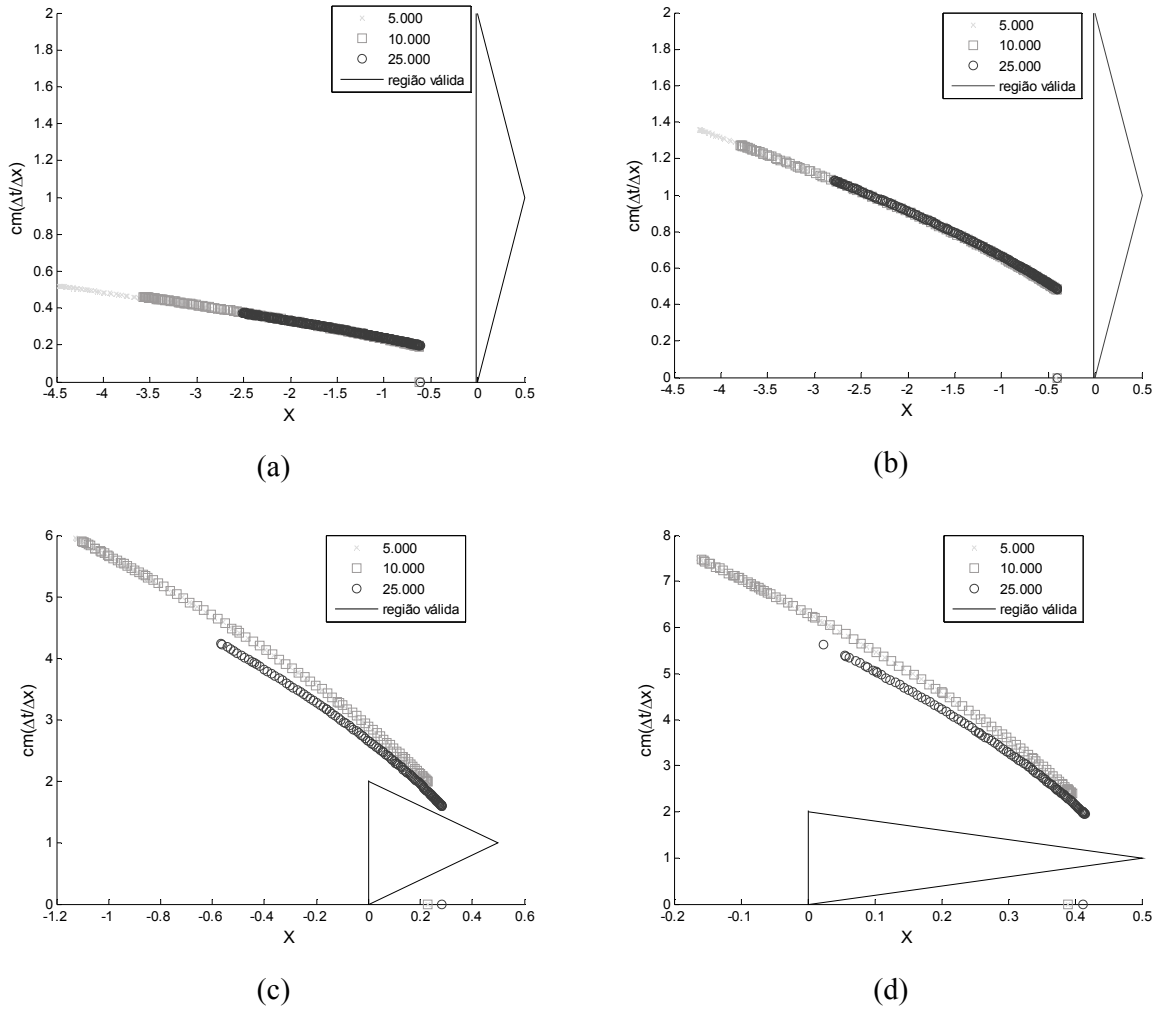


Figura 5. Mapeamento dos coeficientes de validação para o Muskingum-Cunge: (a) $S_0 = 0,0005\text{m/m}$; (b) $S_0 = 0,001\text{m/m}$; (c) $S_0 = 0,005\text{m/m}$; e (d) $S_0 = 0,01\text{m/m}$.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho fez um estudo comparativo entre um modelo hidrodinâmico, através do *software* HEC-RAS, e um modelo de onda cinemática, através do Muskingum-Cunge, com objetivo de verificar a região teoricamente válida do modelo Muskingum-Cunge. Para isso, apresentou-se o mapeamento dos coeficientes X e $c_m \Delta t / \Delta x$. Estes coeficientes foram calculados e apresentados. Nenhum canal simulado apresentou um ponto sequer dentro da área teoricamente válida. Heatherman (2004) obteve resultado semelhante, propondo que os valores do coeficiente X estejam no intervalo de 0,5 a $-\infty$.

Na comparação dos hidrogramas foram constatados dois problemas. No modelo Muskingum-Cunge ocorre a perda de volume de água entre o hidrograma de entrada e o hidrograma de saída. Esse resultado também já foi constatado por Tang *et al.* (1999), Cunge *et al.* (2001), Collischonn *et al.* (2004), Todini (2007) e Perumal e Sahoo (2008) que apresentaram outras formulações e discussões da formulação na tentativa de minimizar esta perda de volume de água. Já para o HEC-RAS ocorre o contrário, ou seja, o aumento no volume de saída. A fim de verificar este problema aconselhasse uma investigação na formulação do HEC-RAS para determinar qual a fonte deste ganho.

Recomenda-se aplicar o modelo Muskingum-Cunge e o *software* HEC-RAS agora em canais naturais que possuam medições de vazão em diferentes trechos para verificar a confiabilidade e acurácia para ambos os modelos. Por fim, pode-se concluir que para canais simplificados como os apresentados neste trabalho o modelo Muskingum-Cunge pode ser aplicado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

BIBLIOGRAFIAS

AKAN, A; HOUGHTALEN, R. J. (2003). *Urban hydrology, hydraulics and stormwater quality: engineering applications and computer modeling*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 373p.

BRUTSAERT, W.; HOUGHTALEN, R. J. (2005). *Hydrology: an introduction*. Cambridge University Press, New York, 605p.

CHOW, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGRAW-HILL Book Company, New York, 680p.

COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. ; FAILACHE GALLO, N. (2004). “Avaliação do método de Muskingum Cunge não linear com conservação de volume para propagação de cheias em rios” in Anales XXI Congreso Latinoamericano de Hidraulica, São Paulo. 2004.

Cunge, J. A. (1969). “On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method).” *J. Hydr. Res.*, Delft, The Netherlands,7(2), 205–230.

CUNGE, J. A. *et al.* (2001). “Volume Conservation in Variable Parameter Muskingum-Cunge Method”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127 ASCE, pp. 239 – 245.

- DAS, A. (2004). “*Parameter estimation for Muskingum models*”. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 130, N° 2, ASCE, pp. 140–147.
- GARBRECHT, J.; BRUNNER, G. . “*Hydrologic channel-flow routing for compound sections. Journal of Hydraulic Engineering*”, ASCE, 1991.
- HEATHERMAN, W. J. (2004). “*Muskingum-Cunge Revisited*” in Water and Environmental Resources Congress, Salt Lake City, June27-July 1, 2004.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC). (2008a). “*HEC-RAS River analysis system 4.0 – User’s manual*”. U.S. Army Corps of Engineers, Calif.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC). (2008b). “*HEC-RAS River analysis system 4.0 – Hydraulic reference manual*”. U.S. Army Corps of Engineers, Calif.
- PERUMAL, M.; SAHOO, B. (2008). “*Volume Conservation Controversy of the Variable Parameter Muskingum-Cunge Method*”. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 134. N° 4, ASCE, pp. 475 – 485.
- PONCE, V. M.; LUGO, A. (2001) . “*Modeling Looped Ratings in Muskingum-Cunge Routing*”. Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 6, N° 2, ASCE, pp.119 – 124.
- PONCE, V.M.; THEURES, F.D. (1982) . “*Accuracy criteria in diffusion routing*”. Journal of the Hydraulics Division, Vol. 108, ASCE, pp. 747-757.
- PORTO, R de M. (2006). *Hidráulica Básica*. EESC-SP, São Carlos, 519p.
- SINGH, V. P. (2001) . “*Kinematic wave modeling in water resources: a historical perspective*”. Hydrological Processes, Vol. 15, pp.671-706.
- TANG, X.-N.; KNIGHT, D. W.; SAMUELS, P. G. (1999) . “*Volume Conservation in Variable Parameter Muskingum-Cunge Method*”. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, N° 6, ASCE, pp. 610 – 620.
- TODINI, E. (2007) . “*A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach*”. Hydrol. Earth Syst. Sci.,Vol. 11,pp. 1645-1659.
- TUCCI, C. E. M.(1998). *Modelos hidrológicos*. Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 669p.

YOON, J.; PADMANABHAM, G. (1993) . “*Parameter estimation of linear and nonlinear Muskingum models*”. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 119, N° 5, ASCE, pp. 600 – 610.