

SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM BACIA HIDROGRÁFICA

Jorge Luiz STEFFEN¹, Isabel Kaufmann de ALMEIDA¹, Joaquim Francisco da COSTA NETO¹, Teodorico ALVES SOBRINHO¹

(1) Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Cidade Universitária, CEP 79070-900. Campo Grande, MS. Endereços eletrônicos: jorgeluzsteffen@gmail.com; isabel.almeida@ufms.br; quinciao@terra.com.br; teodorico.alves@ufms.br.

Introdução
Materiais e Métodos
 Idealização da Forma da Bacia
 Escoamento Superficial em Planos
 Escoamento Superficial em Canais
 Forma Adimensional das Equações
 Método de Solução das Equações
Modelo Computacional Proposto
 Bacia Adotada para Verificação do Modelo
Verificação do Modelo
 Análise Estatística
Resultados e Discussão
Conclusão
Referências Bibliográficas

RESUMO - Em bacias hidrográficas, volumes afluentes a determinada seção do rio, são provenientes de chuvas ocorridas dentro da área de captação e de volumes armazenados nos lençóis subterrâneos. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo apresentar metodologia que simula o escoamento superficial e gera hidrogramas em seções de interesse, a partir de dados fisiográficos da bacia, registros de precipitação em postos influentes e vazão observada na seção exutória. Para tanto, admitiu-se o formato em V com dois planos laterais e um canal central a fim de simplificar a forma complexa da bacia. Utilizou-se o modelo da Onda Cinemática para propagação do escoamento superficial. Para verificação da metodologia, adotou-se bacia exemplo descrita na bibliografia. Os resultados demonstram que, para diferentes níveis de discretização, as vazões simuladas se ajustam bem às vazões apresentadas na bacia exemplo.

Palavras-chave: onda cinemática, modelagem, vazão.

ABSTRACT - In watersheds, tributaries volumes to certain river's section comes from rainfall occurred within the catchment area and volume stored in the groundwater. In this context, we present a methodology that aims to simulate the runoff and generating hydrographs into several sections of interest from physiographic basin data, rainfall records in influential gauging stations of precipitation in influential positions and streamflow data of discharge basin section. We adopted the V-shaped with two flat sides and a central channel to simplify the basin's complex shape. We used the kinematic wave model for the propagation of surface runoff. We used the example basin described in the bibliography to check the model. The results show the good agreement between simulated flows and the flows presented in the example basin, for different levels of discretization, the same intensity and different duration of the precipitation.

Keywords: kinematic wave, modeling, flow.

INTRODUÇÃO

A importância da água tem sido cada vez mais evidente em todo o planeta, seja pelos benefícios que proporciona ou pelos inconvenientes de seu excesso ou de sua ausência. Adotar a bacia hidrográfica como unidade básica de gestão dos recursos hídricos tem sido prática corrente, onde são implantados postos pluviométricos e fluviométricos, compondo redes telemétricas ou não, para a medição de precipitação e vazões, permitindo simular parte do ciclo hidrológico. O modelo

hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas (Tucci, 2005). Ademais, os modelos hidrológicos podem ser úteis na previsão de cheias e na gestão de recursos hídricos, além de embasar projetos de estruturas hidráulicas (Beskow et al., 2011). Para Palacios-Vélez et al., (1998), a demanda por modelos que permitam melhor previsão hidrológica aumenta

com a notificação de prejuízos causados por inundações. Kim & Kaluarachchi (2008) afirmam que, devido à limitação de monitoramento hidrológico, deve-se ter preferência por modelos cujos dados de entrada são mínimos, como precipitação, temperatura e evapotranspiração potencial e que apresentam um reduzido número de parâmetros a serem estimados. Conforme Sousa & Sousa (2010), a previsão de vazão em um sistema hídrico é uma das técnicas utilizadas para minimizar o impacto das incertezas do clima sobre o gerenciamento dos recursos hídricos podendo-se considerá-la um dos principais desafios relacionados ao conhecimento integrado da climatologia e hidrologia. Para Beskow et al. (2009), a estimativa do escoamento superficial em bacias hidrográficas é de suma importância para conservação dos recursos naturais, sendo de grande utilidade para o planejamento e a tomada de decisões no processo de ocupação ambiental. Deste modo, faz-se, muitas vezes necessária a simulação de hidrogramas de escoamento para gestão de projetos ambientais. Visando a obtenção desses hidrogramas, o modelo da Onda Cinemática tem sido usualmente utilizado em trabalhos de modelagem do processo de transformação de chuva em vazão (Wang et al., 2011; Chua & Wong, 2010; Rai et al., 2010; Meng et al., 2008). De acordo com Chua & Wong (2010), a vantagem desse modelo reside na sua

capacidade em simular o escoamento a partir das características físicas da bacia e dos dados de precipitação.

Nesse contexto, é de grande valia o desenvolvimento de modelos de simulação baseados em relações matemáticas entre variáveis, que representem os processos do ciclo hidrológico e parâmetros relativos aos aspectos físicos da bacia hidrográfica. Pretende-se aprimorar a estrutura dos modelos matemáticos e desenvolver algoritmos e programas computacionais que de forma simples, possam apresentar resultados satisfatórios e de fácil aplicação. Mas os dados disponíveis para uso, bem como aqueles provenientes de aparelhos registradores, tanto de chuva como de vazão, também podem ser dispostos em planilhas eletrônicas. Nesse ambiente, existe ainda a possibilidade de programação em linguagem apropriada, lendo os dados disponíveis em algumas planilhas, calculando e dispondo os resultados em outras planilhas e apresentando gráficos.

Neste trabalho objetivou-se desenvolver metodologia para simular em planilha eletrônica, o processo de transformação da chuva em vazão no contexto de uma bacia hidrográfica rural, utilizando o modelo da Onda Cinemática formado pela equação da continuidade e uma simplificação da equação da quantidade de movimento na determinação do hidrograma do escoamento superficial.

MATERIAIS E MÉTODOS

Idealização da Forma da Bacia

A bacia foi idealizada em forma de “V”, composta de dois planos laterais e um canal central que representa o canal principal de drenagem (Figura 1). Originalmente, Stephenson & Meadows (1986) consideraram iguais dimensões, rugosidades e declividades para os planos laterais e também a ocorrência de precipitação efetiva (i_e) igualmente distribuída por toda a bacia. O comprimento do plano é denotado por L_P e o comprimento do canal por L_S enquanto b designa a sua largura.

A vazão por unidade de largura do plano e contribuição lateral ao canal é q_0 servindo para compor a vazão Q_S em qualquer seção do canal e para qualquer tempo. Na presente abordagem, buscando utilizar a variabilidade espacial e temporal dos dados pluviométricos e das características físicas da bacia, são considerados planos à esquerda e à direita do canal com diferentes dimensões, rugosidades médias e declividades, além da variabilidade espacial e temporal das chuvas.

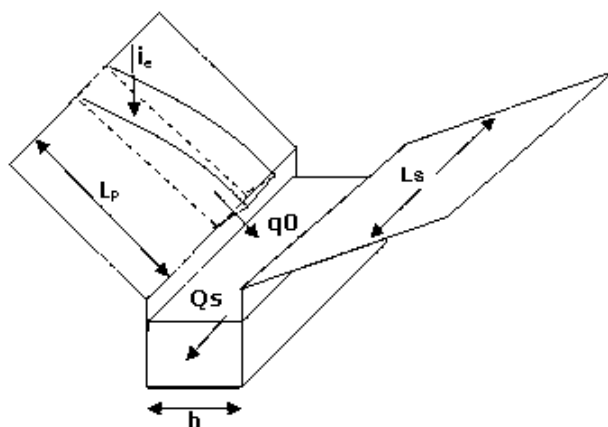


Figura 1. Forma idealizada para uma bacia hidrográfica.

Escoamento superficial em planos

Ao simular o efeito do escoamento sobre as planícies adjacentes aos canais, onde a profundidade y do escoamento é considerada pequena em relação à largura do plano L_s , considera-se a área e a vazão por unidade de largura do plano q_0 ($m^2 \cdot s^{-1}$), com a entrada no percurso representada pela intensidade da chuva efetiva i_e . Nesta situação a equação da continuidade é dada por:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q_0}{\partial x} = i_e \quad (1)$$

Na equação (1) constam duas variáveis dependentes, exigindo para sua solução, que se adote uma relação entre elas, usando α e m como parâmetros a ajustar, tal como a equação:

$$q_0 = \alpha \cdot y^m \quad (2)$$

Ao substituir a relação (2) na equação (1) resulta uma única variável dependente:

$$\frac{\partial q_0}{\partial x} + \frac{1}{m \cdot (\alpha \cdot q_0^{m-1})^{1/m}} \frac{\partial q_0}{\partial t} = i_e \quad (3)$$

Escoamento superficial em canais

O modelo da onda cinemática para a simulação do escoamento em rios e canais é utilizado com z representando a distância longitudinal no canal (m). Assim, a equação da continuidade é escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial z} + \frac{\partial A_s}{\partial t} = (q_e + q_d) \quad (4)$$

Sendo: Q_s a vazão e $A_s = (b \cdot y_s)$ a área da seção transversal no canal; b é a largura média; y_s a profundidade do escoamento; q_e e q_d as

contribuições laterais dos planos à esquerda e à direita, respectivamente.

A equação (4) também possui duas variáveis dependentes e exige uma relação entre elas, tendo α_s e m como parâmetros a ajustar, tal como a equação (5) de Manning:

$$Q_s = \frac{A_s}{n_s} \cdot R_h^{2/3} \cdot S_f^{1/2} = \left(\frac{S_s^{1/2}}{n_s \cdot P_M^{2/3}} \right) \cdot A_s^{5/3} = \alpha_s \cdot A_s^m \quad (5)$$

onde: R_h é o raio hidráulico, denotando a razão entre a área de escoamento A_s e o perímetro resistente (P_M) de contato entre o fluido e a superfície; S_f é declividade da linha de energia; n é um parâmetro de resistência que depende da natureza da superfície e do regime de escoamento; Conforme a seção transversal, o perímetro molhado depende da profundidade y_s , implicando em que α_s varia com a profundidade. No entanto, pode-se ajustar um valor constante para este parâmetro com base nas vazões calculadas para a seção, usando a fórmula de Manning.

Forma Adimensional das Equações

Conforme metodologia apresentada por Stephenson & Meadows (1986), as variáveis que quantificam o processo de escoamento podem ser agrupadas para formar variáveis adimensionais, facilitando a solução quanto às unidades e dimensões.

Como i_e representa a precipitação efetiva que ocorre em um plano, com tempo de concentração específico t_c , ao trabalhar com diversos planos e bacias, de forma a generalizar o tratamento, torna-se necessário a adoção de um tempo de referência t_R em substituição ao t_c .

No caso de variar a precipitação efetiva i_e no tempo, adota-se também uma precipitação de referência i_R . Foram adotadas as seguintes variáveis adimensionais:

$$X = \frac{x}{L_P} \quad (6)$$

$$P = \frac{q_0}{(i_R \cdot L_P)} \quad (7)$$

$$T = \frac{m \cdot t}{t_R} \quad (8)$$

Promovendo a troca das variáveis definidas nas relações (6), (7) e (8) na equação (3) resulta

$$\frac{\partial P}{\partial X} + \left(\frac{L_P}{\alpha \cdot i_R^{m-1}} \right)^{1/m} \frac{1}{P^{1-1/m} \cdot t_R} \frac{\partial P}{\partial T} = \frac{i_e}{i_R} = K_0 \quad (9)$$

A expressão em parêntesis na equação (9) pode ser designada como T_{CR} e equivale ao tempo de concentração para cada plano, calculado com a precipitação de referência i_R . Assim para $m=5/3$:

$$\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{T_{CR}}{t_R \cdot P^{0.4}} \frac{\partial P}{\partial T} = K_0 \quad (10)$$

Para o escoamento em canais, onde existe a contribuição dos planos laterais, à esquerda com comprimento L_E e à direita com comprimento L_D , conforme a equação (4), além das variáveis adimensionais anteriormente definidas, considera-se:

$$Z = \frac{z}{L_S} \quad (11)$$

$$Q = \frac{Q_S}{L_S \cdot i_R \cdot (L_E + L_D)} \quad (12)$$

A substituição das variáveis adimensionais na equação (4), resulta:

$$\frac{\partial Q}{\partial Z} + \frac{G}{Q^{0.4}} \frac{\partial Q}{\partial T} = K_T \quad (13)$$

sendo: $G = \left\{ \frac{L_S}{\alpha_S \cdot [i_R \cdot (L_E + L_D)]^{m-1}} \right\}^{1/m} \cdot \frac{1}{t_R}$
e $K_t = \frac{(q_E + q_D)}{i_R \cdot (L_E + L_D)}$

Método de Solução das Equações

Para resolução das equações diferenciais parciais resultantes, além de métodos como o das linhas características (Steffen, 1997), são utilizados métodos numéricos na forma implícita ou explícita da variável dependente. Liggett (1975) expôs um sistema numérico implícito de diferenças finitas, que resulta em uma equação não linear e é resolvida iterativamente por aproximações de segunda ordem, conforme descrito por Tucci (2005). Uma solução por meio de hidrogramas adimensionais foi apresentada por Stephenson & Meadows (1986), em que se fazem interpolações para cada caso específico, obtendo um hidrograma adimensional final e posterior obtenção das variáveis dimensionais.

O método numérico explícito de diferenças finitas foi utilizado na resolução das equações (9) e (13) do modelo da onda cinemática, que são aplicadas nas regiões de estudo convenientemente discretizadas e representadas por uma série de pontos ou nós. A aplicação do método, conforme discretização esquematizada na Figura 2 exige o conhecimento de condições iniciais e de contorno para o problema estudado.

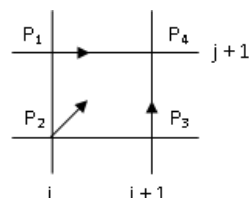


Figura 2. Esquema de discretização pelo método das diferenças finitas para os planos.

Aplicando-se na equação (9) tem-se:

$$\frac{P_4 - P_1}{\Delta X} + \frac{T_c}{t_R \cdot P_2^{0.4}} \frac{P_4 - P_3}{\Delta T} = K_0 \quad (14)$$

multiplicando a equação (14) por ΔX ,

considerando que $\beta = \frac{\Delta X \cdot T_c}{t_R \cdot \Delta T \cdot P_2^{0.4}}$, tem-se:

$$(P_4 - P_1) + \beta(P_4 - P_3) = \Delta X \cdot K_0 \quad (15)$$

Isolando P_4 na equação (15), obtém-se o valor discretizado da equação do plano no tempo e espaço seguintes.

$$P_4 = \frac{K_0 \cdot \Delta X + P_1 + \beta \cdot P_3}{(1 + \beta)} \quad (16)$$

Aplicando-se método idêntico para solução da equação (13), obtém-se a equação (17)

$$Q_4 = \frac{q_* \cdot \Delta Z + \beta \cdot Q_3 + Q_1}{(1 + \beta)} \quad (17)$$

$$\text{com } \beta = \frac{\Delta Z \cdot G}{\Delta T \cdot Q^{0.4}} \quad (18)$$

As variáveis adimensionais X , Z e T apresentam limites entre zero e um e são utilizadas com intervalos de variação ΔX , ΔZ e ΔT para o cálculo das variáveis adimensionais P e Q que representam o escoamento nos planos e canais, conhecendo-se as condições iniciais e de contorno. Transformações inversas são então usadas para determinar as vazões dimensionais e os respectivos tempos de ocorrência.

Modelo Computacional Proposto

O modelo computacional proposto executa a simulação do escoamento superficial em sub-bacias, utilizando o modelo da onda cinemática para planos e canais e possibilita a visualização e interpretação dos resultados obtidos. Alimenta-se o modelo com dados físicos do

canal (comprimento, declividade e rugosidade do canal) e dos planos (largura, declividade, rugosidade e precipitação efetiva nos dois planos laterais ao canal). Os dados fornecidos ao modelo foram sequenciados na forma hierárquica do escoamento nas sub-bacias, de modo a definir as contribuições das sub-bacias de montante. O modelo gera hidrogramas em diversos pontos de interesse, considerando diferentes níveis de discretização, subsidiando o pesquisador na avaliação dos dados fornecidos.

Bacia Adotada para Verificação do Modelo

Os testes de verificação e ajuste do modelo foram realizados em bacia exemplo, com área de 0,834 km², apresentado por Stephenson & Meadows (1986), no qual o autor, através do desenvolvimento gráfico e analítico, obtém o hidrograma na seção exutória. Na solução, o autor utilizou a equação da onda cinemática, para descrever o escoamento em planos e canais. Ressalta-se que, na caracterização da bacia utilizada pelo autor, os planos e canais possuíam larguras idênticas ao longo dos trechos de escoamento, diferentemente do adotado neste trabalho.

A forma e algumas características físicas da bacia, quando discretizada em planos retangulares, assumem a forma e características constantes na Figura 3.

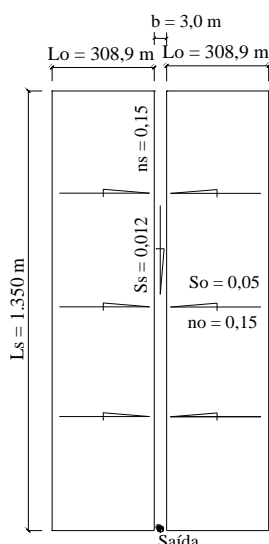


Figura 3. Discretização da bacia usada para verificação e ajuste do modelo.

Fonte: Stephenson & Meadows. (1986).

Obteve-se graficamente o valor adimensional da vazão (Q) utilizando-se os valores calculados de G , F e T_D , (Figura 6.10,

Stephenson & Meadows, 1986). O escoamento crítico foi obtido com chuva de 12 horas,

produzindo descarga de pico igual a $2,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Tabela 1).

Utilizando-se os dados disponíveis e fazendo-se uso dos fatores de multiplicação

determinados na Tabela 1, traçou-se o hidrograma do escoamento unidimensional da bacia exemplo, usado como referência no processo de verificação do modelo proposto.

Tabela 1. Cálculo e dimensionamento da descarga máxima e tempo de pico do hidrograma.

Variáveis	t_{cd}	i_e	F	t_{co}	T_D	Q	Q_s/A	Q_s	fatores de multiplicação	
						hidrogr. admen.	mmh^{-1}	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	eixo H	eixo V
Fórmulas	$t_{co} = \left(\frac{L_0}{\alpha_0 i_e^{m-1}} \right)^{1/m}$ (unidades métricas), $\alpha_0 = \frac{\sqrt{S_0}}{n_0}$, se i_e em $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, t_{co} em h. $f_c = 1,5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, $F = f_c / i_e$, $A = 0,834 \cdot 10^6 \text{ m}^2$, $T_D = (5/3) \cdot (t_{cd} / t_{co})$, $Q_s / A = Q \cdot i_e$ $Q_s = (Q_s / A) \cdot (A / 3,6 \cdot 10^6)$									
Unidades	horas	$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	-	horas	-				$\frac{3}{5} t_{co}$	$\frac{i_e A}{3,6 \cdot 10^6}$
						Fig.	Valor			
	1,0	13,99	0,107	0,995	1,675	6.10	0,828	11,59		
	0,6	17,55	0,086	0,909	1,101	6.10	0,505	8,86		
	1,2	12,70	0,118	1,034	1,934	6.10	0,918	11,66	2,70	2,942
	1,4	11,61	0,129	1,071	2,178	6.10	0,971	11,29	0,620	

Fonte: Stephenson et al. (1986).

Verificação do Modelo

Buscando-se alcançar resultados compatíveis com os obtidos por Stephenson & Meadows (1986), foram utilizados valores de intensidade,

tempo de concentração e tempo de duração idênticos aos calculados pelo autor. As características físicas da bacia também foram mantidas (Tabela 2).

Tabela 2. Características físicas da bacia para verificação do modelo.

Dados físicos	Local	Unidade	Quantidade
Área	Planos	km^2	0,834
Comprimento total retangularizado	Planos	m	1.350,00
Largura retangularizada	Planos	m	308,90
Largura	Canal	m	3,00
Declividade	Canal	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	0,012
	Plano	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	0,050
Rugosidade	Canal	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1/3}$	0,15
	Plano	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1/3}$	0,15

Fonte: Stephenson & Meadows (1986).

Para avaliar o desempenho do modelo proposto, foram realizadas diversas simulações, para diferentes níveis de discretização, considerando o evento de chuva sugerido por Stephenson et al. (1986). São descritas, a seguir, cinco situações distintas.

Situação A: Considerando a bacia discretizada em dois planos e um canal central, aplicou-se um evento de chuva com intensidade de $12,70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, com tempo de concentração igual a 1,034 h e tempo de duração de 1,2 h.

Situação B: A bacia original foi discretizada, dividindo em 02 sub-bacias de comprimentos iguais. Os dados de largura, declividade, rugosidade e largura do canal permaneceram constantes para essa simulação. Aplicou-se um evento de chuva com intensidade de $12,70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, com tempo de concentração igual a 1,034 h e tempo de duração de 1,2 h.

Situação C: A bacia original foi discretizada, dividindo em duas sub-bacias de comprimentos iguais. Foi aplicado um evento de chuva com

intensidade de 12,70 mm.h⁻¹, com tempo de concentração igual a 1,034 h e tempo de duração de 1,2 h, somente na segunda bacia. Os dados de largura, declividade, rugosidade e largura do canal permaneceram constantes para esta simulação.

Situação D: Aplicou-se um evento de chuva com intensidade de 12,70 mm.h⁻¹, com tempo de concentração igual a 1,034 h e tempo de duração de 1,2 h, para a bacia inteira. Porém, a precipitação foi distribuída em dois intervalos de 0,3 h com chuva, dois intervalos de 0,3 h sem chuva e mais dois intervalos de 0,3 h com chuva.

Situação E: Aplicou-se evento de chuva com intensidade de 12,70 mm.h⁻¹, com tempo de concentração igual a 1,034 h e tempo de duração de 1,2 h, para a bacia inteira. A precipitação foi distribuída em dois intervalos de 0,3 h sem chuva e quatro intervalos de 0,3 h com chuva, para toda a bacia.

Análise Estatística

O desempenho de modelos é usualmente avaliado por medidas estatísticas. Um bom critério de ajuste é o desvio do evento analisado, que é a medida da habilidade do modelo em simular valores observados. Nesse método, quanto menor o valor de D_v da equação

19, melhor é o ajuste, sendo que o valor zero representa uma simulação perfeita do evento observado (ASCE, 1993).

$$D_v(\%) = \frac{E - E^*}{E} 100 \quad (19)$$

onde, E refere-se ao evento observado e E* ao evento simulado no período analisado.

Outro método é o erro quadrático médio (EQM), frequentemente adotado na verificação do desempenho de modelos (Talei & Chua, 2012; St-Hilaire et al., 2012) e expresso na equação (20), que possibilita avaliar o desempenho do modelo em fornecer valores de pico e volumes escoados, compatíveis com valores observados.

$$SRQ = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Q_{OBS}(t) - Q_{CAL}(t))^2$$

$$EQM = \sqrt{SRQ} \quad (20)$$

Onde n é o número total de observações, $Q_{OBS}(t)$ é a vazão observada no instante t e $Q_{CAL}(t)$ é a vazão calculada no instante t.

No processo estatístico de comparação dos resultados, admite-se o valor de EQM próximo a 0,05 e D_v inferior a 5%, caso contrário, efetuam-se ajustes no modelo, objetivando acertar os tempos de pico e volumes escoados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Stephenson & Meadows (1986) utilizaram métodos gráficos na obtenção do hidrograma resultante, ocasionando aproximações entre valores gráficos e calculados (Tabela 3). Tais

aproximações ocasionaram diferença entre o hidrograma calculado pelo modelo proposto e aquele calculado por Stephenson et al. (1986).

Tabela 3. Valores calculados e utilizados graficamente por Stephenson & Meadows (1986).

Item	Valores calculados	Valor utilizado graficamente
F	0,118	0,0
G	0,44	0,5
T _D	1,934	Intervalo entre as curvas – 1,5 – 2,0

Situação A: Os hidrogramas resultantes dos métodos utilizados na determinação do escoamento superficial constam da Figura 4.

Através do modelo proposto, obteve-se volume total escoado na exutória, igual a 0,6248 (m³s⁻¹/h).

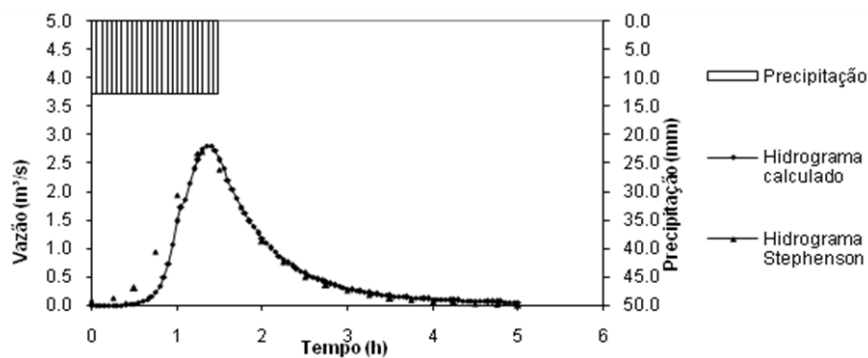


Figura 4. Hidrogramas resultantes entre o método proposto e o calculado por Stephenson et al. (1986).

Situação B: A Figura 5 ilustra a comparação entre os hidrogramas para duas bacias. Obteve-se volume total calculado, escoado na saída da

1ª bacia, de $0,3162 \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}/\text{h)}$, e o volume total, na exutória da 2ª bacia de $0,6259 \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}/\text{h)}$, acrescido do volume da 1ª bacia.

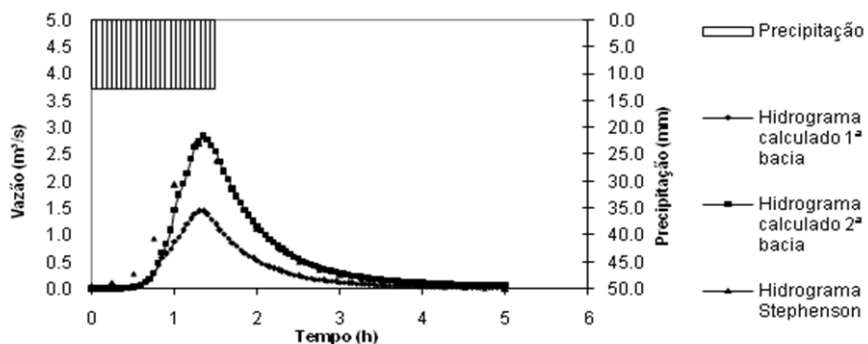


Figura 5. Comparação entre hidrogramas, com a bacia discretizada em 02 sub-bacias.

Situação C: A Figura 6 ilustra a comparação entre os hidrogramas para duas bacias, considerando que não houve chuva na 1ª bacia.

O volume total escoado na exutória da 2ª bacia foi de $0,3171 \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}/\text{h)}$.

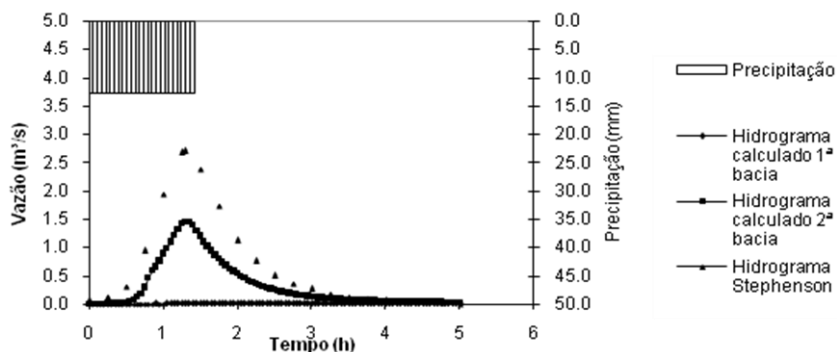


Figura 6. Comparação entre hidrogramas, para diferentes intensidades e níveis de discretização das sub-bacias.

Situação D: Para esta simulação, manteve-se a mesma quantidade total precipitada das situações A e B, porém com intervalos de tempo variados (Figura 7). Obteve-se volume

total escoado, medido na exutória, correspondente a toda bacia, igual a $0,6234 \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}/\text{h)}$.

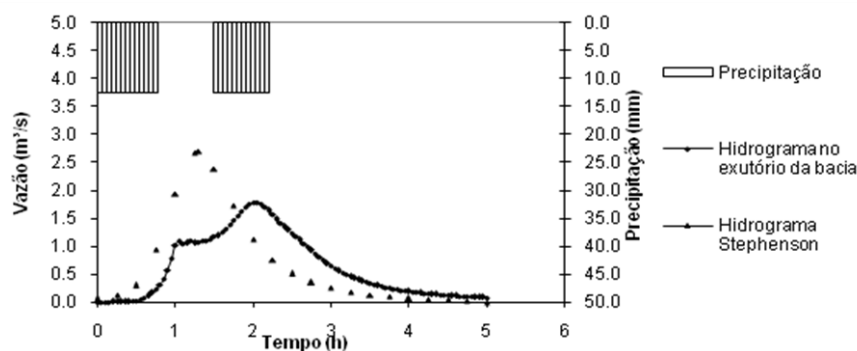


Figura 7. Comparação entre hidrogramas, para diferentes intensidades e intervalos de tempo das chuvas.

Situação E: Na Figura 8 observa-se a comparação entre os hidrogramas resultantes dos dois métodos utilizados na determinação do escoamento superficial. Manteve-se a quantidade total precipitada das situações A e

B, mas variou-se novamente os intervalos de tempo. Obteve-se volume total escoado igual a 0,6219 (m³.s/h), verificando-se a compatibilidade dos dados calculados.

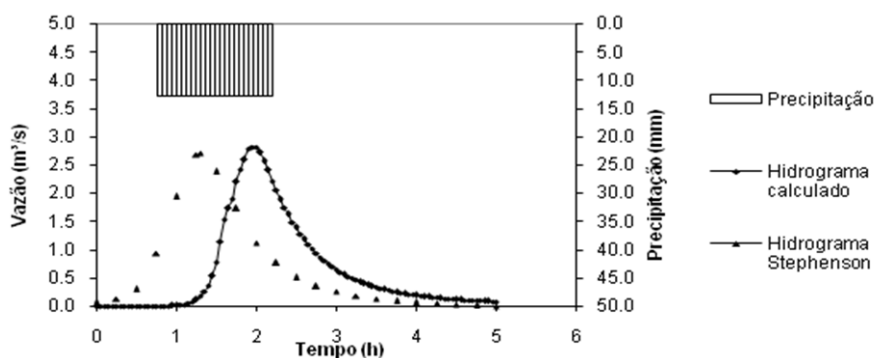


Figura 8. Comparação entre hidrogramas, para diferentes intensidades e intervalos de tempo das chuvas.

Diversas outras simulações, não descritas neste trabalho, foram realizadas. Simularam-se eventos de chuva em lados diferentes, em um mesmo lado da bacia e adotando discretização em forma de “Y”. Em todas as simulações obtiveram-se hidrogramas e volumes compatíveis aos calculados em situações semelhantes. O modelo proposto apresentou

resultados satisfatórios para diferentes níveis de discretização e diversas durações de precipitação.

O critério de ajuste utilizado calculou o valor do desvio (D_v) e o erro quadrático médio (EQM), para os cinco eventos selecionados (Tabela 4).

Tabela 4. Cálculo do desvio e do erro quadrático médio no ajuste do modelo.

Situação	Valor observado na bibliografia (E)	Valor calculado pelo modelo (E*)	D_v (%)	$(E - E^*)^2$
A	0,6496	0,6248	3,8177	0,0006
B	0,6496	0,6259	3,6484	0,0005
C	0,6496	2 x 0,3175 = 0,6350	2,2475	0,0002
D	0,6496	0,6234	4,0332	0,0006
E	0,6496	0,6219	4,2641	0,0007
Erro Quadrático Médio (EQM)				0,0533

A precisão das estimativas depende da habilidade do modelo em trabalhar com as variáveis fornecidas, apresentando respostas compatíveis com as observadas. Verificou-se que, durante o processo de ajuste, o valor do desvio manteve-se inferior a 5% e o erro quadrático médio, entre os valores calculados

pelo modelo e observados na bibliografia, foi consideravelmente pequeno, o que nos permitiu considerar satisfatório e finalizado o processo. O modelo proposto apresentou resultados satisfatórios para diferentes níveis de discretização da bacia e diversas durações de precipitação.

CONCLUSÃO

As vazões simuladas pelo modelo se ajustam bem às vazões apresentadas na bacia exemplo. Os testes executados com diferentes eventos de chuva e com variadas discretizações de bacia, demonstram que o modelo representa

bem essas situações ao produzir volumes proporcionais e formas coerentes de hidrogramas. O processo constitui-se em ferramenta útil na determinação do hidrograma de escoamento superficial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASCE, American Society of Civil Engineers. Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management Committee, Irrigation and Drainage Division. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 119, n. 3, p. 429-442, 1993.
2. BESKOW, S.; MELLO, C. R.; LLOYD D. NORTON, L. D.; SILVA, A. M. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. *Catena*, v. 86, p. 160-171, 2011.
3. BESKOW, S.; MELLO, C. R.; COELHO, G.; SILVA, A. M.; VIOLA, M. R. Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 3, n. 1, p. 169-178, 2009.
4. CHUA, L.H.C.; WONG, T.S.W. Improving event-based rainfall-runoff modeling using a combined artificial neural network-kinematic wave approach. *Journal of Hydrology*, v. 390, p. 92-107, 2010.
5. KIM, U. & KALUARACHCHI, J. J. Application of parameter estimation and regionalization methodologies to ungauged basins of Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, v. 362, p. 39-56, 2008.
6. LIGGETT, J. A. Basic equations of unsteady flow. In: MAHMOOD, K. & YEVJEVICH, V., *Unsteady flow in open channels*: Littleton, Colo., Water Resources Publications, Fort Collins, p. 29-62, 1975.
7. MENG, H.; GREEN, T.R.; SALAS, J.D.; AHUJA, L.R. Development and testing of a terrain-based hydrologic model for spatial Hortonian Infiltration and Runoff/On. *Environmental Modelling & Software*, v. 23, p. 794-812, 2008.
8. PALACIOS-VÉLEZ, O. L.; GANDOY-BERNASCONI, W.; CUEVAS-RENAUD, B. Geometric analysis of surface runoff and the computation order of unit elements in distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, v. 211, p. 266-274, 1998.
9. RAI, R. K.; UPADHYAY, A.; SINGH, V. P. Effect of variable roughness on runoff. *Journal of Hydrology*, v. 382, p. 115-127, 2010.
10. SOUSA, W. S. & SOUSA, F. de A. S. Rede neural artificial aplicada à previsão de vazão da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 2, p. 173-180, 2010.
11. STEFFEN, J. L. (1997) Simulação unidimensional do escoamento superficial em bacias hidrográficas descritas por modelo numérico de terreno. São Carlos, 1997. 185 p. Tese.
12. STEPHENSON, D. & MEADOWS, M. E. (1986) *Kinematic hydrology and modelling*. Amsterdam. Elsevier Science Publishers. 250p., 1986.
13. St-HILAIRE, A.; OUARDA, T. B. M. J.; BARGAOUI, Z.; DAIGLE, A. and BILODEAU, L. Daily river water temperature forecast model with a *k*-nearest neighbour approach. *Hydrological Process*, v. 26, p. 1302-1310, 2012.
14. TALEI, A.; CHUA, L. H. C. Influence of lag time on event-based rainfall-runoff modeling using the data driven approach. *Journal of Hydrology*, v. 438-439, p. 223-233, 2012.
15. TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. 2 ed. Porto Alegre. Ed. UFRGS. 669p., 2005.
16. WANG, L. L., D. H. CHEN, D. H., LI, Z. J., ZHAO, L.N. Coupling Green-Ampt infiltration method and two-dimensional kinematic wave theory for flood forecast in semi-arid catchment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 8, n. 4, p. 1812-2108, 2011.

Manuscrito recebido em: 23 de junho de 2013

Revisado e Aceito em: 08 de outubro de 2013