

HIDROGRAMA UNITÁRIO INSTANTÂNEO GEOMORFOLÓGICO APLICADO A BACIAS DESPROVIDAS DE DADOS HIDROLÓGICOS

Jorge Luiz STEFFEN, Aline Cristina de Souza ANDRADE, Teodorico ALVES SOBRINHO,
Paulo Tarso Sanches de OLIVEIRA, Dulce Buchala Bicca RODRIGUES

Departamento de Hidráulica e Transportes, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) – Cidade Universitária.
Caixa Postal 549. CEP 79070-900. Campo Grande, MS. Endereços eletrônicos: talves56@gmail.com;
aline_civil@yahoo.com.br; talves@ufms.br; paulotarsoms@gmail.com; dulcebbr@gmail.com

Introdução
Materiais e Métodos
Área em Estudo
Escolha do Modelo Hidrológico
Desenvolvimento do Modelo Computacional
Resultados e Discussões
Simulações
Conclusões
Referências Bibliográficas

RESUMO – Diversos locais permanecem desprovidos ou com dados escassos de precipitação impossibilitando a obtenção de dados de vazão por meio do método convencional do hidrograma unitário. Deste modo, este trabalho teve por objetivo a obtenção de hidrogramas da Bacia do Ribeirão Salobra-MS, a partir de suas características geomorfológicas. Para tanto, foi desenvolvido um modelo matemático, baseado em conceitos probabilísticos do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG), que utilizou dados provenientes de mapas topográficos. As simulações foram desenvolvidas para duas velocidades de escoamento, calculadas a partir equações distintas de tempo de concentração. Verifica-se que a velocidade de escoamento é diretamente proporcional a vazão de pico e inversamente proporcional ao tempo de base. O modelo pode ser utilizado como estimativa inicial de dados de vazão para bacias hidrográficas não monitoradas por parâmetros hidrológicos. No entanto, é importante sua validação com dados hidrológicos coletados na bacia hidrográfica em estudo.

Palavras-chave: geomorfologia, bacia hidrográfica, hidrograma unitário instantâneo geomorfológico.

ABSTRACT – *J.L. Steffen, A.C. de S. Andrade, T. Alves Sobrinho, P.T.S. de Oliveira, D.B.B. Rodrigues - Geomorphological instantaneous unit hydrograph applied to watersheds devoid of hydrologic data.* Several watersheds don't have precipitation data, it isn't allowing to obtain flow through the conventional method of hydrograph unit. Thus, this study aimed to obtain hydrograph of the Basin of Ribeirão Salobra-MS, from geomorphological features. For this, a mathematical model was developed, based on probabilistic concepts of geomorphological Instant Hydrograph Unit, which used data from topographic maps. The simulations were developed for two runoff speeds, calculated from different equations of concentration time. It appears that the flow speed is directly proportional to the peak flow and inversely proportional to the time base. The model can be used as initial estimate of flow data for watersheds not monitored by hydrological parameters. However, it is important to validate it with hydrological data collected in the basin under study.

Keywords: geomorphology, hydrographic basin, geomorphological instantaneous unitary hydrograph.

INTRODUÇÃO

O conceito do hidrograma unitário proposto inicialmente por Sherman (1932) tornou-se largamente aceito como uma notável ferramenta para a hidrologia. De acordo com Carvalho & Chaudrhy (2001), sua versatilidade encontra-se nas suposições simplificadoras de que a bacia hidrográfica comporta-se como um sistema linear e invariante no tempo, permitindo assim, a avaliação de uma resposta. O HU convencional foi substituído por Chow (1964), ao definir que a resposta da bacia seria independente da duração, se referente a uma chuva unitária instantânea conhecida em termos matemáticos como um pulso unitário instantâneo ou função delta de Dirac, assim, propôs o conceito de Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI).

Diversos modelos conceituais têm sido propostos para representar o HUI. Os modelos podem ser de analogia física ou através de simulação matemática. Uma das primeiras tentativas em descrever o HUI de uma bacia simulada foi o modelo de Nash (1957) que conceitua a bacia hidrográfica através da sucessão de reservatórios lineares. Rodriguez-Iturbe & Valdés (1979), introduziram o conceito de Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG), que por meio das razões geomorfológicas de Horton (1945) apresentam uma teoria que estabelece relação direta entre a geomorfologia da bacia e sua resposta hidrológica através de teorias da mecânica estatística.

Gupta et al. (1980) seguindo o conceito original do modelo proposto por Rodriguez-Iturbe & Valdés

(1979), realizaram algumas modificações e deduziram uma representação matemática geral para o HUIG de uma bacia em termos de sua geomorfologia. Essa metodologia vem sendo utilizada por diversos autores obtendo resultados satisfatórios (Sorman, 1995; Lee & Yen, 1997; Jain et al., 2000; Carvalho & Chaudrhy, 2001; Bhadra et al., 2008).

Kumar & Kumar (2008) utilizando o HUIG, em uma abordagem baseada em onda cinemática e parâmetros geomorfológicos, concluíram que o HUIG pode ser utilizado com boa precisão na previsão de vazão em bacias hidrográficas sem utilizar dados de chuva. Jain et al. (2000) concluíram que o HUIG tem potencial aplicação para a estimativa do HUI. Segundo

Jain & Sinha (2003), além de se obter uma boa estimativa da resposta hidrológica da bacia hidrográfica o HUIG proporciona uma compreensão de sua variabilidade espaço-temporal.

A metodologia proposta por Rodriguez-Iturbe & Valdés (1979) e adaptada por Gupta et al. (1980) possui potencial para ser utilizada em bacias sem registros de dados, especialmente no Brasil, cuja extensão territorial inviabiliza os programas convencionais de observação hidrológica (Carvalho & Chaudrhy, 2001). Deste modo, este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático para obtenção do HU em bacias hidrográficas baseados em dados geomorfológicos.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA EM ESTUDO

O estudo foi realizado tomando-se por base a bacia hidrográfica do Ribeirão Salobra, com área aproximada de 536 km², localizada à 20° 19' S de latitude e 55° 15' W de longitude. Essa bacia encontra-se inserida no Município de Terenos, região central do Estado de Mato Grosso do Sul (Figura 1).

ESCOLHA DO MODELO HIDROLÓGICO

Foram determinadas características físicas da bacia em estudo e suas relações geomorfológicas necessárias para a determinação das probabilidades de transição entre os trechos do rio e probabilidades para que uma gota inicie seu trajeto numa área à

montante de um dado trecho do rio, até que chegue a exutória do rio. Na caracterização física da bacia em estudo utilizou-se cartas topográficas folhas Campo Grande SF. 21-X-B-II (DSG, 1979) e Palmeiras SF. 21-X-B-III (DSG, 1988), ambas na escala 1:100.000, representadas por curvas de nível equidistantes 40 m, pontos cotados e hidrografia. As informações provenientes das cartas topográficas foram extraídas manualmente com os aparelhos curvímeter e planímetro.

Realizou-se as medidas de comprimento dos rios, áreas de drenagem, declividades e posteriormente procedeu-se a determinação das relações geomorfológicas de Horton (1945): razão de bifurcação, razão de comprimentos de rios, razão de áreas, conforme Tabela 1.

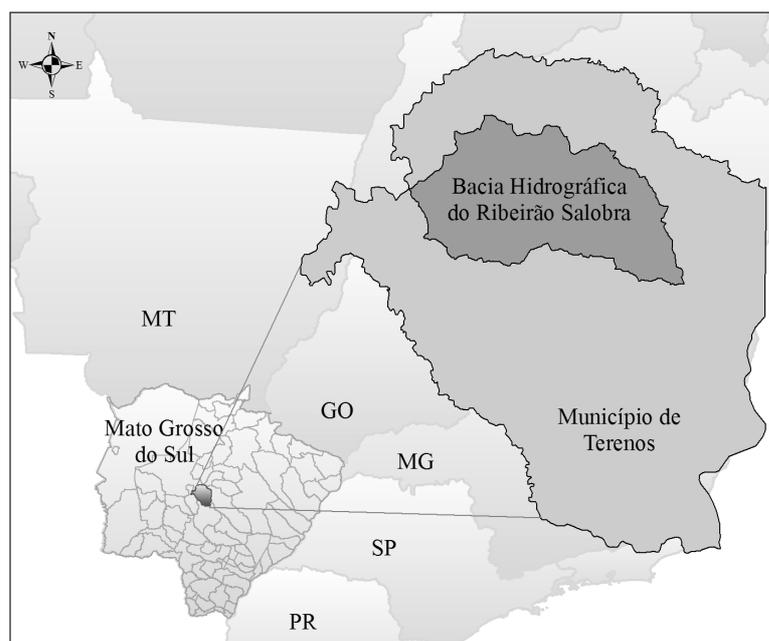


FIGURA 1. Localização da área em estudo.

TABELA 1. Relações geomorfológicas.

Parâmetro	Definições	Relação
Razão de bifurcação (R_B)	Razão do número de canais N_ω = Número de canais de ordem ω	$R_B = \frac{N_{\omega-1}}{N_\omega}$
Razão de comprimento (R_L)	Razão do comprimento dos canais L_ω = comprimento médio de todos os canais de ordem ω	$R_L = \frac{\bar{L}_\omega}{L_{\omega-1}}$
Razão de área (R_A)	Razão de área de drenagem dos canais A_ω = área média de todas as sub-bacias de ordem ω	$R_A = \frac{\bar{A}_\omega}{A_{\omega-1}}$

As probabilidades de transição dos rios foram calculadas conforme Rodriguez-Iturbe & Valdés (1979), que estabelecem as probabilidades de transição de estado em função das relações geomorfológicas de Horton (1945) R_B , R_L e R_A (Equações 1, 2, 3,4,5,6).

$$P_{1,2} = \frac{R_B^3 + 2R_B^2 - 2}{2R_B^3 - R_B} \quad (1)$$

$$P_{1,3} = \frac{R_B^3 - 2R_B^2 - R_B + 2}{4R_B^3 - 2R_B^2 - 2R_B + 1} \quad (2)$$

$$P_{1,4} = \frac{R_B^4 - R_B^2 - 3R_B^2}{4R_B^4 - 2R_B^3 - 2R_B^2 + R_B} \quad (3)$$

$$P_{2,3} = \frac{R_B^2 + 2R_B - 2}{2R_B^2 - R_B} \quad (4)$$

$$P_{2,4} = \frac{R_B^2 - 3R_B + 2}{2R_B^2 - R_B} \quad (5)$$

$$P_{3,4} = P_{4,5} = 1 \quad (6)$$

Utilizando-se as relações de Horton (1945), estabeleceram-se as probabilidades de início de processo de cada ordem (Equações 7, 8, 9 e 10).

$$\theta_1(0) = \frac{R_B^3}{R_A^3} \quad (7)$$

$$\theta_2(0) = \frac{R_B^2}{R_A^2} - \frac{R_B^2}{R_A^3} \left(\frac{R_B^3 + 2R_B^2 - 2}{R_B^2 - 1} \right) \quad (8)$$

$$\theta_3(0) = \frac{R_B}{R_A} - \frac{R_B}{R_A^2} \left(\frac{R_B^2 + 2R_B - 2}{2R_B - 1} \right) - \frac{R_B}{R_A^3} \left(\frac{R_B^5 - 2R_B^4 - R_B^3 + R_B^2}{4R_B^3 - 2R_B^2 - 2R_B + 1} \right) \quad (9)$$

$$\theta_4(0) = 1 - \frac{R_B}{R_A} - \frac{1}{R_A^2} \left(\frac{R_B^3 - 3R_B^2 + 2R_B}{2R_B - 1} \right) -$$

$$- \frac{1}{R_A^3} \left(\frac{R_B^6 - 3R_B^5 + R_B^4 + 3R_B^3 - 2R_B^2}{4R_B^3 - 2R_B^2 - 2R_B + 1} \right) \quad (10)$$

A velocidade máxima do fluxo no canal ($u_{m\acute{a}x}$) foi calculada através da razão entre o maior comprimento do canal até a exutória (L) pelo tempo de concentração (t_c), sendo considerada constante em toda a bacia (Equação 11). Segundo Carvalho & Chaudrhy (2001), essa é uma metodologia alternativa para obter-se a velocidade quando não se dispõe de dados históricos.

$$u_{m\acute{a}x} = \frac{L}{t_c} \quad (11)$$

No calculo do tempo de concentração (t_c) utilizou-se as equações de Kirpich (1940) e Dooge (1973) (Equações 12 e 13, respectivamente).

$$t_c = 3,989 \frac{L^{0,77}}{S_b^{0,385}} \quad (12)$$

em que: S_b = declividade do talvegue em m/m; L = o comprimento do talvegue em

$$t_c = 21,88 \frac{A_t^{0,41}}{S_b^{0,17}} \quad (13)$$

em que: A_t = área km²; S_b = declividade do talvegue em m/m.

O HUIG é o resultado final da função da probabilidade que uma gota inicialmente caia em uma área que drena para um trecho de um canal de uma dada ordem, da probabilidade de transição de um trecho de canal de dada ordem para outro a jusante e da distribuição do percurso da gota em trecho de certa ordem. A probabilidade inicial e a de transição são uma descrição probabilística da rede de drenagem e é a ligação entre a geomorfologia quantitativa e a hidrologia.

Para obtenção do HUIG, conforme Gupta et al. (1980), realizou-se a convolução com base nos dados obtidos, tais como as probabilidades de início de processo, probabilidade de transição de estado, comprimento dos rios, velocidade, tempo médio de permanência da gota no estado (Equação 14).

$$HUI(t) = \sum_{s \in S} f_i * \dots * f_k(t).p(s) \quad (14)$$

em que: f_i = a função densidade de probabilidade do estado inicial i ; * = operação convolução; $p(s)$ = a probabilidade de uma partícula seguir o caminho s , com $s = i, \dots, k$; S = o conjunto de todos os caminhos possíveis.

Em vista da dificuldade de determinação de f_i , há necessidade de suposição a respeito da forma dessas funções (Carvalho & Chaudrhy, 2001). Conforme o conceito proposto por Rodriguez-Iturbe & Valdés (1979), supõem-se que as funções (f_i) possuem a forma exponencial em algum parâmetro i , assim, é possível expressar a convolução de ordem k conforme Equação 15.

$$f_i * \dots * f_k(t) = \sum_{j=1}^k C_{j,k} \cdot e^{-\lambda_j t} \quad (15)$$

Sendo $C_{j,k}$ obtido de acordo com Equação 16 (Feller, 1978).

$$C_{j,k} = \frac{\lambda_1 \dots \lambda_k}{(\lambda_1 - \lambda_j) \dots (\lambda_{j-1} - \lambda_j) (\lambda_{j+1} - \lambda_j) \dots (\lambda_k - \lambda_j)} \quad (16)$$

Assim, é possível escrever a equação geral do HUIG de acordo com a Equação 13 e sua aplicação neste estudo (Equação 17).

$$HUI(t) = \sum_{s \in S} \sum_{j=1}^k C_{j,k} \cdot e^{-\lambda_j t} \cdot p(s) \quad (17)$$

$$HUI(t) = p(s_1) \sum_{j=1}^4 C_{j,4} e^{-\lambda_j t} + p(s_2) \sum_{j=1}^3 C_{j,3} e^{-\lambda_j t} + p(s_3) \sum_{j=1}^3 C_{j,3} e^{-\lambda_j t} + p(s_4) \sum_{j=1}^2 C_{j,2} e^{-\lambda_j t} + p(s_5) \sum_{j=1}^3 C_{j,3} e^{-\lambda_j t} + p(s_6) \sum_{j=1}^2 C_{j,2} e^{-\lambda_j t} + p(s_7) \sum_{j=1}^2 C_{j,2} e^{-\lambda_j t} + p(s_8) \sum_{j=1}^1 C_{j,1} e^{-\lambda_j t} \quad (18)$$

Supondo que uma gota de água passe de um estado para outro seguindo a sequência de 1 para 2, 2 para 3, 3 para 4, de acordo com o esquema assinalado na expressão (18) é possível calcular a probabilidade de uma partícula seguir o caminho s (Equação 19).

$$p(s_1) \sum_{j=1}^4 C_{j,4} e^{-\lambda_j t} = \theta_1 p_{12} p_{23} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_4 - \lambda_1)} \right] + \left[\frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} \right] + \left[\frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)} \right] + \left[\frac{e^{-\lambda_4 t}}{(\lambda_1 - \lambda_4)(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)} \right] \quad (19)$$

DESENVOLVIMENTO DO MODELO COMPUTACIONAL

Os modelos computacionais com amortecimento (Figura 2A) e sem amortecimento (Figura 2B) foram desenvolvidos de acordo com Gupta et al. (1980), utilizando-se para tanto o *software* Maple 7.

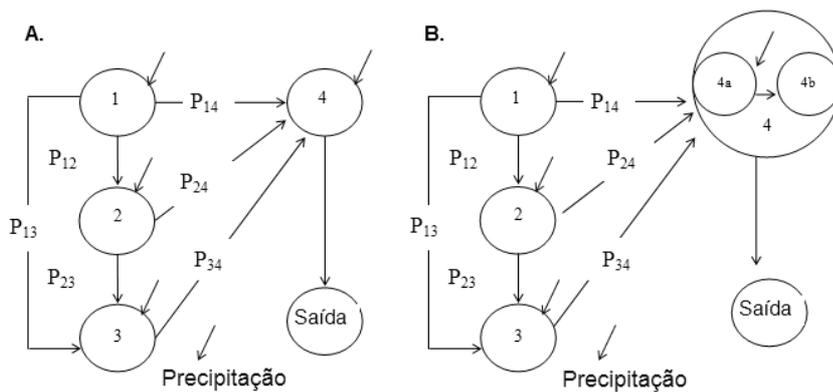


FIGURA 2. Representação de uma bacia de 4º ordem. A. Modelo com amortecimento e B. Modelo sem amortecimento.

O modelo com amortecimento se diferencia do sem amortecimento, pois, na última trajetória quando a gota de água percorre o canal de maior ordem, esse é representado artificialmente por dois reservatórios lineares em série, ocasionando um retardo pela metade do tempo de permanência no canal. Assim, é gerado um amortecimento na resposta hidrológica o que faz

com que o tempo de pico gerado se atrase para alcançar o tempo pico observado.

Após obtenção dos dados geomorfológicos foram realizadas as simulações. As primeiras simulações foram realizadas para toda a bacia de 4ª ordem com o modelo sem amortecimento e depois com amortecimento.

De acordo com Rodriguez-Iturbe & Valdés (1979), é adequado assumir um hidrograma unitário instantâneo triangular e apenas especificar o tempo de pico (t_p) e a vazão de pico (q_p). Assim, realizou-se o cálculo de t_p e q_p (Equações 20 e 21) com intuito de comparar os valores obtidos a partir das equações e do HUIG.

$$q_p = \frac{1,31}{L_\Omega} R_L^{0,43} v \quad (20)$$

$$t_p = \frac{0,44}{v} L_\Omega \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0,55} R_L^{-0,38} \quad (21)$$

em que: L_Ω = o comprimento do rio do maior ordem em quilômetros; v = a velocidade (m/s); q_p = vazão de pico (l/h); t_p = o tempo de pico em horas; R_L = a relação de comprimento de rios; R_B = a relação de bifurcação; e, R_A = a relação de comprimento de áreas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A bacia do Ribeirão Salobra é classificada segundo a metodologia de Strahler (1957) como de quarta ordem. Os parâmetros físicos de cada sub-bacia em estudo estão apresentados na Tabela 2.

O comprimento do talvegue principal é de 46,9 km e a densidade de drenagem é de 0,4143 km/km², indicando assim, área permeável e de relevo plano e suave. A densidade de drenagem varia diretamente com a extensão do escoamento superficial, concluindo-se que a bacia possui baixa suscetibilidade a enchentes, em condições normais de precipitação.

A partir das retas de ajuste feitas para a área média de cada ordem, comprimento médio de cada ordem e número de canais através do coeficiente linear da reta foi possível calcular as relações de Horton (Figura 3).

A equação de ajuste do Diagrama de Horton é expressa pela equação da reta $y = a + bx$, em que: $y = \ln(N)$, $\ln(A)$, $\ln(L)$; (N = número de canais, A = área; L = comprimento); $a = R_B$, R_A e R_L . As relações do diagrama de Horton apresentaram os seguintes coeficientes de correlação, $R_B = 0,99$, $R_A = 0,78$ e $R_L = 0,65$.

TABELA 2. Parâmetros físicos da bacia do Ribeirão Salobra.

Ordem	Nº Canais	Áreas	\bar{A}_i	Comp. Total	\bar{L}_i (km)
	N_i	ΣA_i (km ²)	(km ²)	ΣL_i (km)	(km)
1	29	385,24	13,28	185,10	6,38
2	7	56,54	8,08	24,08	3,44
3	2	60,31	30,16	22,50	11,25
4	1	33,77	33,77	11,10	11,10

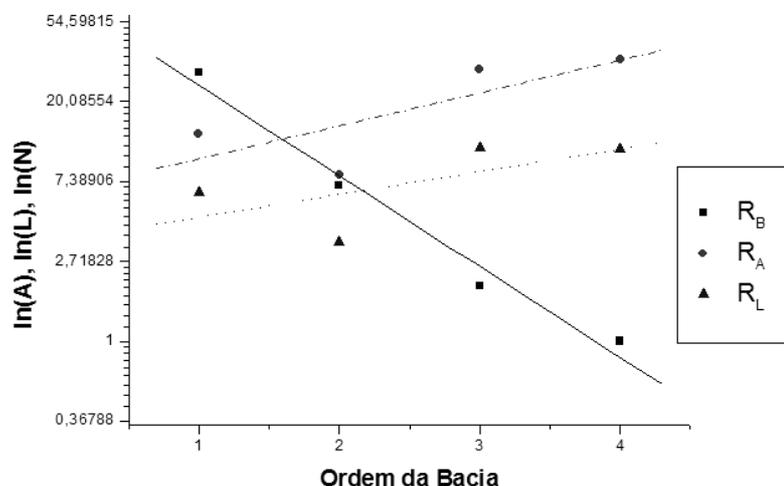


FIGURA 3. Diagrama de Horton para a Bacia de 4ª Ordem.

O valor do coeficiente de correlação de R_B apresentou um bom ajuste de curva, mas se diferencia quando comparado às equações quantitativas de Horton das razões geomorfológicas. Já os valores dos coeficientes de correlação de R_A e R_L não apresentaram um bom ajuste de curva, mas apresentaram boa aproximação quando comparados aos valores calculados pelas equações quantitativas de Horton das razões geomorfológicas (Tabela 3).

Comparando-se os resultados obtidos do ajuste linear com os calculados, nota-se que os valores de R_B encontraram-se dentro da média obtida por Strahler (1964) entre 3 e 5. Os valores de R_A ficaram baixo da média, que segundo Smart (1978) encontra-se entre 3 e 6. Já o valor de R_L , obtido pelas equações quantitativas de Horton, teve seu valor na média. O valor obtido pelo diagrama de Horton foi abaixo da média obtida por Smart (1978), entre 1,5 e 3,5.

As probabilidades de transições dos canais é outro parâmetro a ser obtido para o cálculo do HUIG e pode ser calculado conforme Rodriguez-Iturbe & Valdés (1979), que utilizam as razões geomorfológicas de Horton (R_L , R_B e R_A). Outra maneira é aplicando a forma direta, na qual, cada probabilidade de estado depende do número de canais de ordem i que drenam nos canais de ordem j pelo número total dos trechos de ordem i do canal.

A comparação entre os valores calculados pela formulação e obtidos pela forma direta encontra-se apresentado na Tabela 4. Nota-se que os valores calculados apresentam semelhança a partir da probabilidade $P_{1,4}$.

Semelhante ao processo das probabilidades de transições de estado realizou-se as probabilidades de início de processo, por meio do cálculo da formulação e de forma direta. No entanto, para a bacia de 4ª ordem não foi possível calcular pela formulação, pois R_B é maior que R_A , assim, a probabilidade seria superior a 1 (100%), o que não é verdade. Assim, calculou-se as probabilidades de início do processo apenas de forma direta (Tabela 5).

Os resultados das velocidades obtidas a partir dos tempos de concentração, utilizando as equações de Kirpich (1940) e Dooge (1973), foram respectivamente de 1,32 m/s e 1,10 m/s.

Carvalho & Chaudrhy (2001) realizaram comparações utilizando dados coletados em campo e as mesmas equações aplicadas neste estudo na obtenção da velocidade, obtendo resultados satisfatórios. No entanto, é importante salientar que a velocidade calculada por meio da Equação 11 mantém-se constante na bacia, o que não acontece na realidade. Esse critério de adoção da velocidade apresenta-se eficaz na previsão de vazões máximas, pois a velocidade é superestimada.

TABELA 3. Razões geomorfológicas de Horton.

	Razão de Bifurcação R_B	Razão de área R_A	Razão de Comprimento R_L
Ajuste linear	4,34	1,87	1,27
Equações de Horton	3,21	1,82	1,60

TABELA 4. Probabilidade de transição dos canais ($P_{i,j}$).

Probabilidade de transição	Formulação	Direto
$P_{1,2}$	0,821138	0,6897
$P_{1,3}$	0,105931	0,2069
$P_{1,4}$	0,072931	0,1034
$P_{2,3}$	0,8463	0,8571
$P_{2,4}$	0,1537	0,1429
$P_{3,4}$	1	1

TABELA 5. Probabilidade de Início de Processo θ_i (4ª ordem).

Probabilidade de início de processo	Formulação	Direto
θ_1	-	0,718919
θ_2	-	0,105513
θ_3	-	0,112548
θ_4	-	0,06302

SIMULAÇÕES

A primeira simulação foi realizada com base no modelo geomorfológico de Gupta et al. (1980), sem amortecimento, que não gerou um hidrograma com

valor nulo na origem conforme a Figura 4A. Deste modo, realizou-se outro programa para o modelo geomorfológico de Gupta et al. (1980), com amortecimento, que é mais adequado para bacias maiores,

pois divide o último estado em dois fazendo que o modelo absorva as ordens superiores da bacia, propiciando um amortecimento na resposta hidrológica. Os hidrogramas analisados foram elaborados com base no modelo com amortecimento Figura 4B.

De acordo com Rodriguez-Iturbe & Valdés (1979), a formulação utilizada para encontrar a vazão de pico e o tempo de pico, no cálculo do hidrograma triangular, é adequada para o cálculo de o hidrograma unitário instantâneo triangular, com base nos parâmetros geomorfológicos da bacia. Na Tabela 6 é apresentada a comparação da vazão de pico e do tempo de pico

entre e os valores máximos do HUIG da bacia Ribeirão Salobra. Nota-se boa relação entre os valores obtidos a partir da formulação e do gráfico.

As simulações foram desenvolvidas para as duas velocidades calculadas e observou-se que quanto maior a velocidade, maior a vazão de pico e menor o tempo de base, ou seja, q_p depende diretamente da velocidade e t_p inversamente da mesma (Tabela 6). Os resultados apresentados são compatíveis, no entanto, é importante a comparação do modelo aplicado com dados coletados em campo, com intuito de validar o modelo para a bacia em estudo.

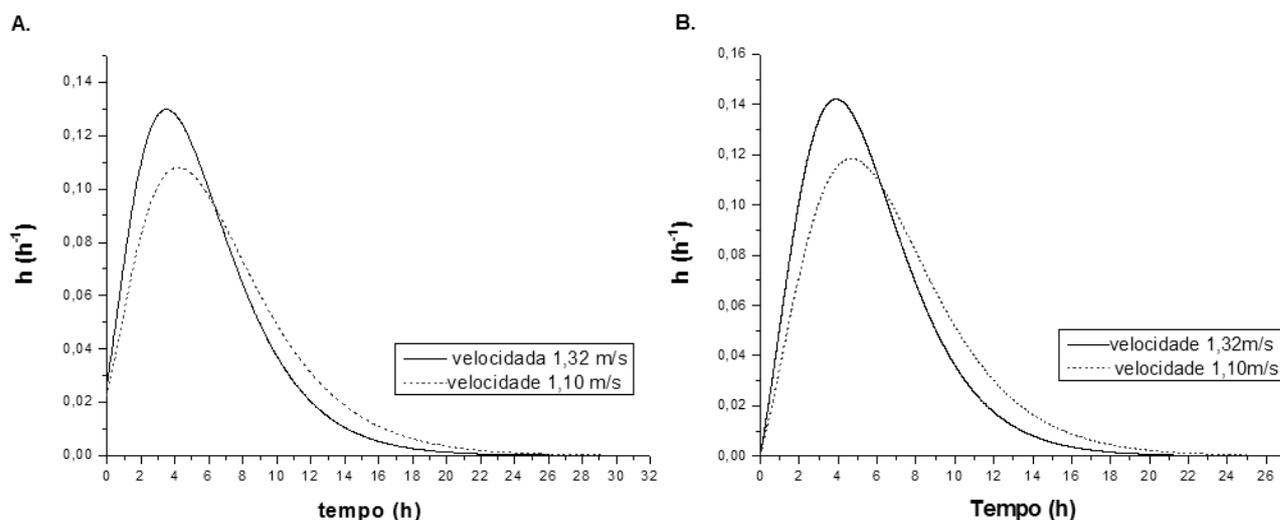


FIGURA 4. Hidrograma Bacia 4ª. Ordem: sem amortecimento (A), com amortecimento (B).

TABELA 6. Comparação entre a formulação e o valor do hidrograma.

Características	Formulação		Gráfico	
Velocidade v (m/s)	1,32	1,10	1,32	1,10
Vazão de pico q_p (h^{-1})	0,1907	0,1589	0,1422	0,1185
Tempo de pico t_p (h)	4,22	5,07	3,91	4,65

CONCLUSÕES

O modelo utilizado proporciona a obtenção de dados de vazão em bacias hidrográficas desprovida de séries de dados hidrológicos, podendo assim, ser utilizado como estimativa inicial desses dados para bacias hidrográficas.

O modelo desenvolvido dispõe de recursos computacionais reduzidos e é de simples aplicação, utilizando-se de parâmetros geomorfológicos da bacia hidrográ-

fica de fácil aquisição. É considerada uma ferramenta de baixo custo e capaz de obter resultados satisfatórios.

Para as duas velocidades de escoamento, calculadas a partir equações distintas de tempos de concentração, as simulações evidenciaram que a velocidade de escoamento é diretamente proporcional a vazão de pico e inversamente proporcional ao tempo de base.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BHADRA, A.; PANIGRAHY, N.; SINGH, R.; RAGHUWANSHI, N.S.; MAL, B.C.; TRIPATHI, M.P. Development of a geomorphological instantaneous unit hydrograph model for scantily gauged watersheds. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, n. 8, p. 1013-1025, 2008.
2. CARVALHO, M.A. & CHAUDRHY, F.H. Aplicação de hidrograma unitário geomorfológico na previsão de respostas hidrológicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 4, p. 5-17, 2001.
3. CHOW, V.T. **Handbook of Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1418 p., 1964.
4. DOOGE, J.C.I. **The linear theory of hydrologic systems**. Technical Bulletin. U.S. Department of Agriculture, Washington: US. Gov. Print, n. 1468, 327 p., 1973.
5. DSG – DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO BRASILEIRO. **Carta Campo Grande**. Folha SF. 21-X-B-II. Escala 1:100.000. Ministério do Exército. Região Centro-Oeste do Brasil. Carta, 1 p., 1979.
6. DSG – DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO BRASILEIRO. **Carta Palmeiras**. Folha SF. 21. X. B. III. Escala 1:100.000. Ministério do Exército. Região Centro-Oeste do Brasil. Carta, 1 p., 1988.
7. FELLER, W. **An Introduction to Probability Theory and Its Applications**. New York: John Wiley, v. 2, 704 p., 1978.
8. GUPTA, V.K.; WAYMIRE, E.; WANG, C.T. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. **Water Resource Research**, v. 16, n. 5, p. 855-62, 1980.
9. HORTON, R.E. Erosional development of stream and their drainage basin: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin Geological Society of America**, v. 56, p. 275-370, 1945.
10. JAIN, V. & SINHA, R. Derivation of Unit Hydrograph from GIUH Analysis for a Himalayan River. **Water Resources Management**, v. 17, n. 5, p. 355-376, 2003.
11. JAIN, S.K.; SINGH, R.D.; SETH, S.M. Design Flood Estimation Using GIS Supported GIUH Approach. **Water Resources Management**, v. 14, n. 5, p. 369-376, 2000.
12. KIRPICH, Z.P. Time of concentration of small agricultural watersheds. **Civil Engineering**, v. 10, n. 6, p. 362, 1940.
13. KUMAR, A. & KUMAR, D. Predicting Direct Runoff from Hilly Watershed Using Geomorphology and Stream-Order-Law Ratios: Case Study. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 7, p. 570-576, 2008.
14. LEE, K.T. & YEN, B.C. Geomorphology and kinematic-wave based hydrograph derivation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 123, n. 1, p. 73-80, 1997.
15. NASH, J.E. The form of instantaneous unit hydrograph. **International Association of Hydrological Sciences**, v. 45, n. 3, p. 114-121, 1957.
16. RODRIGUEZ-ITURBE, I. & VALDÉS, J.B. The geomorphologic structure of hydrologic response. **Water Resource Research**, v. 15, n. 6, p. 1409-1420, 1979.
17. SHERMAN, L.K. Streamflow from rainfall by unit-graph method. **Engineering News-Record**, v. 108, p. 501-505, 1932.
18. SMART, J.S. The analysis of drainage network composition. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 3, p. 129-171, 1978.
19. SORMAN, A.U. Estimation of Peak Discharge Using GIUH Model in Saudi Arabia. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 121, n. 4, p. 287-293, 1995.
20. STRAHLER, A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transaction of American Geophysical Union**, p. 913-920, 1957.
21. STRAHLER, A.N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: CHOW, V.T. (Org.), **Handbook of Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, p. 4-76, 1964.

*Manuscrito Recebido em: 20 de agosto de 2009
Revisado e Aceito em: 30 de novembro de 2009*