



Modelagem hidrológica em microbacia hidrográfica Parte II: Teste do modelo HidroBacia¹

Sidney S. Zanetti², Vicente de P. S. de Oliveira³, Elias F. Sousa⁴, Frederico T. de Almeida⁴, Márcio T. Sugawara⁴ & José M. A. da Silva⁵

RESUMO

Este trabalho consistiu na modelagem hidrológica de uma microbacia hidrográfica utilizando-se o modelo HidroBacia, no qual o processo de infiltração da água no solo é representado por meio da equação de Green-Ampt modificada por Mein e Larson. Obtiveram-se, dentre os parâmetros desta equação, o potencial matricial na frente de umedecimento, a condutividade hidráulica e a umidade do solo na zona de transmissão, através de diversos métodos apresentados na literatura; desta forma, foram preparadas e testadas 36 combinações de dados de entrada, visando identificar as que apresentam melhor desempenho nas simulações do hidrograma de escoamento superficial com o modelo e se selecionaram, dentre os eventos de chuva-vazão registrados na microbacia, os 14 mais relevantes para realização das simulações. Das 36 combinações de dados de entrada testadas, seis apresentaram melhor desempenho na estimação dos hidrogramas. O modelo HidroBacia ainda necessita de aprimoramentos, juntamente com análises de sensibilidade, com vista a identificar possíveis incompatibilidades entre os dados de entrada e os respectivos resultados das simulações, uma vez que o modelo apresentou resultados incoerentes em determinadas situações.

Palavras-chave: simulação hidrológica, infiltração, escoamento superficial, hidrologia, hidrogramas

Hydrologic modeling of a small watershed Part II: HidroBacia model test

ABSTRACT

This work consisted of the hydrologic modeling of a small watershed using the HidroBacia model. The soil water infiltration process is represented by means of the Green-Ampt equation, modified by Mein and Larson, in this model. Among the equation parameters, matric potential in the wetting front, hydraulic conductivity and soil moisture in the "field saturation" were obtained using different methods based on previous scientific literature. Thirty six input data combinations were tested in order to identify those that showed better performance on the runoff hydrograph simulations with the model. Between the rainfall-runoff events registered on watershed, the most relevant (14) of them were selected to perform the simulations. Six of 36 input data combinations tested showed better performance in the hydrograph estimations. The HidroBacia model still needs more improvements, as well as sensitivity analysis in order to identify incompatibilities between input data and the simulation results, since the model showed incoherent results under certain situations.

Key words: hydrologic simulation, infiltration, surface runoff, hydrology, hydrograph

¹ Parte da tese de doutorado do primeiro autor, apresentada à Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF

² IDAF-ES. Rua Dom Fernando, n. 39, 2. andar, Bairro Independência, CEP 29306-350, Cachoeiro de Itapemirim, ES. Fone (28) 3517-3190. E-mail: ssz@bol.com.br

³ DEA/UFV. Viçosa, MG. CEP 36570-000 Viçosa, MG. Fone (31) 3899-1912. E-mail: jmarcio@gprh.ufv.br

⁴ LEAG/UENF. CEP 28.013-602, Campos dos Goytacazes, RJ. Fone (22) 2726-1543. E-mail: efs@uenf.br; fredterr@uenf.br

⁵ NPGA/CEFET. CEP 28030-130 Campos dos Goytacazes, RJ. Fone (22) 2726-2800. E-mail: vsantos@cefetcampos.br

INTRODUÇÃO

O HidroBacia (Silva, 2002) é um modelo hidrológico com parâmetros distribuídos, que possibilita a realização do balanço hídrico e a obtenção do hidrograma de escoamento superficial, da vazão máxima e do volume escoado para qualquer posição de uma bacia hidrográfica, tendo em vista os processos de precipitação, evapotranspiração, interceptação pela cobertura vegetal, armazenamento superficial, infiltração da água no solo e escoamento superficial.

Neste modelo, a taxa de produção de vazão é obtida pela diferença entre a intensidade de precipitação e a taxa de infiltração da água no solo, esta última calculada por meio da equação de Green-Ampt modificada por Mein e Larson (Mein & Larson, 1973) – GAML.

Para estimar a taxa de infiltração usando-se o modelo de GAML, é necessário dispor dos valores de potencial matricial do solo na frente de umedecimento (ψ_f), condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) e umidade do solo saturado (θ_s), porém a determinação desses parâmetros é de difícil obtenção, podendo não fornecer valores confiáveis; portanto, sua utilização nos modelos pode não refletir a realidade física do processo de infiltração, levando a resultados duvidosos (Brandão et al., 2006).

Na concepção dos modelos de Green-Ampt e GAML, durante o processo da infiltração da água no solo presume-se que a região acima da frente de umedecimento se encontra saturada; entretanto, devido à possibilidade de ocorrência do fenômeno de aprisionamento de ar nos poros do solo, a umidade de saturação pode não ser atingida e, sendo assim, a máxima umidade atingida pelo solo nesta região seria a umidade da zona de transmissão (θ_w), menor que θ_s (Cecílio, 2005). Pelo mesmo motivo, a condutividade hidráulica utilizada não deve ser K_s , mas, sim, a condutividade hidráulica relativa à umidade da zona de transmissão – K_w (Wilson & Oduro, 2004).

Em virtude da desuniformidade da umidade do solo no início do processo de infiltração e à variação de suas propriedades físicas ao longo do perfil, a frente de umedecimento não é abrupta nem bem definida, como pressuposto no desenvolvimento dos modelos de Green-Ampt e GAML; a frente de umedecimento é, na verdade, difusa e se torna cada vez mais difusa a medida em que penetra no solo (Wang & Benson, 1995). Segundo Rodrigues (1999), o parâmetro ψ_f é o mais difícil de ser determinado com precisão.

Desta forma, diversos pesquisadores desenvolveram estudos visando adequar os parâmetros de entrada dos modelos de Green-Ampt e GAML, substituindo θ_s por θ_w , K_s por K_w e propondo alternativas para o cálculo de θ_w , K_w e ψ_f (Mein & Larson, 1973; Rawls & Brakensiek, 1983; Wang & Benson, 1995; Silva & Kato, 1998; Cecílio, 2002; Mello, 2003; Cecílio et al., 2003; Ataíde, 2005; Cecílio, 2005).

Diante dos diversos métodos existentes para a estimação dos parâmetros K_w , θ_w e ψ_f , pertinentes aos modelos de Green-Ampt e GAML, Brandão et al. (2006) afirmam que ainda não existe consenso sobre quais métodos de estimação apresentam melhores resultados para a determinação da infiltração, principalmente quando se trata de solos formados em regiões de clima tropical, como é o caso do Brasil.

Com este enfoque, diversos estudos foram desenvolvidos com o propósito de identificar quais as combinações entre métodos de estimativa dos parâmetros de entrada desses modelos, produzem os melhores resultados na estimação da infiltração (Silva & Kato, 1998; Silva, 2002; Cecílio et al., 2003; Mello, 2003; Cecílio, 2005).

O modelo HidroBacia, apesar de todo o seu potencial, foi desenvolvido e testado com dados de uma microbacia hidrográfica com apenas 3,99 ha e cobertura vegetal homogênea (pastagem), sendo considerados uniformes os parâmetros de entrada; além disto, o período de monitoramento da microbacia foi muito reduzido, analisando-se apenas quatro hidrogramas. Em razão dessas limitações, Silva (2002) sugere a continuidade dos estudos envolvendo o HidroBacia utilizando-se, também, outras bacias hidrográficas e, neles, recomenda a ampliação da coleta de dados amostrais na bacia, de forma que se possa considerar a variabilidade espacial dos parâmetros de entrada do modelo.

Desta maneira se desenvolveu o presente trabalho, com o objetivo de testar não só o modelo hidrológico HidroBacia mas, também, o desempenho de diferentes formas de obtenção dos parâmetros da equação de GAML em simulações com o mesmo, visando identificar as opções que proporcionam as melhores estimativas da infiltração da água no solo e, conseqüentemente, do hidrograma de escoamento superficial em uma microbacia hidrográfica experimental, considerando-se a variabilidade espacial dos parâmetros de entrada do modelo.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho consistiu na modelagem hidrológica de uma microbacia hidrográfica utilizando-se o modelo HidroBacia (versão 1.1). A aplicação do modelo foi viabilizada pela montagem de uma estrutura de coleta de dados em uma microbacia hidrográfica experimental, com área de 88,5 hectares, localizada na bacia do rio Paraíba do Sul, município de Varre-Sai, noroeste do Estado do Rio de Janeiro, entre as coordenadas UTM (SAD 69, fuso 24K) mín. E: 198.185 e máx. E: 199.400 m, e mín. N: 7.681.600 e máx. N: 7.682.620 m, e altitude mín. de 673 m e máx. de 960 m.

A microbacia possui cobertura vegetal composta de áreas com mata atlântica, eucalipto, pastagem, cafeicultura, culturas anuais (milho) e vegetação espontânea, além de várias nascentes que formam e mantêm um pequeno curso d'água perene. Na Figura 1 se encontram os tipos e a distribuição espacial da cobertura vegetal na bacia hidrográfica experimental.

Os eventos de chuva-vazão foram monitorados no período de janeiro de 2005 a maio de 2006. As chuvas foram registradas usando-se três conjuntos de pluviógrafo (Davis, EUA) mais “data logger” e uma estação meteorológica automática (Adolf Thies GmbH Co., Alemanha), distribuídos na microbacia. Para medir e registrar as vazões, se construiu, no exutório da mesma, um vertedor triangular de concreto, e se instalou um equipamento medidor de nível d'água, denominado Thalimendes (Ott, Alemanha); todos os dados de chuva-vazão foram registrados em intervalos de seis minutos.

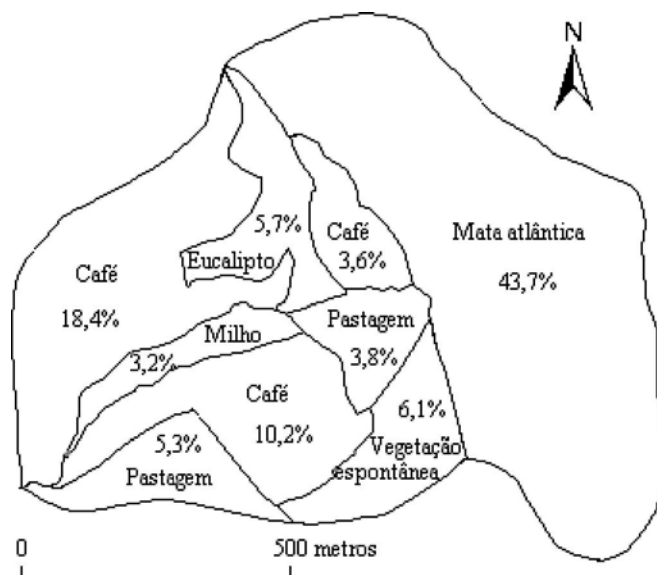


Figura 1. Tipos e porcentagens de cobertura vegetal da microbacia hidrográfica experimental, Varre-Sai, RJ

A partir dos hidrogramas medidos no vertedor efetuou-se, para cada evento, a separação entre hidrograma de escoamento superficial e hidrograma referente ao fluxo subterrâneo; para tanto, utilizou-se o método de Barnes, apresentado por Custódio & Llamas (1983); somente os hidrogramas de escoamento superficial foram analisados no presente trabalho.

Fez-se o levantamento dos dados de entrada referentes às características físicas do solo em 25 pontos distribuídos na área da microbacia hidrográfica, conforme demonstrado na Figura 2; tais dados foram inseridos no modelo, na forma de imagens temáticas, considerando-se a sua distribuição espacial, por meio da discretização da microbacia em unidades de simulação (células) quadradas, com cinco metros de lado, dispostas em linhas e colunas.

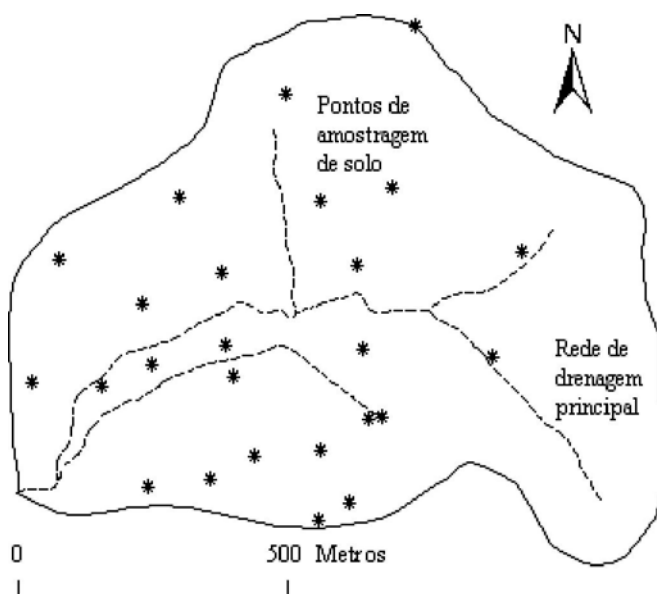


Figura 2. Pontos de amostragem de solo e rede de drenagem da microbacia hidrográfica experimental, Varre-Sai, RJ

O modelo necessitou, ainda, das imagens relativas ao modelo digital de elevação do terreno, às direções de escoamento e à rede de drenagem numérica. Para obtenção das imagens, realizou-se, também, o levantamento topográfico da microbacia, cujos dados foram processados através de ferramentas computacionais baseadas em sistemas de informações geográficas.

Na estimação da taxa de infiltração de água no solo (T_i , mm h^{-1}), os parâmetros K_s e θ_s da equação de GAML foram substituídos por K_w e θ_w , resultando na seguinte equação:

$$T_i = K_w \left[1 + \psi_f \frac{(\theta_w - \theta_i)}{I} \right] \quad (1)$$

em que:

- K_w - condutividade hidráulica do solo na zona de transmissão, mm h^{-1}
- ψ_f - potencial matricial do solo na frente de umedecimento, mm
- θ_w - umidade do solo na zona de transmissão, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
- θ_i - umidade do solo no início do processo de infiltração, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
- I - infiltração acumulada, mm

Obtiveram-se os valores de ψ_f , K_w e θ_w utilizando-se diversos métodos apresentados na literatura, por meio dos quais se testaram várias combinações de forma de obtenção desses parâmetros, a fim de identificar as que melhor representam o processo de infiltração e, conseqüentemente, melhor desempenho nas simulações com o modelo HidroBacia.

Foram considerados, nas simulações, três métodos distintos para calcular o potencial matricial na frente de umedecimento:

1. ψ_f calculado pela equação proposta por Mein & Larson (1973)
2. ψ_f calculado pela equação proposta por Rawls & Brakensiek (1983)
3. ψ_f calculado pela equação proposta por Cecílio (2005)

Consideraram-se, ainda, nas simulações, três diferentes valores de condutividade hidráulica do solo na zona de transmissão:

1. $K_w = K_s$, obtido a partir do permeâmetro de carga constante
2. $K_w = \text{Taxa de infiltração estável } (T_{ie})$
3. $K_w = 0,50 T_{ie}$

A T_{ie} foi determinada em nove locais distribuídos na microbacia experimental, usando-se o método do infiltrômetro de anel (Brandão et al., 2006).

Foram consideradas, também, quatro condições distintas de umidade do solo na zona de transmissão:

1. $\theta_w = \theta_s$
2. $\theta_w = 0,90 \theta_s$
3. $\theta_w = 0,85 \theta_s$
4. $\theta_w = 0,80 \theta_s$

Com base nessas opções de dados de entrada para o modelo de GAML, obtém-se 36 combinações de parâmetros de entrada para a realização das simulações.

Durante o período de monitoramento da microbacia 131 eventos de chuva-vazão foram registrados e, entre eles, selecionados os 14 maiores para realização das simulações com o modelo HidroBacia (Tabela 1). As 36 combinações propostas foram testadas para cada evento, totalizando 504 simulações.

Tabela 1. Precipitações selecionadas para simulação com o modelo HidroBacia, com suas respectivas lâminas e vazão máxima de escoamento superficial registradas na microbacia

Data	Duração (min)	Lâmina (mm)	i_i máxima (mm h ⁻¹)	LES (mm)	$Q_{\text{máx}}$ (L s ⁻¹)
21/04/2005	72	16,3	63,0	0,8	41,2
25/05/2005	102	34,3	101,6	0,1	368,9
02/12/2005	252	45,6	81,0	0,5	83,1
18/01/2006	42	18,5	85,3	0,7	34,8
31/01/2006	30	16,8	64,5	0,1	65,0
10/02/2006	258	54,4	83,0	0,1	127,9
14/02/2006	90	28,1	60,2	0,7	177,0
26/02/2006	132	41,6	62,5	0,5	185,5
05/03/2006	48	30,1	57,9	0,9	194,1
06/03/2006	258	39,4	57,9	0,6	241,7
15/03/2006	180	39,5	67,8	1,5	553,0
17/03/2006	30	12,7	56,4	1,2	177,2
20/03/2006	72	32,0	80,0	0,3	406,8
03/05/2006	48	12,3	54,1	0,9	47,1

i_i - intensidade de precipitação; LES - lâmina de escoamento superficial; $Q_{\text{máx}}$ - vazão máxima de escoamento superficial

Com o objetivo de simplificar a referência a cada combinação, estas serão mencionadas oportunamente usando-se, como nomenclatura, três números entre parênteses separados por um traço (x-y-z), em que x se refere à opção ψ_f , y à opção K_w e z diz respeito à opção θ_w , respectivamente, na ordem em que foram citadas.

Avaliaram-se os resultados comparando-se os hidrogramas de escoamento superficial observados na microbacia hidrográfica com os respectivos hidrogramas simulados pelo modelo HidroBacia usando-se como referência as vazões máximas e as lâminas escoadas para todos os eventos de precipitação simulados e para todas as combinações de dados de entrada propostas.

Foram calculados, para avaliação dos resultados, alguns dos indicadores estatísticos atualmente mais utilizados para avaliação do desempenho de modelos hidrológicos e hidroclimáticos, uma vez que não se conhece um método único que possa ser utilizado como padrão.

O índice de confiança (c), apresentado por Camargo & Sentelhas (1997), é um valor adimensional, variando entre 0 e 1, sendo que o completo ajustamento é representado pelo valor 1 e o valor 0 indica o oposto. Tal índice permite analisar conjuntamente a precisão e a exatidão dos resultados, sendo o produto do coeficiente de correlação (r) pelo índice de concordância (d), proposto por Willmott (1981).

O coeficiente de confiança (E), apresentado por Nash & Sutcliffe (1970), pode variar entre -∞ e 1, em que os maiores valores indicam melhor ajuste entre os dados.

Segundo Legates & McCabe Jr. (1999), o uso do quadrado das diferenças no cálculo dos índices d e E faz com os mesmos resultem em valores relativamente altos, mesmo quando os modelos não apresentam boa performance; assim, adotou-se a sugestão dos autores, que consiste em se utilizar o índice de concordância (d') e o coeficiente de eficiência (E'), ambos modificados, conforme consta nas seguintes equações:

$$d' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |E_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n |E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|} \quad (2)$$

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |E_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|} \quad (3)$$

em que:

n - número de observações

E_i - valor estimado pelo modelo

O_i - valor observado experimentalmente

\bar{O} - média dos valores observados experimentalmente

A partir dos índices d' foram calculados índices de confiança modificados (c'), mais rigorosos que o índice c, por meio do produto de d' pelo respectivo coeficiente de correlação.

Adicionalmente, foram analisados a raiz do erro quadrado médio (REQM) e o coeficiente de determinação (r^2) referente ao ajuste de regressões linear simples ($Y = a_0 + b_1X$); neste caso se optou, também, por analisar a significância da relação retilínea entre os dados observados e os estimados, em nível de 5% de probabilidade, tendo como hipóteses $H_0: b_1 = 0$ e $H_a: b_1 \neq 0$.

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentam-se, na Tabela 2, os indicadores estatísticos do ajuste entre as lâminas de escoamento superficial (LES) observadas e estimadas pelo HidroBacia, para os 14 eventos de precipitação simulados, referentes às 36 combinações de dados de entrada; ressalta-se que cada indicador calculado é resultado de 14 simulações efetuadas com o modelo.

Conforme a Tabela 2, dentre as combinações testadas apenas seis apresentaram teste F significativo em nível de 5% de probabilidade, ou seja, indicaram correlação retilínea significativa entre os dados observados e os estimados. Essas mesmas combinações proporcionaram ainda, no conjunto, os melhores valores de d' (entre 0,50 e 0,54), c' (entre 0,31 e 0,39), E' (entre -0,04 e 0,12), REQM (entre 0,3 e 0,4 mm) e r^2 (entre 0,3776 e 0,5263). As seis combinações mencionadas, consideradas com melhor desempenho, estão destacadas na Tabela 2.

De acordo com os indicadores estatísticos calculados, os melhores desempenhos na estimação da lâmina de escoamen-

Tabela 2. Indicadores do ajuste entre lâminas de escoamento superficial observadas e estimadas pelo HidroBacia, para os 14 eventos de chuva-vazão simulados

Combinação	d'	c'	E'	REQM(mm)	r ²
(1-1-1)	0,11	0,02	-5,01	2,7	0,0496 ns
(1-1-2)	0,12	0,03	-5,40	2,9	0,0635 ns
(1-1-3)	0,13	0,04	-5,66	3,1	0,0792 ns
(1-1-4)	0,13	0,04	-6,09	3,3	0,0799 ns
(1-2-1)	0,34	0,05	-0,74	0,8	0,0255 ns
(1-2-2)	0,34	0,10	-0,72	0,8	0,0879 ns
(1-2-3)	0,38	0,15	-0,68	0,8	0,1639 ns
(1-2-4)	0,37	0,14	-0,73	0,8	0,1550 ns
(1-3-1)	0,09	0,02	-5,50	2,8	0,0454 ns
(1-3-2)	0,12	0,03	-5,73	2,9	0,0678 ns
(1-3-3)	0,12	0,04	-6,14	3,0	0,1119 ns
(1-3-4)	0,12	0,04	-6,35	3,1	0,1152 ns
(2-1-1)	0,34	0,05	-0,74	0,8	0,0232 ns
(2-1-2)	0,32	0,10	-1,05	1,0	0,0974 ns
(2-1-3)	0,33	0,13	-1,29	1,2	0,1579 ns
(2-1-4)	0,29	0,12	-1,69	1,4	0,1588 ns
(2-2-1)	0,45	0,09	-0,07	0,5	0,0433 ns
(2-2-2)	0,47	0,24	0,04	0,4	0,2565 ns
(2-2-3)	0,54	0,39	0,12	0,3	0,5263*
(2-2-4)	0,54	0,39	0,12	0,3	0,5263*
(2-3-1)	0,44	0,09	-0,08	0,5	0,0419 ns
(2-3-2)	0,47	0,23	0,02	0,4	0,2447 ns
(2-3-3)	0,52	0,36	0,06	0,4	0,4707*
(2-3-4)	0,51	0,34	0,00	0,4	0,4363*
(3-1-1)	0,11	0,03	-4,87	2,6	0,0502 ns
(3-1-2)	0,19	0,05	-2,63	1,7	0,0676 ns
(3-1-3)	0,31	0,11	-1,37	1,2	0,1185 ns
(3-1-4)	0,43	0,19	-0,43	0,7	0,2011 ns
(3-2-1)	0,34	0,05	-0,72	0,8	0,0257 ns
(3-2-2)	0,40	0,16	-0,29	0,6	0,1478 ns
(3-2-3)	0,50	0,31	-0,04	0,4	0,3776*
(3-2-4)	0,53	0,37	0,09	0,4	0,4895*
(3-3-1)	0,09	0,02	-5,40	2,8	0,0460 ns
(3-3-2)	0,14	0,05	-3,55	2,0	0,1041 ns
(3-3-3)	0,25	0,10	-2,16	1,4	0,1763 ns
(3-3-4)	0,32	0,15	-1,18	0,9	0,2172 ns

to superficial foram obtidos usando-se ψ_f estimado pela opção 2 (Rawls & Brakensiek, 1983) e 3 (Cecílio 2005). A opção 2 somente apresentou melhor desempenho quando associada a $K_w = T_{ie}$ ou $K_w = 0,50 T_{ie}$, e $\theta_w = 0,85 \theta_s$ ou $\theta_w = 0,80 \theta_s$, enquanto a opção 3 mostrou melhor desempenho quando associada a $K_w = T_{ie}$ e $\theta_w = 0,85 \theta_s$ ou $\theta_w = 0,80 \theta_s$.

Tem-se, na Tabela 3, os indicadores estatísticos do ajuste entre vazões máximas de escoamento superficial ($Q_{m\acute{a}x}$) observadas e estimadas pelo HidroBacia, para os 14 eventos de precipitação simulados, referentes às 36 combinações de dados de entrada propostas.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, dentre as combinações testadas 24 apresentaram teste F significativo em nível de 5% de probabilidade porém, no geral, as oito combinações que estão destacadas foram as que apresentaram os melhores valores de d' (entre 0,32 e 0,40), c' (entre 0,19 e 0,25), E' (entre -0,05 e 0,05), REQM (entre 130 e 141 L s⁻¹) e r² (entre 0,2899 e 0,3820).

Dentre essas oito, as combinações (2-2-3), (2-2-4), (2-3-3), (2-3-4), (3-2-3) e (3-2-4) coincidiram com aquelas que apresentaram melhor desempenho na estimação da LES; portanto, essas seis combinações são as que realmente proporcionaram melhor desempenho, haja vista que o ajuste apresentado foi melhor tanto para a LES quanto para a $Q_{m\acute{a}x}$.

Os 14 eventos simulados com as seis melhores combinações de dados de entrada, resultaram em 84 hidrogramas. Com tantos hidrogramas, apenas dois eventos foram selecionados para sua apresentação. Na Figura 3 são apresentados os hidrogramas observados nos dias 25/05/2005 e 10/02/2006, e os hidrogramas simulados usando-se as seis melhores combinações de dados de entrada.

Ressalta-se que os valores de interceptação pela cobertura vegetal, armazenamento superficial e coeficiente de rugosidade do terreno utilizados no presente trabalho, não foram medidos na microbacia, mas foram obtidos a partir do banco de dados incluído no programa HidroBacia; portanto, é pro-

Tabela 3. Indicadores do ajuste entre vazões máximas observadas e estimadas pelo HidroBacia, para os 14 eventos de chuva-vazão simulados

Combinação	d'	c'	E'	REQM(L s ⁻¹)	r ²
(1-1-1)	0,12	0,07	-6,10	1179,6	0,2758 ns
(1-1-2)	0,12	0,07	-6,61	1261,8	0,2910 *
(1-1-3)	0,12	0,06	-6,93	1302,6	0,2947 *
(1-1-4)	0,11	0,06	-7,32	1352,0	0,3005 *
(1-2-1)	0,34	0,15	-0,64	240,8	0,2039 ns
(1-2-2)	0,35	0,17	-0,58	244,6	0,2483 ns
(1-2-3)	0,35	0,17	-0,62	251,9	0,2450 ns
(1-2-4)	0,34	0,17	-0,67	260,2	0,2405 ns
(1-3-1)	0,12	0,06	-6,37	1168,7	0,2931 *
(1-3-2)	0,11	0,06	-6,93	1238,1	0,3097 *
(1-3-3)	0,11	0,06	-7,51	1291,8	0,3196 *
(1-3-4)	0,10	0,06	-7,77	1332,2	0,3209 *
(2-1-1)	0,30	0,13	-0,60	276,8	0,1796 ns
(2-1-2)	0,22	0,11	-1,41	463,6	0,2193 ns
(2-1-3)	0,26	0,14	-1,84	584,6	0,2917 *
(2-1-4)	0,22	0,13	-2,59	737,4	0,3511 *
(2-2-1)	0,30	0,10	-0,09	145,9	0,1076 ns
(2-2-2)	0,32	0,19	0,02	131,7	0,3330 *
(2-2-3)	0,32	0,19	0,02	131,7	0,3330 *
(2-2-4)	0,32	0,19	0,02	131,7	0,3330 *
(2-3-1)	0,30	0,10	-0,09	145,9	0,1076 ns
(2-3-2)	0,33	0,19	0,03	131,2	0,3422 *
(2-3-3)	0,36	0,22	0,04	130,0	0,3506 *
(2-3-4)	0,40	0,25	0,03	130,4	0,3820 *
(3-1-1)	0,13	0,07	-5,94	1156,2	0,2753 ns
(3-1-2)	0,21	0,11	-2,89	707,8	0,2916 *
(3-1-3)	0,30	0,16	-1,36	441,7	0,3009 *
(3-1-4)	0,33	0,18	-0,46	222,3	0,2850 *
(3-2-1)	0,34	0,15	-0,62	238,4	0,2035 ns
(3-2-2)	0,39	0,20	-0,17	166,8	0,2751 ns
(3-2-3)	0,37	0,20	-0,05	141,3	0,2899 *
(3-2-4)	0,35	0,20	0,05	131,2	0,3321 *
(3-3-1)	0,12	0,06	-6,23	1145,8	0,2939 *
(3-3-2)	0,17	0,10	-4,00	781,8	0,3558 *
(3-3-3)	0,23	0,14	-2,46	555,0	0,3756 *
(3-3-4)	0,31	0,20	-1,21	344,3	0,4058 *

vável que tais valores não representem adequadamente as condições reais da microbacia hidrográfica experimental reduzindo, assim, a qualidade do desempenho do modelo.

Os melhores desempenhos das simulações com o HidroBacia ao se usar a opção $K_w = T_{ie}$, além dos ótimos resultados também obtidos por Cecílio (2005), confirmam sua eficiência, a qual foi proposta, inicialmente, por Silva & Kato (1998). Mesmo que neste trabalho estejam sendo analisados a LES e a $Q_{máx}$, e os autores Cecílio (2005) e Silva & Kato (1998) tenham analisado a infiltração da água no solo, presume-se que boas estimativas da LES e da $Q_{máx}$ sejam consequê-

ência de boas estimativas da infiltração, tornando válida a comparação feita entre os resultados.

Quanto às opções de θ_w que proporcionaram melhor desempenho na estimação da LES e $Q_{máx}$ ($\theta_w = 0,80 \theta_s$ e $\theta_w = 0,85 \theta_s$), tais resultados vão ao encontro daqueles encontrados por Cecílio (2002) na estimação da infiltração da água no solo, que propôs a utilização de valores de θ_w variando entre $0,79 \theta_s$ a $0,81 \theta_s$ para Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa, e na faixa de $0,85 \theta_s$ a $0,86 \theta_s$ para textura franca. Os resultados são considerados coerentes, pelo fato da maioria dos solos da microbacia ser desta mesma classe e possuir

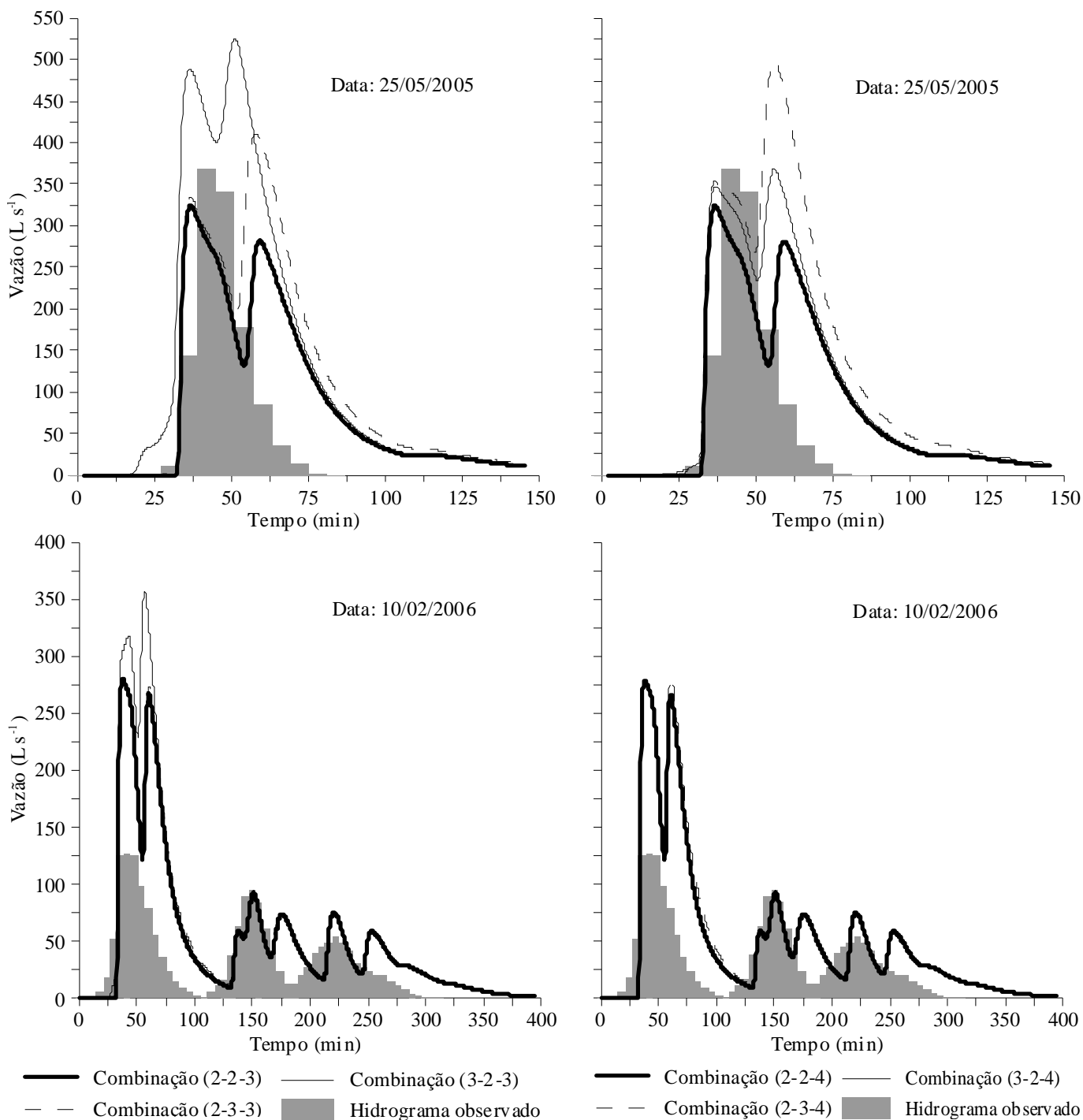


Figura 3. Superposição de hidrogramas de escoamento superficial observados e simulados pelo HidroBacia, referentes às seis combinações com melhor desempenho

textura semelhante à textura do solo estudado por Cecílio (2002).

Em relação ao teste das três opções de K_w , esperava-se que apenas uma apresentasse bons resultados, permitindo identificar a que melhor representou a condutividade hidráulica do solo; entretanto, duas opções ($K_w = T_{ie}$ e $K_w = 0,50 T_{ie}$) apresentaram bons resultados quando associadas com o ψ_f estimado pela opção 2 (Rawls & Brakensiek, 1983).

Quando utilizado $K_w = T_{ie}$, as combinações (2-2-3) e (2-2-4), respectivamente com $\theta_w = 0,85 \theta_s$ e $\theta_w = 0,80 \theta_s$, indicaram hidrogramas idênticos; observou-se, também, que para as seis melhores combinações, naquelas em que o ψ_f foi estimado pela opção 2 (Rawls & Brakensiek, 1983), os resultados, usando-se $K_w = T_{ie}$ e $K_w = 0,50 T_{ie}$ apresentaram hidrogramas idênticos para a maioria dos 14 eventos simulados; esses comportamentos demonstram que, nessas duas situações, o modelo não mostrou sensibilidade à variação de θ_w e K_w , respectivamente.

Os comportamentos do modelo HidroBacia indicam que ele ainda necessita de aprimoramentos, juntamente com análises de sensibilidade, visando identificar possíveis incompatibilidades entre os dados de entrada e os respectivos resultados das simulações.

Os resultados obtidos no presente trabalho, apesar de indicarem a necessidade de mais aprimoramentos no modelo HidroBacia apresentaram, na maioria das situações, erros percentuais relativos menores que os obtidos por Silva (2002), mesmo fazendo simulações em uma bacia maior, sob condições mais complexas.

Percebeu-se, também, no presente trabalho, que por mais eficiente que seja um modelo, suas estimativas sempre tenderão a manter certa discrepância em relação aos dados observados, pois além dos erros inerentes ao próprio modelo, existem os erros experimentais, que são particulares dos equipamentos e métodos utilizados para medir a precipitação na bacia, a vazão no curso d'água, os demais elementos do clima, os diversos parâmetros físicos do solo, a separação entre escoamento superficial e subterrâneo, e muitos outros dados comumente utilizados pelos modelos em geral. No somatório desses erros, é possível que, em alguns casos, os erros experimentais sejam maiores que os erros de estimação do modelo, mascarando a análise dos resultados.

CONCLUSÕES

1. No teste das 36 combinações de dados de entrada da equação de Green-Ampt modificada por Mein e Larson, seis apresentaram melhor desempenho na estimação dos hidrogramas de escoamento superficial.

2. Nas seis combinações, o potencial matricial na frente de umedecimento (ψ_f) foi estimado pela equação proposta por Rawls & Brakensiek (1983) ou pela equação de Cecílio (2005).

3. A equação proposta por Rawls & Brakensiek (1983) somente apresentou melhor desempenho quando associada a

$K_w = T_{ie}$ ou $K_w = 0,50 T_{ie}$, associada, ainda, a $\theta_w = 0,85 \theta_s$ ou $\theta_w = 0,80 \theta_s$.

4. A equação proposta por Cecílio (2005) apresentou melhor desempenho só quando associada a $K_w = T_{ie}$ e $\theta_w = 0,85 \theta_s$ ou $\theta_w = 0,80 \theta_s$.

5. O modelo HidroBacia ainda necessita de aprimoramentos, juntamente com análises de sensibilidade, visando identificar possíveis incompatibilidades entre os dados de entrada e os respectivos resultados das simulações, uma vez que o modelo apresentou resultados incoerentes em determinadas situações.

LITERATURA CITADA

- Ataide, W. F. Modelagem do potencial matricial na frente de umedecimento. Viçosa: UFV, 2005. 64p. Dissertação Mestrado
- Brandão, V. S.; Cecílio, R. A.; Pruski, F. F.; Silva, D. D. Infiltração da água no solo. 3.ed. Viçosa: UFV, 2006. 120p.
- Camargo, A. P.; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- Cecílio, R. A. Aplicação da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado. Viçosa: UFV, 2002. 119p. Dissertação Mestrado
- Cecílio, R. A. Modelagem da infiltração da água no solo fundamentada na equação de Green-Ampt-Mein-Larson. Viçosa: UFV, 2005. 151p. Tese Doutorado
- Cecílio, R. A.; Silva, D. D.; Pruski, F. F.; Martinez, M. A. Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de Green-Ampt. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.3, p.415-422, 2003.
- Custódio, E.; Llamas, M. R. Hidrologia subterrânea. Barcelona: Omega, 1983. 1157p.
- Legates, D. R.; McCabe Jr., G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, v.35, n.1, p.233-241, 1999.
- Mein, R. G.; Larson, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. Water Resources Research, v.9, n.4, p.384-394, 1973.
- Mello, L. T. A. Avaliação de metodologias para obtenção dos parâmetros do modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson. Viçosa: UFV, 2003. 77p. Dissertação Mestrado
- Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles. Journal of Hydrology, v.10, p.282-290, 1970.
- Rawls, W. J.; Brakensiek, D. L. A procedure to predict Green-Ampt infiltration parameters. In: Conference on Advances in Infiltration, 3, 1983, Saint Joseph. Proceedings ... Saint Joseph: ASAE, 1983. p.102-112.
- Rodrigues, L. N. Modelo para dimensionamento e para simulação do desempenho de pivô central. Viçosa: UFV, 1999. 145p. Tese Doutorado

- Silva, C. L.; Kato, E. Avaliação de modelos para previsão da infiltração de água em solos sob cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.33, n.7, p.1149-1158, 1998.
- Silva, J. M. A. Modelo hidrológico para o cálculo do balanço hídrico e obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas: Desenvolvimento e aplicação. Viçosa: UFV, 2002. 142p. Tese Doutorado
- Wang, X.; Benson, C. H. Infiltration and saturated hydraulic conductivity of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, v.121, n.10, p.713-722, 1995.
- Willmott, C.J. . On the validation of models. *Physical Geography*, v.2, n.2, p.184-194, 1981.
- Wilson, B. N.; Oduro, P. Analytical sensitivity coefficients for the GAML infiltration model. *Transactions of the ASAE*, v.47, n.2, p.479-484, 2004.