

APLICABILIDADE DO LISEM (LIMBURG SOIL EROSION) PARA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA TROPICAL⁽¹⁾

Natalino Martins Gomes⁽²⁾, Carlos Rogério de Mello⁽³⁾, Antônio
Marciano da Silva⁽³⁾ & Samuel Beskow⁽⁴⁾

RESUMO

As variáveis de entrada do modelo LISEM, mais importantes do ponto de vista da gênese do escoamento superficial direto (umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação pluvial (θ_{ap}) e espessura da camada de solo considerada no balanço hídrico) foram calibrados para eventos individuais de precipitação pluvial ocorridos na bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, da região Alto Rio Grande, MG. Avaliou-se, também, a influência de diferentes cenários nas variáveis do escoamento superficial direto. O modelo apresentou elevada sensibilidade à umidade do solo, sendo esta sua principal variável de calibração. A influência da camada de balanço hídrico esteve associada à umidade de calibração, observando-se que, quanto maior a profundidade, maior a umidade requerida para calibrar o modelo. Os cenários mata natural, eucalipto e café, aos 35 meses após o plantio, atenuaram as vazões máximas de 37,6; 42,2; e 28,0 %, cuja intensidade de precipitação pluvial foi de 48,0 mm h⁻¹. O modelo hidrológico LISEM apresentou resultados satisfatórios na simulação hidrológica do escoamento superficial direto, mostrando que pode ser aplicado para previsão do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas tropicais, desde que devidamente calibrado.

Termos de indexação: modelagem distribuída, uso do solo, escoamento superficial, umidade do solo.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada à Universidade Federal de Lavras – UFLA. Projeto Fapemig CAG 1617/06. Recebido para publicação em abril de 2008 e aprovado em setembro de 2008.

⁽²⁾ Professor da Escola Agrotécnica Federal Antônio José Teixeira – EAFAJT. Distrito de Ceraíma, Zona Rural. Caixa Postal 09, CEP 46430-000 Guanambi (BA). E-mail: natalagricola@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 3037, CEP 37200-000 Lavras (MG). E-mail: crmello@ufla.br; marciano@ufla.br

⁽⁴⁾ Doutorando em Engenharia Agrícola, UFLA. Bolsista CAPES. E-mail: samuelbeskow@terra.com.br

SUMMARY: APPLICABILITY OF THE LISEM (LIMBURG SOIL EROSION MODEL) MODEL FOR HYDROLOGICAL SIMULATION IN A TROPICAL WATERSHED

The most important parameters of the LISEM model associated to surface runoff production (antecedent soil moisture (θ_{ap}) and soil layer thickness), were calibrated by individual precipitation events in the Marcela Creek Watershed, Alto Rio Grande Region, MG. The hydrological effects of different land-uses in the watershed were also simulated. The model was highly sensitivity to soil moisture, which was the most important calibration paramete. The influence of the water balance layer was related to the soil moisture during calibration. It was observed that the deeper the soil layer, the greater the soil moisture required to calibrate the model. Results of simulation showed that the peak discharges were reduced under native forest, eucalyptus plantation and 35 months-old coffee plantation, respectively, by 37.6; 42.2 and 28.0 %, in the case of a precipitation event of 48 mm h⁻¹. The results of the hydrological model LISEM in hydrological simulations of direct surface runoff were satisfactory, suggesting that it may be used for hydrological behavior prediction in tropical watersheds after adequately calibrated.

Index terms: distributed modeling, land-use, direct surface runoff, soil moisture.

INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a agricultura empresarial e extremamente tecnificada imprime forte ritmo de uso aos solos, fazendo com que a constante mudança de cenários de ocupação, em áreas agrícolas, seja uma de suas principais características. Na maioria das vezes, esta taxa de uso e ocupação vem desacompanhada de práticas conservacionistas e medidas mitigadoras de impactos ambientais, o que tem favorecido a erosão do solo e o transporte de sedimentos pela ação do escoamento superficial direto, propiciando, ao mesmo tempo, condições favoráveis para que o fluxo de água seja veículo de transporte de pesticidas, nutrientes e sedimentos. Esse quadro tem culminado com uma série de impactos ambientais, como perda da fertilidade natural dos solos, contaminação de aquíferos, destruição da flora e fauna aquática, assoreamento dos corpos receptores, redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios, entre outros (Farley et al., 2005).

Tais alterações interagem com outros ciclos e processos, modificando os padrões característicos de suas variáveis, como o escoamento superficial direto (ESD), alterando o formato da hidrografia e, conseqüentemente, o tempo de pico (Tp), a vazão de pico (Qp) e a própria lâmina total, que se converte em ESD, requerendo novas ferramentas para caracterizar sua dinâmica.

A simulação hidrológica configura-se como uma ferramenta indispensável para o manejo ambiental (Licciardello et al., 2007; von Stackelberg et al., 2007), o que tem motivado vários pesquisadores e instituições a desenvolverem modelos com esse propósito. O LISEM (LI mburg Soil Erosion Model), desenvolvido pelo Departamento de Geografia Física da Universidade

de Utrecht e pela Divisão de Física do Solo do Centro Winand Staring (Wageningen), ambos na Holanda, vem sendo aplicado na própria Holanda e em países como Alemanha, Austrália, África do Sul, China e França, entre outros, para planejar e simular o uso e a ocupação dos solos e para investigar impactos ambientais sobre os recursos naturais solo e água, advindos de atividades antrópicas. A grande utilização desse modelo nos países supracitados deve-se ao fato de ser um modelo distribuído e estar completamente incorporado a um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Até o momento, não há registros de sua aplicação em bacias hidrográficas brasileiras.

Chaplot et al. (2005) utilizaram o LISEM para modelar as condições hidrológicas e, por conseqüência, o desenvolvimento da erosão em sulcos, em uma bacia hidrográfica de 0,62 km² ao norte de Laos, França, investigando até que ponto um modelo distribuído, incorporado a um SIG e baseado no processo, seria útil para predizer o início e o desenvolvimento da erosão em sulcos, em paisagens agrícolas. Para o uso atual (culturas anuais, 9,1 %; pastagem, 52,7 %; pomar, 12,2 %; e floresta, 26,0 %), foram registradas velocidades de fluxo nos canais variando de 0,037 m s⁻¹ a 0,062 m s⁻¹, e velocidade de fluxo máxima igual a 0,186 m s⁻¹ em superfícies de maior declividade na referida bacia hidrográfica. Aumentando a área com cultivos anuais de 9,1 para 65 % da superfície da bacia, houve aumento nas velocidades de fluxo superior a 80 %, de 0,062 para 0,112 m s⁻¹, com ocupação de 100 % por culturas anuais. A velocidade máxima do fluxo foi muito alta, 4,8 a 5,4 vezes maior que a do uso atual, variando de 0,298 a 0,336 m s⁻¹, especialmente ao longo dos caminhos preferenciais, definidos pelas condições topográficas. Quando o uso do solo foi apenas com floresta, a velocidade de fluxo foi reduzida significativamente, não alcançando 0,0625 m s⁻¹.

Mello et al. (2007) simularam o deflúvio e a vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero, vegetada por eucalipto (20 %) e pastagem (80 %) e mais quatro cenários, projetando diferentes percentuais de ocupação para cada um desses cultivos. Esses autores relataram que, à medida que se aumentou o percentual da área ocupada por eucalipto, registrou-se redução do deflúvio, obtendo-se redução de 29 % com ocupação de 80 % por eucalipto, o que promoveu a atenuação das cheias. Esse efeito foi atribuído à interceptação pelo dossel, especialmente para eventos de precipitação pluvial de menor intensidade. Com relação à vazão de pico, na simulação da microbacia com 100 % de ocupação por pastagem, esta variou de 10 L s⁻¹ (uso atual) para quase 30 L s⁻¹.

Nesse contexto, objetivou-se, com este estudo: (a) calibrar as variáveis de entrada mais relevantes do ponto de vista da gênese do escoamento superficial direto (umidade do solo antecedente a eventos de precipitação pluvial (θ_{ap}) e a espessura da camada de solo utilizada no balanço hídrico, para o LISEM); (b) estudar a influência de diferentes cenários nas variáveis hidrológicas características do escoamento superficial direto (formato da hidrógrafa, vazão de pico, tempo de pico e escoamento superficial direto); e (c) avaliar o desempenho do LISEM, identificando possíveis usos/ocupações do solo que mais predisponham os recursos da bacia hidrográfica do ribeirão Marcela à ação do escoamento superficial direto.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do ribeirão Marcela

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, situada no município de São João Del Rei, MG, drenando área de 470 ha, à margem direita do córrego do Jaguará, que deságua diretamente no reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Camargos/CEMIG. Está inserida na unidade geomorfológica Planalto Campos das Vertentes, na região Alto Rio Grande e Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos GD1.

Predomina em 65 % da área da bacia hidrográfica o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (LVAd). O Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) está presente em 14 %, o Cambissolo Háptico distrófico (CXbd) ocupa menos de 5 %, enquanto o Neossolo Flúvico distrófico (RUd) ocupa 17 % da área da bacia (Motta et al., 2001). Conforme Gomes et al. (2007b), destacam-se na bacia hidrográfica pastagens do tipo natural e plantada, totalizando 75,9 % da área. A cultura do milho está presente em 16,7 %, sendo esta gleba pastejada após a colheita. A cafeicultura ocupa 2,6 % da bacia, em gleba que até dez/2006 estava sob

plantio de eucalipto. Há também pequeno lago, cujo espelho é de 3,27 ha, correspondendo a 0,68 % da área total da bacia. Os 4,16 % restantes são fragmentos de mata natural, especificamente floresta tropical semidecídua (subcaducifólia) (Figura 1).

Segundo Dantas et al. (2007), o clima da região, pela classificação de Köppen, é o Cwa, com invernos secos e verões úmidos. A temperatura média do mês mais frio está abaixo de 14 °C (julho) e a do mês mais quente é de 22,1 °C (janeiro). Aproximadamente 80 % das precipitações pluviais ocorrem na bacia no período de outubro a abril, e a precipitação pluvial média anual é de 1.570 mm.

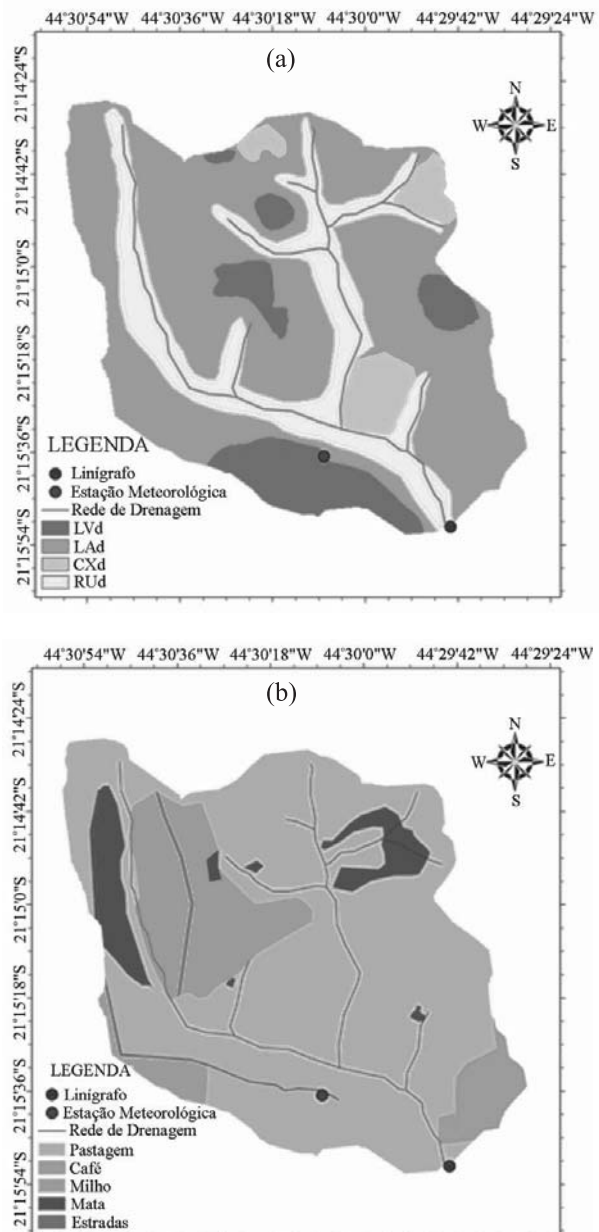


Figura 1. Mapas de solo (a) e de uso atual (b) da bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG.

Calibração do LISEM

O LISEM, conforme Jetten (2002), foi implementado com base na linguagem do SIG PCRaster, um SIG gratuito de modelagem dinâmica para modelos distribuídos de simulação. As grandes vantagens do PCRaster, de acordo com Jetten & De Jong (2006), são sua flexibilidade, rapidez e capacidade de ser um sistema aberto e ampliável, fazendo com que o pesquisador possa utilizar qualquer rotina de cálculo previamente conhecida, ou desenvolver sua própria rotina, sem a necessidade de dominar uma linguagem de programação específica.

Os eventos naturais de chuva, utilizados para calibração do LISEM e simulação dos cenários, foram registrados em 07/04/04 e 21/03/05, com intensidade máxima de precipitação pluvial de 32,4 e 48,0 mm h⁻¹ e precipitação pluvial total de 29,5 e 24,0 mm, respectivamente. Os eventos foram monitorados por estação meteorológica completa, programada para coletar informação em intervalos de 15 min. O escoamento superficial direto foi obtido a partir de linigramas monitorados por um linígrafo automático, também programado para coletar informações em intervalos de 15 min. A conversão em hidrograma foi feita por meio de curva-chave (vazão x profundidade). Após a obtenção dos hidrogramas, promoveu-se a separação entre o escoamento superficial direto e o subterrâneo, empregando-se a regra dos trapézios, obtendo-se, então, a hidrógrafa, o escoamento superficial direto, a vazão e o tempo de pico.

Dados sobre os limites da área da bacia, direção e localização da rede de drenagem e gradientes de declividade foram extraídos do Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica, aplicando-se a ferramenta TOPOGRID do pacote de análises espaciais do ARCMAP 9.1. Dados referentes à vegetação, especificamente o Índice de Área Foliar (IAF), para o uso atual do solo (pastagem e mata natural), foram adaptados, respectivamente, de Xavier et al. (2002) e Takken et al. (1999). A área ocupada com café, por se encontrar nos primeiros três meses após plantio e por não haver informações disponíveis nesta fase da cultura, foi considerada como pastagem.

Informações referentes à superfície do solo, como o coeficiente de atrito superficial de Manning e a rugosidade superficial do terreno, foram adotadas em função do uso dos solos da bacia hidrográfica (Takken et al., 1999), correspondendo, respectivamente, a 0,30 e 1,36 cm (mata natural) e 0,23 e 0,70 cm (pastagem). As espessuras das camadas de solo avaliadas foram de 150, 300, e 450 mm (Jetten, 2002).

O modelo de Green & Ampt, com uma camada, foi utilizado para modelar a infiltração de água no solo. Sua seleção é devida à disponibilidade de informações físico-hídricas espacializadas, extraídas dos trabalhos conduzidos por Gomes et al. (2007a,b,c). Os mapas de condutividade hidráulica saturada (k_0), em mm h⁻¹, e umidade de saturação (θ_s), em cm³ cm⁻³, foram obtidos empregando-se estudo geoestatístico prévio,

desenvolvido por Gomes et al. (2007c). A umidade antecedente foi espacializada também pela geoestatística, para as tensões de 0, 2, 6, 10, 33 e 100 kPa. No momento da calibração, utilizou-se um percentual da umidade retida a uma das tensões anteriormente informadas, obtido por tentativa e erro.

O potencial matricial na frente de umedecimento (ψ_m), para o modelo de Green & Ampt, foi obtido utilizando-se a equação desenvolvida por Rawls et al. (1983), que empregaram o volume total de poros e os percentuais das frações texturais argila e areia para sua modelagem. Os mapas correspondentes também foram gerados pela geoestatística e incorporados ao LISEM, através do PCRaster.

A variável coeficiente de atrito de Manning requerido para os canais da bacia foi adotada de Baptista & Lara (2003), e a largura do canal e inclinação de seus taludes foram admitidos como 0,8 m e 45 °, respectivamente. A direção e o gradiente de declividade da rede de drenagem foram derivados do MDE da bacia.

A calibração do LISEM foi obtida ajustando-se, por tentativa e erro, a umidade do solo antecedente à precipitação pluvial (θ_{ap} em cm³ cm⁻³) para cada uma das três profundidades de solo consideradas. As demais variáveis foram mantidas fixas e adotadas conforme literatura citada. As variáveis vazão de pico, tempo de pico e escoamento superficial direto observadas na bacia foram as referências a serem alcançadas (minimização de erros). A aferição da acurácia do modelo foi feita de forma quantitativa, empregando-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) e pela diferença entre valores calibrados e mensurados (erros), de acordo com as seguintes equações:

$$N_s = 1 - \frac{\sum (Q_{p_{ob}} - Q_{p_c})^2}{\sum (Q_{p_{ob}} - Q_{ob})^2} \quad (1)$$

$$E_{Q_p} = \frac{Q_{p_c} - Q_{p_{ob}}}{Q_{p_{ob}}} \cdot 100 \quad (2)$$

$$E_{T_p} = \frac{T_{p_c} - T_{p_{ob}}}{T_{p_{ob}}} \cdot 100 \quad (3)$$

$$E_{ESD} = \frac{ESD_c - ESD_{ob}}{ESD_{ob}} \cdot 100 \quad (4)$$

em que E_{Q_p} , E_{T_p} e E_{ESD} são erros para as variáveis vazão de pico, tempo de pico e escoamento superficial total, respectivamente; $Q_{p_{ob}}$, $T_{p_{ob}}$ e ESD_{ob} e Q_{p_c} , T_{p_c} e ESD_c são valores observados e obtidos por calibração, para as variáveis vazão de pico, tempo de pico e escoamento superficial total, respectivamente; Q_{ob} é a vazão da hidrógrafa observada no tempo t ; e N_s é o coeficiente de Nash & Sutcliffe. A referência para calibração final do modelo foi a vazão de pico devido à maior variabilidade de seus valores.

Cenários simulados

Após a calibração dos eventos de precipitação pluvial para o uso atual, o LISEM foi aplicado para simular os efeitos nas características hidrológicas da bacia hidrográfica, produzidos por diferentes cenários de uso agrícola do solo na bacia hidrográfica. Os cenários foram projetados considerando as tendências atuais da agricultura na região estudada, sendo os resultados das simulações hidrológicas comparados aos do uso atual.

As simulações dos cenários foram feitas considerando toda a bacia ocupada por um só cultivo: pastagem, mata natural, eucalipto, milho aos 15 e 75 dias após semeadura e café aos 15 e 35 meses após o plantio. A idéia principal é a de que diferentes coberturas vegetais proporcionam alterações em parcelas da precipitação pluvial, principalmente a interceptação e a infiltração, que influenciam diretamente o escoamento superficial direto, a vazão de pico e o tempo de pico. As variáveis referentes à vegetação e à superfície do solo (índice de área foliar, coeficiente de atrito superficial de Manning e rugosidade superficial), para cada cenário, foram adaptados conforme Takken et al. (1999), Favarin et al. (2002), Xavier et al. (2002) e Manfron et al. (2003).

Essas informações, em ambas as etapas (calibração e simulação), foram organizadas em tabelas e convertidas em mapas temáticos, utilizando-se o PCRaster, seguindo recomendações de Jetten & De Jong (2006) e Jetten (2002) e procedimentos de calibração contidos em Gomes (2008). Elas foram compiladas com o aplicativo PCRaster NutShell, que faz a comunicação em ambiente Windows entre o modelo LISEM e o usuário.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração do Modelo LISEM

Os resultados obtidos na calibração para as variáveis hidrológicas estudadas, bem como a sensibilidade do modelo LISEM aos parâmetros avaliados, podem ser observados no quadro 1. O conteúdo volumétrico de umidade antecedente de calibração está de acordo com aqueles apresentados por De Roo & Jetten (1999), ou seja, próximos à umidade de saturação, principalmente para a camada mais profunda (450 mm), para a qual o potencial matricial foi de -2 kPa, utilizando-se mais de 96,0 % do teor de umidade retido a esse potencial. Segundo

Quadro 1. Variáveis hidrológicas observadas e simuladas pelo modelo LISEM, para as camadas de solo com espessuras de 150, 300 e 450 mm e respectivos percentuais de variação em relação aos valores observados, para diferentes conteúdos de umidade do solo nas respectivas camadas, na bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG

Evento	Ψ_m	θ_M	θ	Variável do escoamento superficial direto								
				Tempo de pico			Vazão de pico			ESD		
				Obs	Cal	Δ	Obs	Cal	Δ	Obs	Cal	Δ
	kpa	cm ³ cm ⁻³	%	— min —	%	— L s ⁻¹ —	%	— m ³ —	%			
						150 mm						
07/04/04	10	0,4052	86,0	165	420	154,5	81,63	71,8	-12,0	1.490,3	1.066,6	-28,4
			86,5		420	154,5		83,6	2,4		1.233,9	-17,2
			87,0		435	163,6		92,1	12,8		1.419,9	-4,7
21/03/05	10	0,4052	96,0	315	210	-33,3	147,1	127,7	-13,1	2.192,9	1.964,4	-10,4
			96,6		210	-33,3		146,2	-0,6		2.280,1	4,0
			97,0		225	-28,6		157,5	7,1		2.519,1	14,9
								300 mm				
07/04/04	6	0,4348	98,0	165	405	145,5	81,63	79,8	-2,2	1.490,3	1.424,4	-4,4
			98,1		405	145,5		81,9	0,3		1.469,9	-1,4
			100,0		450	172,7		133,0	63,0		2.647,9	77,7
21/03/05	2	0,4829	95,0	315	135	-57,1	147,1	124,1	-15,6	2.192,9	2.011,5	-8,3
			95,5		225	-28,6		142,8	-2,9		2.541,1	15,9
			96,0		225	-28,6		192,4	30,8		3.137,5	43,1
								450 mm				
07/04/04	2	0,4829	96,0	165	420	154,5	81,63	75,30	-7,7	1.490,3	1.322,4	-11,3
			96,2		405	145,5		84,04	3,0		1.466,8	-1,6
			96,5		390	136,4		101,50	24,3		1.750,6	17,5
21/03/05	2	0,4829	98,8	315	165	-47,6	147,1	136,1	-7,4	2.192,9	1.801,8	-17,8
			98,9		165	-47,6		142,5	-3,1		1.897,3	-13,5
			99,0		165	-47,6		161,7	9,9		1.995,1	-9,0

Ψ_m : potencial matricial; θ_M : umidade volumétrica média no respectivo potencial matricial; Obs: valores observados; Cal: valores calibrados; Δ : variação percentual em relação ao valor observado. Os valores em negrito correspondem aos valores calibrados.

Rawls et al. (1983), é recomendável aplicar, para solos argilosos, caso da bacia hidrográfica em estudo, potencial matricial entre 2,9 cm de sucção (0,29 kPa) e 95,4 cm de sucção (9,35 kPa), com valor ótimo de 16,7 cm de sucção (1,63 kPa). De Roo & Jetten (1999) calibraram o LISEM utilizando potencial matricial de 15 cm de sucção (1,5 kPa), valor próximo aos obtidos neste processo de calibração do LISEM para a camada de 450 mm de espessura (Quadro 1).

Observa-se, também, tendência de um menor potencial matricial quando se analisa da camada de menor para a de maior espessura. Essa tendência está associada à capacidade de armazenamento de água do solo, que também aumenta com a espessura da camada. Para uma camada menos espessa, tem-se menor capacidade de armazenamento de água. Nesse caso, para que as variáveis hidrológicas estudadas não sejam superestimadas, utilizam-se maiores valores para o potencial matricial (maior déficit hídrico), fazendo com que maior percentual da lâmina precipitada fique retido na forma de armazenamento de água no solo e menor percentual desta se converta em escoamento superficial direto, reduzindo-se, assim, a vazão de pico, o tempo de pico e o escoamento superficial direto. Para camadas mais espessas, o contrário é verdadeiro, evitando subestimá-las.

A sensibilidade do LISEM à umidade antecedente também pode ser observada no quadro 1. Pequenas variações no seu conteúdo provocaram elevadas alterações nas variáveis hidrológicas, principalmente na vazão de pico e no escoamento superficial direto, para ambos os eventos e camadas de solo avaliadas. Isso fica evidente quando se analisam os dados do evento de 07/04/04 para a camada de 150 mm. Na camada menos espessa, variação de apenas 0,5 % na umidade antecedente produziu variação no erro de 2,4 para 12,8 % na vazão de pico e de -17,2 para -4,7 % no escoamento superficial direto. Para a camada mais espessa, variação de 1,1 % na umidade antecedente induziu variação no erro de -1,6 para 11,0 % na vazão de pico e de 3,5 para 16,0 % no escoamento superficial direto, confirmando as observações de De Roo & Jetten (1999), Takken et al. (1999) e Hessel et al. (2003a) sobre a sensibilidade e importância da umidade antecedente no processo de calibração do LISEM.

Entre as variáveis hidrológicas avaliadas, a vazão de pico apresentou resultados satisfatórios para ambos os eventos, o que pode ser constatado pelos baixos erros apresentados (Quadro 1). O mesmo desempenho não foi registrado para as demais variáveis. Verifica-se que o tempo de pico apresentou erros de elevada magnitude, provocando translação da hidrógrafa simulada em relação à observada, influenciando, sobretudo, o coeficiente de Nash-Sutcliffe. Os valores de N_s obtidos foram de -2,12; -1,12 e -0,83 para o evento de 07/04/04 e 0,57; 0,39 e -0,30 para o evento de 21/03/05, para as espessuras de camadas de 150, 300 e 450 mm, respectivamente. O valor de N_s pode variar

de negativo infinito até 1, o ajuste perfeito; adequado, se superior a 0,75; e aceitável, se entre 0,36 e 0,75 (Collischonn, 2001). Considerável deslocamento à esquerda das hidrógrafas calibradas em relação à hidrógrafa foi observado para o evento de 07/04/04 para todas as camadas de solo avaliadas (Figura 2a). Os erros de estimativa do tempo de pico (Quadro 1) para este evento são de elevada magnitude (superiores a 136,0 %), o que justifica os valores negativos para o coeficiente de Nash-Sutcliffe para as hidrógrafas simuladas deste evento, mesmo tendo apresentado bom ajuste para a vazão de pico.

O evento de 21/03/05 (Figura 2b) apresentou resultados melhores, observando-se boa aderência entre as hidrógrafas simulada e observada, com coeficiente de Nash-Sutcliffe aceitável (0,57 e 0,39) para as camadas de 150 e 300 mm, concordando com menor erro para o tempo de pico (Quadro 1). Para a camada de 450 mm, o coeficiente de Nash-Sutcliffe foi de -0,30. Ainda reportando-se à figura 2b, identifica-se que os erros de calibração da variável tempo de pico estavam em conformidade com aqueles apresentados por Hessel et al. (2003b), que relatam erros de antecipação para esta variável entre -9,5 e -25,0 % e retardamento variando de 48,8 a 81,1 %. A variável hidrológica vazão de pico foi subestimada, aproximadamente entre -0,6 e -2,1 %. Estes valores são proporcionais aos erros apresentados no quadro 1, creditando consistência ao método de calibração. De Roo & Jetten (1999) relatam erros de calibração do modelo LISEM subestimando a vazão de pico entre -4,46 e -81,48 % e superestimando-a em pouco mais de 1,2 %.

O escoamento superficial direto foi subestimado em 66,7 % das situações avaliadas. Em apenas duas ocasiões o modelo superestimou o escoamento superficial direto, ambas no evento de 21/03/05 e para as camadas de 150 e 300 mm. Entretanto, os erros de calibração para o escoamento superficial direto foram de baixa magnitude, variando de -17,2 % (subestimativa) a 15,9 % (superestimativa), quando comparados a erros de calibração gerados por outros modelos hidrológicos, como método CN-SCS, o qual foi aplicado à mesma bacia por Silva (2006). Os resultados gerados pelo modelo LISEM neste trabalho também foram melhores do que os relatados por Ferreira (2004), o qual cita superestimativa da vazão de pico e, por consequência, do escoamento superficial direto em até cinco vezes o valor observado. Dessa forma, os resultados obtidos por este trabalho demonstram boa performance do modelo LISEM para estimativa do escoamento superficial direto, requerendo para isso amostragem consistente da condutividade hidráulica saturada.

Simulação dos efeitos hidrológicos gerados por diferentes usos do solo

Em virtude do baixo desempenho apresentado pelas hidrógrafas simuladas do evento de 07/04/04, os

cenários foram simulados somente para o evento de 21/03/05, para a camada de solo de 150 mm de espessura. O baixo desempenho na calibração do evento de 07/04/04 provavelmente está associado à sua menor intensidade máxima de precipitação pluvial, 32, 4 mm h⁻¹ quando comparada à intensidade máxima de precipitação pluvial do evento de 21/03/05, que foi de 48,0 mm h⁻¹. Outro fato que ajuda a explicar o melhor desempenho do evento de 21/03/05 é

a menor capacidade adicional de armazenamento de água pelo solo nesta data. Segundo registros da estação meteorológica, a lâmina total precipitada de cinco dias anteriores era de 0,30 mm em 07/04/04 e 30,0 mm em 21/03/05, o que proporcionou condições favoráveis ao escoamento superficial direto, objeto de calibração do LISEM. Os componentes simulados do ciclo hidrológico para os cenários estudados podem ser analisados com base no quadro 2.

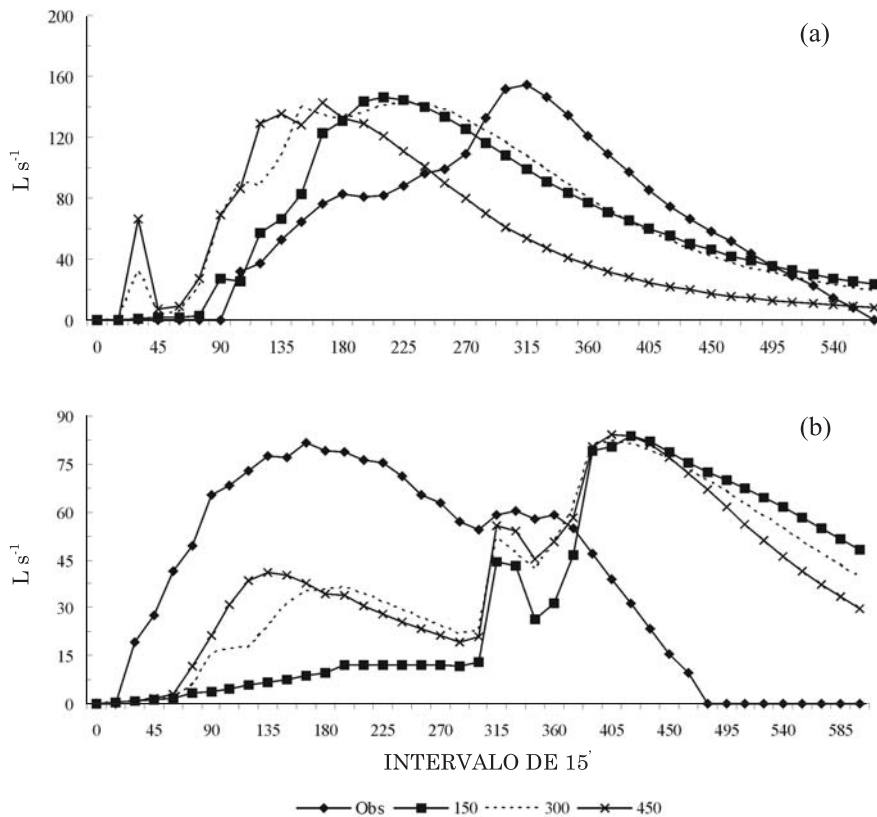


Figura 2. Hidrógrafas observadas e simuladas para precipitação pluvial de 07/04/04 (a) e de 21/03/05 (b).

Quadro 2. Precipitação pluvial total e percentuais da precipitação pluvial total que se converteram em escoamento superficial total (EST), lâmina interceptada, lâmina infiltrada, armazenamento na superfície (AS) e que ainda estava em movimento ao término da simulação (A. Movi.), para os diferentes cenários avaliados na bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG

Cenário	Precipitação total	Parcela da precipitação				
		EST	Interceptada	Infiltrada	AS	A. Movi.
	mm	%				
Atual	23,75	2,0	4,9	92,3	0,4	0,4
Mata		1,4	6,7	90,9	0,6	0,4
Pastagem		2,1	4,7	92,4	0,4	0,4
Café 15 meses		2,9	0,5	95,5	0,6	0,5
Café 35 meses		1,5	7,4	90,3	0,4	0,4
Milho 15 dias		2,6	2,4	94,1	0,6	0,3
Milho 75 dias		0,9	12,3	86,3	0,3	0,2
Eucalipto		1,3	7,3	90,5	0,6	0,3

Observou-se que a lâmina infiltrada predominou sobre os demais componentes em todos os cenários estudados. O maior percentual para esta parcela é registrado para o cenário café aos 15 meses (95,5 %), sendo o menor registrado para o cenário milho aos 75 dias após o plantio (86,3 %). Essa variação está associada à variação da interceptação, pois percebe-se que, para o cenário milho aos 75 dias (menor lâmina infiltrada), registraram-se os maiores percentuais interceptados (12,3 %), enquanto para o cenário café aos 15 meses foi verificada a menor interceptação, ou seja, 0,49 %.

De acordo com Farley et al. (2005), a perda de água pela interceptação ocorre pela evaporação direta durante a chuva, acrescida da evaporação da água que fica retida temporariamente na copa. Em regiões caracterizadas por chuvas intensas de curta duração, como nas regiões tropicais, é de se esperar que as perdas que ocorrem durante a precipitação pluvial sejam menores, comparativamente àquelas que ocorrem depois. Resultados semelhantes aos do quadro 2 foram encontrados em Ferreira et al. (2005), em estudos de precipitação pluvial interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme. Em parcela cuja interceptação foi de apenas 12,9 %, registrou-se o valor mais elevado de precipitação pluvial interna, 87,1 %; o valor mais baixo de precipitação pluvial interna (74,2 %) foi registrado na parcela onde ocorreu a maior taxa de interceptação pelo dossel (25,8 %), que depende de fatores como características da precipitação pluvial e condições climáticas, tipo e densidade da vegetação e época do ano, o que torna esperada a variabilidade apresentada.

A lâmina que se converteu em escoamento superficial direto é a terceira maior entre aquelas apresentadas no quadro 2. Para os cenários café aos 15 meses, milho aos 15 dias após o plantio e pastagem, foram registrados os maiores percentuais para essa parcela, 2,9, 2,7 e 2,1 %, respectivamente, bem próximos ao do uso atual, que registrou escoamento

superficial direto de 2,0 % do total precipitado. O cenário milho aos 75 dias após o plantio obteve o menor percentual da precipitação pluvial total convertido em escoamento superficial direto (0,9 %), o que pode ser atribuído à maior interceptação pelo dossel (12,3 %) em função do elevado índice de área foliar em estágio mais avançado da cultura. As lâminas armazenadas na superfície, e que ainda estavam em movimento no término das simulações, representam menos de 1 % do total precipitado.

A influência dos cenários nas variáveis características do escoamento superficial direto pode ser visualizada no quadro 3. Os cenários milho aos 15 e 75 dias após plantio apresentaram antecipação no tempo de pico em 21,4 %, comparando-se ao do uso atual. Isso pode ser atribuído ao menor coeficiente de atrito superficial de Manning utilizado para estes cenários (0,08) quando comparado ao do uso atual do solo da bacia hidrográfica. Há uma relação inversamente proporcional deste coeficiente com a velocidade do fluxo, ou seja, quanto menor o coeficiente, maior será a velocidade de deslocamento da água sobre as vertentes da bacia hidrográfica.

O cenário pastagem proporcionou vazão de pico próxima aos valores observados para o uso atual, uma vez que a quase totalidade da bacia encontra-se ocupada por este uso. A vazão de pico foi reduzida em 37,6 e 42,2 % para os cenários mata natural e eucalipto, respectivamente, mostrando resultados compatíveis aos obtidos por Mello et al. (2007), que relatam redução da Q_p em 29,0 % para bacia ocupada em 80,0 % com eucalipto. Schuler (2003) avaliou fluxos hidrológicos em sub-bacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental e registrou vazão 7,3 vezes menor para a bacia florestada em relação à pastejada, para o ano de 2000; em 2001, 2002 e 2003 essa relação foi menor, 5,3, 5,2 e 4,6, respectivamente, mas ainda assim a bacia pastejada produziu maior vazão de pico.

No contexto em que este trabalho foi desenvolvido, observou-se que a simulação hidrológica é uma

Quadro 3. Variáveis hidrológicas (vazão de pico – Q_p , tempo de pico – T_p e escoamento superficial total – ESD) estimadas para os cenários avaliados e respectivas variações em relação ao uso atual da bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG

Cenário	Variável hidrológica do escoamento superficial direto					
	Vazão de pico		Tempo de pico		ESD	
	Valor	Δ	Valor	Δ	Valor	Δ
	$L s^{-1}$	%	min	%	mm	%
Atual	146,2	0,0	210,0	0,0	0,5	0,0
Mata	96,3	-34,2	225,0	7,1	0,3	-33,0
Pastagem	150,4	2,9	210,0	0,0	0,5	2,3
Café 15 meses	199,9	36,7	225,0	7,1	0,7	41,4
Café 35 meses	105,2	-28,0	225,0	7,1	0,4	-25,7
Milho 15 dias	240,9	64,9	165,0	-21,4	0,6	29,2
Milho 75 dias	89,3	-38,9	165,0	-21,4	0,2	-55,4
Eucalipto	89,2	38,9	240,0	14,3	0,3	36,5

ferramenta imprescindível para a preservação e manutenção dos recursos naturais solo e água, pois permite uma aproximação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas a situações extremas em diferentes usos. Pode-se recomendar ainda atenção especial no que tange à adoção de práticas e manejo conservacionista na fase inicial de desenvolvimento das culturas, perenes ou não, pois, neste estágio, estas oferecem pouca ou nenhuma proteção ao solo e aos recursos hídricos, potencializando os danos causados pelo escoamento superficial direto.

CONCLUSÕES

1. O modelo LISEM apresentou alta sensibilidade à umidade do solo antecedente à precipitação pluvial, sendo este sua principal variável de calibração. O valor mais adequado foi aquele obtido em baixas tensões, com a umidade próxima à saturação do solo.

2. A profundidade da camada de solo influenciou o conteúdo ótimo de umidade de calibração. Quanto maior a profundidade, maior também foi o conteúdo de umidade do solo antecedente à precipitação pluvial requerido para calibrar o modelo LISEM.

3. Os cenários mata natural, eucalipto e café aos 35 meses após o plantio foram os mais eficientes para atenuar as vazões máximas para a intensidade de precipitação pluvial de 48,0 mm h⁻¹.

4. O cenário milho aos 15 dias após o plantio foi o uso/ocupação do solo, entre as alternativas avaliadas, que mais predisps a bacia hidrográfica do ribeirão Marcela aos impactos ambientais.

5. O modelo hidrológico LISEM apresentou resultados satisfatórios na simulação hidrológica dos diferentes cenários, mostrando que pode ser aplicado para previsão do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas tropicais, desde que devidamente calibrado.

LITERATURA CITADA

- BAPTISTA, M. & LARA, M. Fundamentos de engenharia hidráulica. 2.ed. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2003. 437p.
- CHAPLOT, V.; GIBOIRE, G.; MARCHAND, P. & BALENTIN, C. Dynamic modeling for linear erosion initiation and development under climate and land-use changes in Northern Laos. *Catena*, 63:318-328, 2005.
- COLLISCHONN, W. Simulação hidrológica de grandes bacias. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 194p. (Tese de Doutorado)
- DANTAS, A.A.A.; CARVALHO, L.G. & FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. *Ci. Agrotec.*, 31:1862-1866, 2007.
- DE ROO, A.P.J. & JETTEN, V.G. Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. *Catena*, 37:477-493, 1999.
- FARLEY, K.A.; JOBBAGY, E.G. & JACKSON, R.B. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Global Change Biol.*, 11:1565-1576, 2005.
- FAVARIN, J.L.; DOURADO NETO, D.; GARCÍA, A.G.; NOVA, N.A.V. & FAVARIN, M.G.G.V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37:769-773, 2002.
- FERREIRA, L. Simulação hidrológica utilizando o modelo TOPEMODEL em bacias rurais – estudo de caso na bacia hidrográfica do ribeirão dos Marins – seção Monjolinho – SP. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 205p. (Tese de Doutorado)
- FERREIRA, S.J.F.; LUIZÃO, F.J. & DALLAROSA, R.L.G. Precipitação interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme submetida à extração seletiva de madeira na Amazônia Central. *Acta Amaz.*, 35:55-62, 2005.
- GOMES, N.M. Aplicabilidade do modelo LISEM (Limburg Soil Erosion Model) para simulação hidrológica em bacia hidrográfica tropical. Lavras, MG, Universidade Federal de Lavras, 2008. 183p. (Tese de Doutorado)
- GOMES, N.M.; FARIA, M.A.; SILVA, A.M.; MELLO, C.R. & VIOLA, M.R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 11:427-435, 2007a.
- GOMES, N.M.; MELLO, C.R.; FARIA, M.A.; SILVA, A.M. & OLIVEIRA, M.S. Ajuste de variogramas no estudo da continuidade espacial de atributos físicos do solo. *Irriga*, 12:92-107, 2007b.
- GOMES, N.M.; SILVA, A.M.; MELLO, C.R.; FARIA, M.A. & OLIVEIRA, P.M. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:435-443, 2007c.
- HESSEL, R.; JETTEN, V.; BAOYUAN, L.; YAN, Z. & STOLTE, J. Calibration of the LISEM model for a small Loess Plateau catchment. *Catena*, 54:235-254, 2003a.
- HESSEL, R.; MESSING, I.; LIDING, C.; RITSEMA, C. & STOLTE, J. Soil erosion simulations of land use scenarios for a small Loess Plateau catchment. *Catena*, 54:289-302, 2003b.
- JETTEN, V.; DE JONG, S. PCRaster course: Erosion modeling – erosion simulation of the Ngoye Hills area (KwaZulu-Natal, RSA). Utrecht, Utrecht University, 2006. 45p.
- JETTEN, V. LISEM user manual, version 2.x. Draft version January 2002. Utrecht, Utrecht Centre for Environmental and Landscape Dynamics, Utrecht University, 2002. 48p.
- LICCIARDELLO, F.; ZEMA, D.A.; ZIMBONE, S.M. & BINGNER, R.L. Runoff and soil erosion evaluation by the AnnAGNPS model in a small Mediterranean watershed. *Trans. ASABE*, 50:1585-1593, 2007.

- MANFRON, P.A.; DOURADO NETO, D.; PEREIRA, A.R.; BONNECARRÈRE, R.A.G.; MEDEIROS, S.L.P. & PILAU, F.G. Modelo do índice de área foliar da cultura de milho. R. Bras. Agrometeorol., 11:333-342, 2003.
- MELLO, C.R.; LIMA, J.M. & SILVA, A.M. Simulação do deflúvio e vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 11:410-419, 2007.
- MOTTA, P.E.F.; CURI, N.; SILVA, M.L.N.; MARQUES, J.J.G.S.M.; PRADO, N.J.S. & FONSECA, E.M.B. Levantamento pedológico detalhado, erosão dos solos, uso atual e aptidão agrícola das terras da microbacia piloto na região sob influência do reservatório da hidrelétrica de Itutinga/Camargos-MG. Belo Horizonte, CEMIG/UFLA/FAEPE. 2001. 51p.
- NASH, J.E. & SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles. J. Hydrol., 10:282-290, 1970.
- RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L. & SONI, B. Agricultural management effects on soil water process Part I: Soil water retention and green and ampt infiltration parameters. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 26:1747-1752, 1983.
- SCHULER, A.E. Fluxos hidrológicos em microbacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental, Paragominas, Pará. Piracicaba, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, 2003. 118p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, P.M.O. Modelagem do escoamento superficial e da erosão na sub-bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2006. 155p. (Tese de Doutorado)
- TAKKEN, I.; BEUSELINCK, L.; NACHTERGAELE, J.; GOVERS, G.; POESEN, J. & DEGRAER, G. Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). Catena, 37:431-447, 1999.
- von STACKELBERG, N.O.; CHESCHEIR, G.M.; SKAGGS, R.W. & AMATYA, D.M. Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó River Basin, Uruguay. Trans. ASABE, 50:455-468, 2007.
- XAVIER, A.C.; SOARES, J.V. & ALMEIDA, A.C. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. R. Árvore, 26:421-427, 2002.