

**APLICAÇÃO DO LISEM (LIMBURG SOIL
EROSION MODEL) PARA SIMULAÇÃO
HIDROLÓGICA EM BACIA HIDROGRÁFICA
TROPICAL**

NATALINO MARTINS GOMES

2008

NATALINO MARTINS GOMES

**APLICAÇÃO DO LISEM (LIMBURG SOIL EROSION MODEL) PARA
SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA EM BACIA HIDROGRÁFICA
TROPICAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para a obtenção do título de "Doutor".

Orientador

Prof. Dr. Antônio Marciano da Silva

**LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2008**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Gomes, Natalino Martins

Aplicação LISEM (limburg soil erosion model) para simulação hidrológica em bacia hidrográfica tropical. / Natalino Martins Gomes. – Lavras : UFLA, 2008.

191 p. : il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2008.

Orientador: Antônio Marciano da Silva

Bibliografia

1. Bacia hidrográfica. 2. Modelagem hidrológica. 3. Modelo distribuído. 4. LISEM. 5. Cenários. 6. Escoamento superficial direto. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD- 551.488

NATALINO MARTINS GOMES

**APLICAÇÃO DO LISEM (LIMBURG SOIL EROSION MODEL) PARA
SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA EM BACIA HIDROGRÁFICA
TROPICAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para a obtenção do título de "Doutor".

APROVADA em 25 de abril de 2008

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello

UFLA

Prof. Dr. Daniel Fonseca de Carvalho

UFRRJ

Pesq. Dr. Gilberto Coelho

UFLA

Prof. Dr. João José Granate de Sá e Melo Marques

UFLA

Prof. Dr. Antônio Marciano da Silva
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

OFEREÇO

À MEMÓRIA DOS IRMÃOS:

Elizabete

Marcos Antônio

Antônio Marcos

Pedro &

José Antônio

Aos meus pais,

Antônio Tarcísio Gomes & Etelvina Martins Gomes.

Aos irmãos,

Sebastião, Eliane, Vicente, Juvenal & Ernane.

A minha esposa,

Adriene.

A minha filha,

Gabriela M. M. Gomes.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, pela dádiva da vida, pelas oportunidades e dons a mim ofertados.

Aos pais, Antônio Tarcísio Gomes e Etelvina Martins Gomes, por terem oportunizado meus estudos e pelos sacrifícios que fizeram em prol desta valiosa conquista.

A Adriene, esposa querida, que me encanta com sua alegria e jeito simples de ser, por estar ao meu lado e confortar-me com amor, carinho, compreensão e calor humano.

A Samuel Beskow, amigo, companheiro e membro da equipe, por ter prestado valiosíssima contribuição, sem a qual seria difícilima a conclusão deste trabalho.

Ao professor Antônio Marciano da Silva, orientador e amigo, por quem guardo valiosa estima e consideração, pelas valiosas orientações ao longo destes anos.

Ao professor Carlos Rogério de Mello, pelas inúmeras e imprescindíveis sugestões, zelando pelo caráter científico do trabalho e por contribuir significativamente para minha formação.

Ao Professor Manoel Alves de Faria, por valiosos conselhos e orientação desde o primeiro contato, que se deu em um estágio realizado no mês de agosto de 1999, ocasião em que me encontrava no início do curso de graduação em Engenharia Agrícola nesta instituição.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia que contribuíram para minha formação e oportunizaram a aprendizagem.

Aos membros da nossa equipe de trabalho, que prestaram valiosa contribuição com estes e outros trabalhos já realizados e, certamente, contribuirão com outros mais: Gilberto Coelho, Daniel Brasil, Polyanna Mara de

Oliveira, José Alves Junqueira Junior, Renato Antônio, Marcelo Ribeiro Viola, Marcio Adalberto, Lidiane, Gil e Donizete.

Ao Sr. Lindenberg (Sr. Berg), funcionário do setor de Hidráulica, por ter prestado valiosa contribuição e ajuda na época da graduação, somando-se à amizade, convivência e respeito.

Aos amigos de curso: Débora Candeias, Marcos Vinício, Eduardo Inácio, Edinaldo Liberato, Carlinhos, Reinaldo, Leonardo Lopes, Kátia Daniela, Marcelo Furtine, Luiz César, Juliana, José Ziltom, Carlos Vinícios e Junior César, pela amizade, confiança, convivência e formidável apoio e ajuda, sem os quais seria difícil e por demais pesada esta longa jornada.

Aos professores Cláudio Montenegro e Mário Guerreiro, por valiosa contribuição e compreensão no momento de minha qualificação.

Aos amigos Adriano, Anselmo e Carlinha, pela convivência e amizade.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia, pela oportunidade de realizar o doutorado.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos, nos primeiros 11 meses deste curso.

Às agências CNPq (CT-Hidro), Fapemig, Cemig e ANEEL, pelos recursos disponibilizados para a realização deste trabalho.

À Escola Agrotécnica Federal Antônio José Teixeira, EAFAJT/Guanambi/BA, pela concessão de licença para dedicar-me a este trabalho.

A todos que contribuíram, de forma direta e indireta, para esta conquista.

MUITO OBRIGADO!

MUITO OBRIGADO!

MUITO OBRIGADO!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO GERAL	i
GENERAL ABSTRACT	iii
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 Bacias hidrográficas.....	4
2.2 Recursos hídricos.....	5
2.3 Conceito e classificação dos modelos hidrológicos.....	6
2.4 Modelagem em bacias hidrográficas	8
2.5 Variáveis utilizadas nas simulações em bacias hidrográficas.....	10
2.5.1 Variáveis climáticas e hidrológicas	10
2.5.2 Variáveis associadas à cobertura vegetal.....	11
2.5.3 Variáveis associadas aos aspectos pedológicos	14
2.6 O LISEM	16
2.7 Descrição do LISEM para simulação do escoamento superficial direto.....	18
2.7.1 Precipitação.....	19
2.7.2 Interceptação.....	19
2.7.3 Infiltração de água no solo.....	20
2.7.4 Armazenamento em depressões.....	21
2.7.5 Escoamento superficial direto e em canais	22
2.7.6 Estradas e canais	22
2.7.7 Crostas e pedras na superfície.....	22
2.8 Procedimentos de calibração do LISEM.....	23
2.9 Algumas aplicações do LISEM	25
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

CAPÍTULO 2.....	35
CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO HIDROLÓGICA DO MODELO LISEM PARA UMA BACIA HIDROGRÁFICA DA REGIÃO ALTO RIO GRANDE, MG.....	35
1 RESUMO.....	35
3 INTRODUÇÃO.....	37
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	39
4.1 Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande.....	39
4.2 Levantamento dos dados de entrada para simulação hidrológica com o modelo LISEM.....	47
4.2.1 Informações topográficas.....	47
4.2.1.1 Delimitação da área da bacia hidrográfica.....	47
4.2.1.2 Direção e localização da rede de drenagem.....	47
4.2.1.3 Gradiente de declividade da rede de drenagem.....	48
4.2.1.4 Área monitorada pela estação meteorológica.....	48
4.2.2 Informações referentes à vegetação.....	48
4.2.3 Informações referentes à superfície do solo.....	50
4.2.4 Parâmetros referentes à infiltração de água no solo.....	51
4.2.4.1 Condutividade hidráulica saturada (k_0).....	51
4.2.4.2 Umidade de saturação do solo ou VTP.....	51
4.2.4.3 Umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação - θ_{ap}	52
4.2.4.4 Potencial matricial na frente de umedecimento para o modelo de Green & Ampt.....	53
4.2.4.5 Espessura das camadas de solo.....	54
4.2.5 Parâmetros referentes aos canais de escoamento da bacia hidrográfica....	55
4.3 Eventos para calibração e validação.....	57
4.4 Separação das hidrógrafas.....	57

4.5 Calibração e validação	58
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1 Calibração	60
5.1.1 Umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação (θ_{ap}) e espessura das camadas de solo	60
5.2 Componentes do ciclo hidrológico simulados pelo LISEM	76
5.3 Variáveis respostas do escoamento superficial direto.....	81
5.3.1 Formato das hidrógrafas	81
5.3.2 Tempo de pico (T_p)	85
5.3.3 Vazão de pico (Q_p).....	88
5.3.4 Escoamento superficial direto (ESD).....	94
5.3.5 Índice C.....	98
5.4 Validação	100
6 CONCLUSÕES	107
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
CAPÍTULO 3.....	113
EFEITOS HIDROLÓGICOS DE DIFERENTES CENÁRIOS DE USO DO SOLO NUMA BACIA HIDROGRÁFICA TROPICAL SIMULADOS COM O LISEM	113
1 RESUMO.....	113
3 INTRODUÇÃO	115
4 MATERIAL E MÉTODOS	117
4.1 Escolha dos eventos de precipitação.....	117
4.2 Cenários simulados	118
4.2.1 Cenário 1: uso atual	119
4.2.2 Cenário 2: pastagem.....	119
4.2.3 Cenário 3: mata natural.....	120
4.2.4 Cenário 4: eucalipto	120

4.2.5 Cenário 5: milho aos 15 dias após semeadura	121
4.2.6 Cenário 6: milho aos 75 dias após semeadura	121
4.2.7 Cenário 7: café aos 15 meses após o plantio.....	122
4.2.8 Cenário 8: café aos 35 meses após o plantio.....	122
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	123
5.1 Análise global dos efeitos hidrológicos	123
5.2 Efeito dos cenários nas variáveis associadas ao escoamento superficial direto	128
5.2.1 Tempo de pico, formato das hidrógrafas e vazão de pico.....	128
5.2.2 Escoamento superficial direto e índice C.....	135
6 CONCLUSÕES	141
7 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	142
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	144
9 ANEXOS	148

RESUMO GERAL

GOMES, Natalino Martins. **Aplicação do LISEM (Limburg Soil Erosion Model) para simulação hidrológica em bacia hidrográfica tropical**. 2008. 191p. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo. Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. ¹

Utilizar os recursos naturais solo e água sem exauri-los é um dos principais desafios imposto à sociedade nos dias atuais. Haja vista que, com o aumento da população mundial, a demanda por produtos agrícolas e industriais aumentou e, conseqüentemente, a pressão sobre estes recursos também. No tocante à preservação dos recursos naturais solo e água, no contexto de bacias hidrográficas, o escoamento superficial direto assume importante papel. Inúmeros são os fatores que o governam este segmento do ciclo hidrológico e danosas são as conseqüências quando ignorados os riscos que este pode proporcionar ao meio ambiente. Assim, objetivou-se, com a realização deste trabalho, calibrar parâmetros de entrada importantes do ponto de vista da gênese do escoamento superficial: unidade do solo antecedente aos eventos de precipitação e, a espessura da camada de solo considerada no balanço hídrico, para o modelo hidrológico distribuído LISEM, tendo como saída as grandezas características do escoamento superficial direto; validar a aplicação do LISEM para eventos de precipitação de diferentes intensidades; verificar o potencial de aplicação do LISEM para prognosticar o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas agrícolas tropicais; avaliar a sensibilidade do LISEM a eventos extremos de intensidade de precipitação; simular novos cenários de uso/ocupação do solo e o efeito por eles produzido em variáveis hidrológicas do escoamento superficial direto e identificar possíveis usos/ocupações com maior potencial de degradação dos recursos naturais solo e água na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela. A referida unidade ambiental, localiza-se na Região Alto Rio Grande, Município de São João Del Rei, situada a aproximadamente 70 km de Lavras, MG. O Ribeirão Marcela drena área aproximada de 470 ha, à margem direita do córrego do Jaguará, que deságua diretamente no reservatório da usina hidroelétrica de Camargos/CEMIG. Situa-se entre as coordenadas 21°14'24'' e 21°15'54'' de latitude S e 44°29'24'' e 44°30'54'' de longitude W. Informações referentes ao uso atual e às características morfométricas da bacia foram obtidas em trabalhos de campo e aquelas relacionadas aos cenários: mata natural, pastagem, eucalipto aos 7 anos de idade, café aos 15 e 35 meses de idade e milho aos 15 e 75 dias após o plantio, foram obtidas na literatura. Estas informações

¹ Comitê de orientação: Antônio Marciano da Silva – DEG/UFLA (Orientador), Carlos Rogério de Mello – DEG/UFLA (Co-orientador).

foram organizadas em linguagem PCRaster e compiladas no aplicativo PCRaster NutShell, que faz a comunicação entre o ambiente Windows e o LISEM. O LISEM apresentou alta sensibilidade à umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação, sendo este o seu principal parâmetro de calibração. A umidade ótima de calibração do LISEM encontra-se próximo à umidade de saturação, sendo pouco confiável a simulação hidrológica de eventos isolados de precipitação utilizando-se parâmetros calibrados de outros eventos, mesmo que de igual intensidade de precipitação. A espessura da camada de solo mostrou-se pouco importante quando analisada isoladamente. Contudo, ao associá-la ao conteúdo de umidade do solo, pôde-se perceber que quanto maior a espessura, maior também é o conteúdo de umidade inicial ótimo de calibração do LISEM. Foi possível calibrar o LISEM para todas as espessuras de camadas de solo propostas, em todos os eventos. O LISEM não produziu resultados satisfatórios para eventos cuja intensidade de precipitação foi menor ou igual à capacidade de infiltração de água no solo, mas apresentou resultados satisfatórios quando aplicado a eventos de precipitação cuja intensidade foi superior a 30 mm h^{-1} . Registrou-se tendência em subestimar o tempo de pico e a lâmina convertida em ESD, o que, por consequência, reduziu os percentuais do índice C de escoamento superficial. A variável hidrológica vazão de pico apresentou resultados satisfatórios em 82,50% das situações simuladas; esta foi sub ou superestimada em menos de 3,0 %. Constatou-se também que o coeficiente de atrito superficial (n), parâmetro fornecido ao modelo, em função do uso/ocupação do solo, é importante na calibração do tempo de pico, porém, não é o único parâmetro de calibração para esta variável. Os cenários mata natural, eucalipto e café, aos 35 meses após o plantio, atenuaram as vazões máximas em 37,62%, 42,17% e 28,04% para evento em que a intensidade máxima de precipitação foi de $48,0 \text{ mm h}^{-1}$, respectivamente, quando comparados ao cenário atual. Os cenários milho aos 15 e 75 dias após o plantio, propiciaram as maiores vazões máximas, indicando ser este uso/ocupação do solo, entre as alternativas avaliadas, o que mais predispõe a bacia hidrográfica a impactos hidrológicos, principalmente na fase inicial da cultura.

GENERAL ABSTRACT

GOMES, Natalino Martins. **Applicability of the LISEM (Limburg Soil Erosion Model) for hydrological simulation at a tropical watershed.** 2008. 191p. Thesis (Doctor Science in Agricultural Engineering. Soil Water Engineering) – Federal University of Lavras, Lavras, MG².

The suitable use of the soil-water resources is one of the most important human concern in present days due to the world population growth which demands increase of the agricultural and industrial production. This situation has generated continuous use of the natural resources without environment sustainability. In context of watershed management, the surface runoff plays fundamental role due to a number of parameters associated to the environmental consequences that can not be neglected. This work was developed with the following purposes: 1 – to calibrate the LISEM most sensitivity parameters linked to the surface runoff geneses (soil moisture antecedent to the individual rainfall events and soil layer depth considered in water budgeted); 2 – to validate the LISEM application to the individual rainfall events, considering different rainfall intensities; 3 – to evaluate the LISEM performance for simulation of the hydrological behavior at a tropical watershed; 4 – to evaluate the LISEM sensitivity to a typical tropical rainfall condition; 5 – to simulate the effect of different land-use scenarios on surface runoff generation, identifying the land-uses that can produce greater potential of natural resources degradation. The study was carried out at Marcela Creek Watershed, Alto Rio Grande Region, São João del Rey County, draining into Jaguara River and from this, to Camargos Hydropower Plant Reservoir (CEMIG). Marcela Creek Watershed is located between geographical coordinates 21^o14'24" S and 21^o15'54" S and 44^o29'24" W and 44^o30'54" W and presents drainage area of 470 ha. Actual land-use and some topographical characteristics of watershed were obtained in field conditions and extracted from the scientific literature sources, especially for development of the scenarios of simulation. The land-use scenarios were considered at overall watershed, being native forest, grassland, eucalyptus 7 years old, coffee crop 15 and 35 months old and corn crop with 15 and 75 days after cultivated. Vegetative data set of each scenario was organized in PCRaster Language Program and compiled in PCRaster Nutshell which runs the LISEM in Windows environment. The LISEM has presented high sensitivity to the soil moisture antecedent which demonstrated the most important parameter during the calibration period. The best soil moisture for LISEM calibration is near to the soil moisture saturation. We have also observed that was not possible to apply

² Guidance Committee: Antônio Marciano da Silva – DEG/UFLA and Carlos Rogério de Mello – DEG/UFLA.

the LISEM calibrated to a specific rainfall event to the other event. Soil layer depth was less important than soil moisture antecedent whether evaluated individually. However, if this parameter to be linked to the soil moisture antecedent, it becomes relevant, verifying that as greater depth soil layer greater soil moisture antecedent. The LISEM was calibrated for each soil layer depth evaluated. Nevertheless, the main soil layer depth effect was verified in total surface runoff, with the model under-estimating the values due to greater soil water retention in deeper soil layer. The results have showed that the LISEM has not produced good estimations to the rainfall events with intensity smaller than soil infiltration capacity; to rainfall intensity greater than 30 mm h^{-1} , its performance was satisfactory. In terms of the time lag, the model has also demonstrated under-estimation bias as well as to the total surface runoff prediction. The peak discharge predicted by LISEM was matched to the observed values, presenting mean absolute error of 3% in great part of situations. In terms of scenarios simulated, native forest, eucalyptus and coffee crop 35 months old would produce peak discharge reduction, in relation to the actual land-use scenario, of 37.62%, 42.17% and 28.04%, respectively. The land-use scenarios with corn crop at overall watershed would generate the greatest peak discharges, showing that these scenarios of land-use are more relevant in terms of the hydrological impacts, especially in initial crop season.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil e no mundo, as questões do gerenciamento dos recursos naturais se tornaram vitais. Com o aumento da população mundial, a demanda por produtos agrícolas e industriais aumentou e, conseqüentemente, a utilização da água nas lavouras irrigadas, nas indústrias e na geração de energia elétrica, dentre outros, culminando também, com demanda e pressão sobre os recursos hídricos.

Dentre os desafios da agricultura, da pecuária, da silvicultura e da atividade industrial, em geral, estão o de se usar o solo e os recursos hídricos, extraindo-se máximo de produtividade na atividade sem, contudo, exauri-los. O solo é um corpo natural composto por minerais, material orgânico, organismos vivos, ar e água, que serve de suporte físico e fonte de água e de nutrientes para o desenvolvimento dos organismos que nele vivem. Por outro lado, a maior parte das substâncias da terra, seja ela mineral ou orgânica, contém água. É por isso que a água, ocupa um papel ímpar na história do nosso planeta. Nenhuma outra substância natural pode ser comparada, em termos de sua influência no curso do mais elementar processo geológico e biológico.

Naturalmente, no contexto das bacias hidrográficas, os solos apresentam atributos que lhes conferem as mais variadas características, propriedades e possibilidades de uso, em função de sua aptidão agrícola. Alguns são mais resistentes à erosão, à compactação e à exaustão do que outros. Há aqueles que apresentam elevada fertilidade natural, que possuem boas condições de recarga e abastecimento de aquíferos, dentre outras. O entendimento dessas relações entre os atributos dos solos e os recursos hídricos, bem como os processos que

aceleram o seu desgaste e exaustão, é o primeiro passo no sentido de preservá-los, pois estes respondem de maneira diferente aos usos que lhes são dados.

O uso irracional dos solos pode alterar seus atributos, aumentando sua densidade, reduzindo seu teor de matéria orgânica, sua porosidade, sua condutividade hidráulica, dentre outros. Tais alterações o predispondo à ação erosiva das chuvas, o que possibilitará a remoção da camada fértil, acarretando sua exaustão química e, conseqüentemente, a redução da produção vegetal, além da perda de água e nutrientes, causando também assoreamento e contaminação dos corpos d'água.

Muitas vezes, seria possível prever, evitar e mitigar os danos e as conseqüências advindos de certos usos e ocupações dos solos, desde que houvesse informações sobre as interações e efeitos produzidos nestes ecossistemas, mediante a ação antrópica. A modelagem dos processos envolvidos no sistema hídrico em bacias hidrográficas tem se mostrado uma ferramenta hidrológica de substancial importância para a previsão de respostas hidrológicas destas unidades ambientais a determinados eventos de precipitação, servindo também para simular diferentes cenários (usos e ocupações) e os efeitos produzidos no comportamento hidrológico.

Em virtude da complexidade e da relevância de problemas ambientais e da carência de informações a respeito da dinâmica dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, muitos têm sido os modelos aplicados como forma de buscar conhecimentos escassos ou, até mesmo, inexistentes, quando se trata destas unidades fisiográficas naturais. Em regiões tropicais, onde se acentua a escassez de informações a este respeito, as bacias hidrográficas agrícolas de pequeno porte, quando monitoradas, se tornam verdadeiros laboratórios e áreas de aplicação para os mais variados modelos hidrológicos.

O LISEM (Limburg 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 naquele país e em outros como Alemanha, Austrália, África do Sul, China e França, dentre outros. Nestes países, tem sido utilizado para planejar e simular o uso e ocupação dos solos, com os propósitos de conservar, evitar e mitigar impactos ambientais, por ora impostos aos recursos naturais solo e água, advindos de atividades antrópicas. A grande utilização deste modelo se deve ao fato de ser fisicamente fundamentado nos processos de interceptação da precipitação pelo dossel da vegetação, no armazenamento da água na superfície do solo, na infiltração de água no solo e no escoamento superficial direto, ser geograficamente distribuído e estar completamente incorporado a um sistema de informações geográficas (SIG).

Neste contexto, objetivou-se com a realização deste trabalho: calibrar os parâmetros de entrada do LISEM, especificamente umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação (θ_{ap}) e a camada de solo utilizada para o balanço hídrico; validar a aplicação do LISEM para eventos de precipitação de diferentes intensidades; verificar o seu potencial de aplicação para bacias hidrográficas agrícolas visando à predição de seu comportamento hidrológico; avaliar a sensibilidade do LISEM a eventos extremos de precipitação; simular os impactos hidrológicos produzidos por diferentes cenários de uso e ocupação do solo numa bacia hidrográfica tropical na região Alto Rio Grande, Minas Gerais e identificar possíveis usos e ocupações com maior potencial de degradação dos recursos naturais solo e água, na referida unidade ambiental.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Bacias hidrográficas

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água das precipitações, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. Compõe-se, basicamente, de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até resultarem em um leito único no exutório (Tucci, 2004).

Neste espaço, ocorre uma diversidade de processos e ciclos que respondem a interferências, como uso e ocupação do solo. Alterações nas características físicas, químicas e biológicas do solo, como porosidade, teor de matéria orgânica, capacidade de infiltração, capacidade de retenção e redistribuição de água no perfil e densidade do solo, dentre outras, refletem na produção de água e predisõem os recursos da bacia hidrográfica a uma maior vulnerabilidade (Gomes, 2005). Silva et al. (2001) relatam que quanto mais densa for a cobertura vegetal sobre as vertentes das bacias hidrográficas, mais os solos estarão protegidos da ação erosiva das chuvas e menores serão as perdas de solo e água, principalmente nas regiões tropicais. Relatam ainda que a presença da cobertura vegetal dos solos proporciona diminuição do escoamento superficial, redução da capacidade de transporte de agregados, evitou parcialmente o processo de selamento superficial (devido ao menor impacto das gotas de chuva) e aumento da taxa de infiltração de água no solo, explicitando, desta maneira, sua importância.

Na Figura 1 está apresentada parte da diversidade de processos relacionados à dinâmica dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica, com possíveis interações durante as diferentes etapas do ciclo hidrológico. Nesta Figura pode-se notar o porquê desta unidade natural da paisagem (bacia

hidrográfica) ser considerada ecossistêmica e hidrológicamente ideal para tratar questões relacionadas aos recursos naturais.

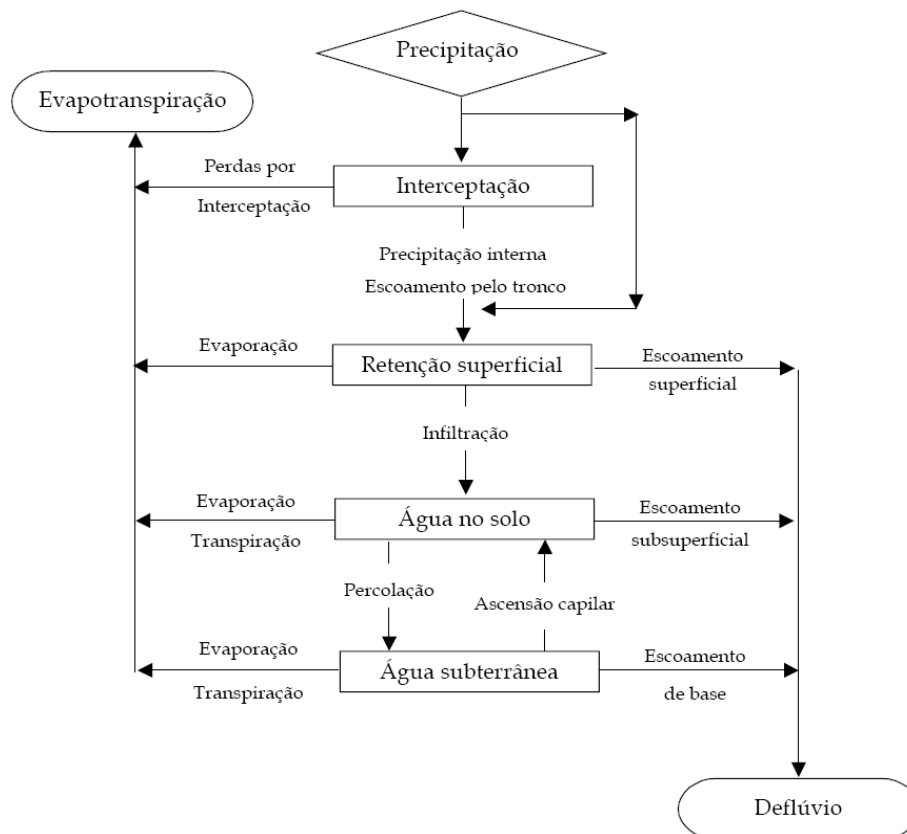


FIGURA 1 Esquema da diversidade de processos relacionados ao ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica. Adaptado de Ferreira (2004).

2.2 Recursos hídricos

A gestão sustentável dos recursos hídricos e a conservação dos sistemas naturais constituem desafios para a sociedade brasileira, que deve levar em conta vários fatores relacionados às condições sociais e econômicas do país (Tucci et al., 2003). Segundo Tucci (2001), o Brasil apresenta 80% da população em áreas urbanas, podendo chegar a 90% nos estados mais desenvolvidos. Este contingente populacional demanda quantidade significativa de água, o que tem

sido suficiente para estabelecer conflito entre o uso da água para a agricultura e o abastecimento humano nestas regiões.

De acordo com Setti et al. (2001), o potencial hídrico do Brasil corresponde a 12% do total mundial e a 53% da América do Sul, além de possuir a maior bacia hidrográfica do mundo (Rio Amazonas). Apesar deste potencial hídrico, a distribuição da disponibilidade de água não é homogênea entre as regiões, apresentando 68%, 16%, 7%, 6% e 3%, nas regiões Norte, Centro-Oeste, Sul, Sudeste e Nordeste, respectivamente. Para estes autores, a escassez hídrica no Brasil ocorre também em função do crescimento exagerado das demandas localizadas, principalmente pelos processos de urbanização e industrialização.

Segundo relatos de Correia (2003), a crise mundial da água será uma das manifestações mais dramáticas da crise ambiental e social do mundo. Esta afirmação é baseada na pressuposição de que 100 L de água habitante⁻¹ dia⁻¹ representa o requisito mínimo para suprir as necessidades, considerando um nível adequado de saúde, o que não ocorre, atualmente, em diversos países do mundo.

2.3 Conceito e classificação dos modelos hidrológicos

A modelagem é uma ferramenta que busca a representação da realidade, de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, visando ao entendimento de seu comportamento, transformação e/ou evolução (Tucci, 2005). Ainda de acordo com este autor, a utilização desta ferramenta propicia a compreensão dos sistemas e a projeção de situações futuras, correlacionando-as às condições atuais e passadas, auxiliando as decisões a serem tomadas e implementadas.

A utilização de um modelo matemático do tipo hidrológico, de acordo com Moreira (2005), está baseada em três condições fundamentais: (i) objetivos

do estudo, (ii) dados disponíveis e (iii) metodologia proposta. O objetivo do estudo define o nível de precisão desejado para a representação dos fenômenos que ocorrem na bacia hidrográfica. Em contrapartida, esta precisão depende da quantidade e da qualidade dos dados disponíveis para aferir a metodologia.

Os modelos podem ser classificados, conforme Tucci (2005), sob diferentes aspectos. Comumente, são classificados, dentre outras formas, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), tipo de relações entre essas variáveis (empíricas ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos) e a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

Magalhães (2005) e Moreira (2005) tecem os seguintes comentários a respeito da classificação dos modelos hidrológicos. Um modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Caso os conceitos de probabilidade sejam negligenciados durante a elaboração de um modelo, este será denominado determinístico. Note-se, no entanto, que uma variável de entrada pode ser aleatória, mas o modelo, ainda assim, será determinístico quando cada valor de entrada produz um único valor de saída. Os modelos podem ser empíricos quando utilizam relações baseadas apenas em observações.

Em geral, estes modelos são úteis no dia a dia. No entanto, são pouco robustos, uma vez que são específicos para a região nas quais as relações foram estimadas. Além disso, os modelos empíricos não possibilitam fazer simulações de mudanças em condições para as quais o modelo não previu, tais como chuvas extremamente altas, mudança de uso de solo, etc. Modelos baseados nos processos (conceituais) são mais complexos que os empíricos, uma vez que procuram descrever todos os processos que envolvem determinados fenômenos

estudados. Os fenômenos naturais variam continuamente no tempo. Na maioria das vezes, estes fenômenos são representados por modelos discretos.

A escolha do intervalo de tempo (passo de simulação) no qual o modelo será executado depende, basicamente, do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados, dos recursos computacionais disponíveis e da precisão desejada nos resultados. Normalmente, quanto menor o intervalo de tempo, maior será a precisão dos resultados, aumentando também o custo computacional para a geração desses resultados. Em modelos concentrados, considera-se que todas as variáveis de entrada e saída são representativas de toda a área, enquanto que os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial para todas as variáveis. Modelos distribuídos mais realistas consideram também a existência de relação espacial entre os vizinhos. Finalmente, em modelos estacionários, os quais descrevem o fenômeno em determinado momento, os parâmetros não variam com o tempo. Já nos modelos dinâmicos, os parâmetros podem variar no tempo, sendo, portanto, as variáveis função do tempo.

2.4 Modelagem em bacias hidrográficas

A necessidade de se evitar danos causados por eventos extremos, de conhecer os impactos da urbanização em uma bacia hidrográfica antes que eles ocorram, a tomada de decisão e o planejamento de usos e/ou de ocupações futuras do solo, bem como a adoção de medidas mitigadoras de impactos, dentre outros, são alguns dos motivos que fazem com que modelos hidrológicos sejam aplicados em bacias hidrográficas.

Em virtude da complexidade e da relevância de problemas ambientais e da carência de informações, muitos têm sido os modelos aplicados, como forma de buscar conhecimento escasso ou, até mesmo, inexistente, principalmente em regiões tropicais, tendo as bacias hidrográficas como áreas de aplicação. Dentre estes, podem-se citar: Silva et al. (2008), que modelou conceitualmente (modelo

de Nash) o escoamento superficial e a erosão hídrica utilizando a equação universal de perda de solo (EUPS) na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG; Viola (2008), que fez simulação hidrológica nas bacias de drenagem para o reservatório da UHE de Camargos/CEMIG; Manzione et al. (2007), que desenvolveram uma modelagem das incertezas na análise espaço-temporal dos níveis freáticos em uma bacia hidrográfica; Mello et al. (2007), que simularam o deflúvio e a vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero; Collischonn (2006), que trabalhou com precipitações estimadas pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído; Avanzi (2005), que modelou o escoamento superficial e erosão hídrica em uma microbacia hidrográfica na região dos tabuleiros costeiros do Espírito Santo; Pinto (2005), que estudou indicadores climáticos para a previsão de vazões de longo termo na bacia hidrográfica do Rio São Francisco; Moreira (2005), que desenvolveu uma modelagem hidrológica do tipo chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros; Magalhães (2005), que trabalhou com um modelo integrado para a simulação de sistemas hídricos; Ferreira (2004), que realizou simulação hidrológica utilizando modelo TOPMODEL em bacias hidrográficas rurais, estudo de caso na bacia do Ribeirão dos Marins, na região centro oeste de SP; Machado (2002), na simulação de escoamento e produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando de modelagem e geoprocessamento e Collischonn (2001), com simulação hidrológica de grandes bacias, dentre outros.

Ferreira (2004) utilizou o modelo TOPMODEL para simulação hidrológica na bacia hidrográfica rural do ribeirão dos Marins, região centro-oeste de SP, onde a cultura da cana-de-açúcar ocupava 52% da área e 6,3% estava protegida com mata ciliar. Este autor Concluiu que o modelo não apresentou qualidade satisfatória para eventos de chuva menores que 20 mm,

apresentando, também, tendência a superestimar os volumes dos escoamentos superficiais.

A modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, feita por Silva (2006), para os usos atuais e diferentes cenários de ocupação, indicou que a bacia não se apresenta com elevadas taxas de erosão, exceto para glebas ocupadas por eucalipto e pastagem em Cambissolos. No tocante a novos cenários de ocupação, caso esta venha a ser ocupada com eucalipto e cultivo convencional de milho, as taxas de perda de solo podem superar os limites toleráveis, principalmente nos Cambissolos e no Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. Com relação ao escoamento superficial, constatou-se que o escoamento subterrâneo apresentou elevada magnitude, mostrando que a referida bacia hidrográfica apresenta alto potencial para recarga de seus aquíferos.

2.5 Variáveis utilizadas nas simulações em bacias hidrográficas

Segundo Tucci (2005), a palavra “variável”, diz respeito a um valor que descreve, quantitativamente, um fenômeno, variando no espaço e ou no tempo. A vazão, por exemplo, é uma variável que descreve o comportamento do escoamento. Para Goldenfum (2001), as observações em bacias hidrográficas devem ser efetuadas durante períodos longos de tempo e em combinações com estudos climáticos, pedológicos, geológicos e hidrogeológicos. Geralmente, são agrupadas em climáticas e hidrológicas, vegetativas e pedológicas. O grupo de variáveis a ser monitorado depende dos objetivos de cada estudo, consistindo, obrigatoriamente, dados climáticos e de vazão num sistema hídrico.

2.5.1 Variáveis climáticas e hidrológicas

Neste grupo, de acordo com Goldenfum (2001), incluem-se as precipitações, estando implícitos sua duração, intensidade e frequência,

temperatura e umidade do ar, temperatura do solo, radiação solar, direção e velocidade do vento, quantificação das águas superficiais, evaporação e evapotranspiração. As variáveis climáticas e hidrológicas podem ser coletadas por diversos instrumentos, a depender dos recursos humanos e financeiros disponíveis para a sua aquisição e do nível de precisão que se deseja trabalhar com cada uma destas variáveis.

Nos trabalhos de Silva (2006) e Avanzi (2005), utilizou-se estação meteorológica automática para coletar informações referentes às precipitações (registro, intensidade e duração) e linígrafos para registrar a lâmina d'água no canal principal, sendo, posteriormente, convertida em vazão, empregando-se a curva chave das respectivas seções. No trabalho de Ferreira (2004), para registro das precipitações, utilizaram-se pluviógrafos e pluviômetros e também curvas chaves para transformar a lâmina do Ribeirão dos Marins em vazão. Neste mesmo trabalho, para o cálculo da evapotranspiração potencial pelo método de Penman-Monteith-Padrão-FAO, utilizaram-se dados coletados por estação meteorológica automatizada instalada no campus da Escola Superior de Agricultura Luis de Queiros, Piracicaba, SP. Moreira (2005) utilizou dados de precipitação, vazão e evaporação provenientes de estações automáticas telemétricas operadas pela SUDERHSA e da estação meteorológica operada pelo IAPAR/UFPR.

2.5.2 Variáveis associadas à cobertura vegetal

A vegetação é responsável pela interceptação das precipitações e proteção do solo contra a ação direta das gotas de chuva, evitando, assim, o desprendimento e o arraste de partículas (Lima et al., 2003). Como variáveis pertencentes a este grupo, podem-se citar o índice de área foliar (IAF, $m^2 m^{-2}$), a fração do solo coberta pela vegetação (FSCV, valor decimal) e a altura das plantas/cultivo e da vegetação natural (h, em m). Destas, apenas o índice de área

foliar e a fração do solo coberta pela vegetação são utilizadas para simulação do escoamento superficial direto pelo LISEM (Jetten, 2002).

Segundo Jetten (2002), para simulação com o LISEM, os valores de IAF, FSCV e h podem variar de 0 a 12, 0 a 1 e 0 a 30, respectivamente. Em trabalho realizado por Takken et al. (1999), para avaliação do LISEM, em bacia hidrográfica agrícola de 290 ha, vegetada com chicória, milho, beterraba doce, cobertura alta, batata, cenoura, gramado, pomar e bosque, foram adotados, respectivamente, os valores de 0,10; 0,15; 0,50; 1,50; 0,40; 0,10; 1,86; 10,0 e 11,0 para IAF, não sendo informado o estágio de desenvolvimento no qual se encontravam os diferentes cultivos.

Hessel et al. (2003b) simularam a erosão do solo em diferentes cenários, na bacia hidrográfica agrícola de Danangou, com área de 3,5 km², situada na província de Shaanxi, China, ocupada com cultivos anuais, pomares, arbusto/bosque, gramíneas naturais e legumes. Adotaram, para estes usos, os seguintes valores do IAF: 1,64; 3,20; 7,37; 0,60 e 1,64; para a FSCV: 0,38; 0,28; 0,88; 0,52 e 0,38 e para a h: 0,68; 3,66; 6,50; 0,38 e 0,68, respectivamente. Em trabalho realizado por Hessel et al. (2003a) nesta mesma área, com o objetivo de calibrar o modelo LISEM, foram adotados, para as matas nativas, os valores de 1,63; 0,35 e 13,6, para IAF, FSCV e h, respectivamente.

Caruzzo & Rocha (2000) avaliaram o IAF em pastagem formada com gramínea *Brachiaria brizantha* com altura média da forrageira de 16,34 cm e relataram IAF médio de 2,63 m² de vegetação por m² de área, com desvio padrão de $\pm 0,77$. Para Fagundes et al. (2005), o IAF da *Brachiaria decumbens* mantida a altura dos perfilhos a 20 cm e adubada com nitrogênio é: 3,99 m² m⁻² (verão); 3,21 m² m⁻² (outono); 1,86 m² m⁻² (inverno) e 2,67 m² m⁻² (primavera), com estes índices aumentando linearmente com a dose de nitrogênio aplicada a partir de 75 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N. Conforme Lupinacci (2002), há estabilização do IAF da *Brachiaria brizantha* a partir da altura de 20 cm para os perfilhos, pois, 97% da

luz incidente é interceptada pelo dossel, resultando na sua estabilização. Ainda de acordo com este autor, para os meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, o IAF da *Brachiaria brizantha* é $2,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$; $3,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$; $4,9 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $3,1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente.

No que se refere ao cultivo do milho, de acordo com Manfron et al. (2003), este apresenta IAF máximo entre 60 e 75 dias após a semeadura (DAS), quando atinge o seu máximo em desenvolvimento vegetativo, mantendo-se assim até 75 a 90 dias, quando, então, começa a decrescer em função da senescência das folhas. São apresentados, por estes autores, três modelos quadráticos para estimativa do IAF em função da altura da planta (cm), para os híbridos F-5013 (IAF_{máximo} de $8,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, com h de 130 cm aos 75 DAS), BR-206 (IAF_{máximo} de $6,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, com h de 150 cm aos 75 DAS) e P-4071 (IAF_{máximo} de $6,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, com h de 150 cm aos 75 DAS), cultivados no espaçamento de 0,9 m entre linhas e com população de 60.000, 50.000 e 50.000 plantas ha^{-1} , respectivamente.

Favarin et al. (2002) avaliaram o IAF para a cultura do café em uma lavoura da cultivar Mundo Novo IAC 388-17, enxertada na cultivar Apatã IAC 2258, plantada com espaçamento de 2,5 x 1,0 m e densidade populacional de 4.000 plantas ha^{-1} , do 15° ao 35° mês após o plantio. Estes autores utilizaram método destrutivo para o acompanhamento da variação temporal do índice de área foliar, em função da altura (ht) e da arquitetura da parte aérea da planta (diâmetro inferior, Di; diâmetro médio, Dm; diâmetro superior do dossel, Ds e a altura de inserção do primeiro par de ramos, hi), bem como a altura do dossel da planta (Hd). Concluíram que o volume e a área lateral do dossel do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) e, conseqüentemente, a altura e o diâmetro da seção inferior do dossel (copa do café) podem ser utilizados para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. De acordo com estes mesmos autores, utilizando-se a variável

volume do dossel, o IAF do cafeeiro, aos 15, 20, 25 e 35 meses após o plantio, foi de $0,24 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, $0,74 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, $1,60 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $3,37 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente.

O índice de área foliar é variável ao longo do ano, em função das próprias características da vegetação. Isto porque, de acordo com Xavier et al. (2004), uma floresta semidecidual (subcaducifólia), apresenta queda das folhas das árvores para parte das espécies durante um período do ano, ocasionando, conseqüentemente, variações significativas no seu IAF. São apresentados, na Tabela 1, os valores de IAF para uma floresta tropical ripária ao longo do ano, localizada na bacia hidrográfica do ribeirão dos Marins, município de Piracicaba, SP, obtidos de Xavier (2000).

TABELA 1 Variação mensal do IAF ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) para floresta ripária, localizada na bacia hidrográfica do ribeirão dos Marins, município de Piracicaba, SP.

Variável	Meses											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
IAF	3,2	3,2	2,8	2,5	2,4	2,5	2,6	1,9	1,7	2,8	2,9	3,1

Adaptado de Xavier (2000).

2.5.3 Variáveis associadas aos aspectos pedológicos

Na simulação hidrológica, o solo é um constituinte fundamental, sendo também o que contribui com o maior número de variáveis em determinados modelos. De acordo com Jetten (2002), para o LISEM, na simulação do escoamento superficial direto, são requeridas as seguintes variáveis: rugosidade da superfície do solo (cm), coeficiente de atrito superficial do solo (n), fração de solo coberta com superfícies impermeáveis ou com a presença de pedras e afloramentos rochosos (se existirem), condutividade hidráulica saturada do solo (k_{sat}), umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação (θ_{ap}), parâmetros do solo relacionados com o modelo de infiltração a ser utilizado na simulação e espessura da camada de solo considerada.

A rugosidade da superfície do solo é uma variável importante nos sistemas de manejo com caráter conservacionista (Castro et al., 2006). Isto se deve, segundo estes autores, ao fato de que a rugosidade superficial aumenta a retenção e a infiltração superficial de água no solo, reduz a velocidade e o volume do escoamento superficial direto e aprisiona os sedimentos da erosão, diminuindo os danos causados pela erosão hídrica. Para estes autores, a rugosidade superficial é fruto do preparo e do manejo do solo, da existência ou não de cobertura morta sobre sua superfície (proteção contra a ação da chuva) e, dependendo da combinação destes fatores, pode variar de 1,72 cm a 6,10 cm.

Takken et al. (1999) apresentam a rugosidade superficial do solo no sentido paralelo e perpendicular ao gradiente de declividade, em função do seu uso. Para gramados, pomares e bosques, seus valores tanto no sentido perpendicular quanto paralelo ao gradiente de declividade sugeridos por estes autores, são 0,70 cm, 0,73 cm e 1,36 cm, respectivamente. Para as culturas do milho, da batata e da cenoura, os valores sugeridos para a rugosidade superficial do solo foram 1,14 cm, 1,68 cm, 1,17 cm, 8,16 e 0,99 cm e 1,32 cm, nos sentidos paralelo e perpendicular ao gradiente de declividade, respectivamente.

O coeficiente de atrito superficial (n) expressa a resistência que a superfície do solo oferece ao fluxo superficial, podendo ser obtido em função do gradiente de declividade, empregando-se regressão linear conforme Hessel et al. (2003c). De acordo com Jetten (2002), como variável de entrada para o LISEM, pode haver valores compreendidos entre 0,001 a 10. Segundo Takken et al. (1999), o coeficiente de atrito superficial do solo (n) é variável em função do uso do solo, pois, assim como a rugosidade superficial, ele também é influenciado pelo preparo e manejo deste. Os valores utilizados por estes autores, em trabalho com o LISEM, foram: 0,08 (milho), 0,227 (gramados), 0,30 (pomares e bosques), 0,14 (batata) e 0,116 (cenoura). Hessel et al. (2003b) utilizaram 0,092 para pomares, 0,184 para arbustos e bosques e 0,091 para gramíneas. Os valores

diferem entre si, mas isto se deve ao fato do mesmo ser, também um parâmetro de calibração.

2.6 O LISEM

O LISEM, disponível gratuitamente em site³, de acordo com De Roo et al. (1996a), pode ser usado para planejamento, simulação e propósitos de conservação do solo, sendo um modelo fisicamente fundamentado e completamente incorporado a um sistema de informações geográficas (SIG).

A vantagem da utilização de um SIG, conforme De Roo et al. (1996b), é a de que ele facilita a aplicação do modelo em bacias hidrográficas de maior porte, pois, por se tratar de um modelo distribuído, trabalha com informações de variabilidade espacial, o que resulta em um grande volume de informações. Estes autores exemplificam este fato comentando que a simulação de uma bacia hidrográfica de 45 ha com resolução de 10 m x 10 m seriam necessárias 4.500 células para representá-la, sendo igual, o número de informações para cada uma das variáveis de entrada, o que tornaria inviável a utilização do modelo, se os dados fossem informados de maneira convencional.

Segundo De Roo et al. (1989) e De Roo (1993), outras razões para incorporar um SIG em modelos distribuídos que trabalham com informações hidrológicas são: processos como escoamento superficial direto e erosão do solo variam espacialmente, de forma que o tamanho das células deve permitir a identificação da variação espacial do solo, facilitando a sua representação; quase todas as variáveis de contribuição do LISEM podem ser medidas no campo ou em laboratório, como por exemplo, as variáveis condutividade hidráulica saturada, índice de área foliar, umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação, dentre outros.

³ <http://www.itc.nl/lisem>

O desenvolvimento e a estrutura do LISEM são baseados nas experiências com os modelos ANSWERS e SWATRE (De Roo et al., 1989 e De Roo, 1993), mas as descrições dos processos foram alteradas.

Jetten (2002) comenta que os processos incorporados ao modelo são: precipitação, interceptação da precipitação pela vegetação, armazenamento de água na superfície do solo em microdepressões, infiltração da água no solo, movimento vertical de água no solo, fluxo de água na superfície do solo, fluxo de água em canais e capacidade de transporte do fluxo de água na superfície do solo e em canais. São tratadas ainda, influências importantes, como compactação do solo por tráfego de máquinas agrícolas e a existência de áreas impermeáveis, como estradas asfaltadas e afloramentos rochosos.

De acordo com De Roo et al. (1996b), no que se refere à aquisição de informações topográficas (gradiente de declividade, direção da rede de drenagem, largura de estradas, áreas compactadas e locação de canais), parece não ter nenhum problema. As dificuldades são descritas para variáveis como condutividade hidráulica saturada das várias unidades pedológicas e umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação, pois, são dados de difícil obtenção. Segundo estes autores, freqüentemente, um número limitado de valores para informações desta natureza é medidos e, posteriormente, interpolado de uma maneira ou de outra, a fim de contemplar sua distribuição espacial.

Quanto à validação do LISEM, De Roo et al. (1996b) relatam que não foi feita somente uma comparação entre os dados simulados e medidos. Primeiramente, fez-se uma validação das equações matemáticas utilizadas. Nesta fase, conferiu-se se as suposições feitas sobre o sistema real pelo modelo são razoáveis e se o modelo reflete as características essenciais destes sistemas, verificando-se o comportamento real do sistema simulado pelo modelo, o que permite sua aplicação adequadamente.

Uma análise de sensibilidade do LISEM foi executada por De Roo et al. (1996b), aumentando e diminuindo cada variável e parâmetro de entrada em 20%, com o intuito de examinar os resultados da simulação do LISEM. A análise mostrou que a condutividade hidráulica e a umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação são as variáveis mais sensíveis do modelo. O gradiente de declividade e a rugosidade da superfície também são variáveis importantes, mas não como as duas primeiras. O potencial matricial da frente de molhamento mostrou-se menos importante. Contudo, este atributo pode variar em até 1.000%, em alguns casos. Ainda segundo estes autores, o coeficiente de atrito superficial (n) e a rugosidade da superfície do solo influenciam fortemente na produção de sedimentos.

De acordo com Hessel et al. (2003a), o modelo digital de elevação do terreno assume grande importância, visto que todas as informações referentes à bacia são derivadas dele. Quando se têm áreas com declives acentuados, escarpas e paredões, o modelo digital de elevação não os representa de forma adequada e pode induzir a erros nas simulações realizadas pelo LISEM, diminuindo-se, assim, sua precisão.

2.7 Descrição do LISEM para simulação do escoamento superficial direto

O LISEM, conforme Jetten (2002), foi implementado com base na linguagem do SIG PCRaster. O PCRaster, desenvolvido na Universidade de Utrecht (Holanda) e agora apoiado pela empresa PCRaster Environmental Software, é um sistema de modelagem dinâmica para modelos distribuídos de simulação (no formato raster), constituindo um SIG gratuito, dispondo de um conjunto de ferramentas computacionais para armazenamento, manipulação, análise e acesso de informações geográficas. O LISEM faz uso das bibliotecas do PCRaster e também de sua poderosa calculadora, que permite incluir qualquer equação matemática lógica ao modelo. As grandes vantagens do PCRaster, de

acordo com Jetten & Jong (2006), são: 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 de acordo com a necessidade, sem precisar dominar uma linguagem de programação convencional.

A descrição do LISEM, feita a seguir, está de acordo com Jetten & Jong (2006), Jetten (2002) e De Roo et al. (1996a e 1996b).

2.7.1 Precipitação

As informações referentes aos eventos de precipitação são salvas em um arquivo de texto (série temporal) contendo, em uma coluna, os dados referentes aos incrementos de tempo (minutos) e, na outra, a intensidade de precipitação (em mm h^{-1}). Caso haja mais de uma estação meteorológica instalada na bacia hidrográfica, coletando informações climáticas, é necessário informar suas respectivas coordenadas geográficas, para que sejam espacializadas as informações de precipitação para a área de influência de cada estação, o que possibilita o cálculo da precipitação média com base nos polígonos de Thiessen. Para cada incremento de tempo durante a simulação de um evento de precipitação, o modelo gera um mapa com a distribuição espacial da intensidade de chuva, usando uma única declaração (função), a qual utiliza um mapa de identificação das estações meteorológicas em conjunto com a série temporal de precipitação. Assim, é possível informar ao modelo tanto a variabilidade espacial quanto temporal da chuva.

2.7.2 Interceptação

A interceptação pela cobertura vegetal é simulada calculando-se a capacidade de armazenamento máxima da vegetação (SMAX) que ocorrerá

durante a precipitação. A capacidade máxima de interceptação é calculada pela seguinte equação:

$$S_{\max} = 0,935 + 0,498 \times IAF - 0,00575 \times IAF^2 \quad (1)$$

em que S_{\max} é a capacidade máxima de armazenamento (mm), e IAF é o índice de área foliar ($m^2 m^{-2}$).

A interceptação acumulada durante a chuva é simulada usando a equação abaixo:

$$S = c_p \times S_{\max} \times \left[1 - e^{-k \times \frac{P_{cum}}{S_{\max}}} \right] \quad (2)$$

em que S é a interceptação acumulada (mm), C_p é a fração de cobertura da vegetação (decimal), P_{cum} é a precipitação acumulada (mm) e k é o fator de correção para densidade de vegetação calculado por:

$$K = 1 - 0,046 \times IFA \quad (3)$$

Esta equação simula a interceptação acumulada antes do armazenamento máximo nas folhas (S_{\max}) ser alcançado. Da equação da interceptação acumulada, a interceptação em um dado incremento de tempo é calculada subtraindo a S no tempo (t-1) de S no tempo (t).

2.7.3 Infiltração de água no solo

No que diz respeito ao processo de infiltração de água no solo, a escolha do modelo que a representará é feita, principalmente, em função dos dados disponíveis para a simulação e em função da experiência do usuário. Ao se fazer a opção por um dos modelos que descrevem o processo de infiltração de água no solo, o pesquisador fornecerá seus parâmetros de forma distribuída, para que se possam realizar as simulações.

Na interface de comunicação do LISEM, estão disponíveis, para o pesquisador, os seguintes modelos de infiltração de água no solo: (a) Swatre (aproximação por diferenças finitas da equação de Richards); (b) Holtan; (c) Green e Ampt (1 e 2 camadas); (d) Morel e Seytoux e (e) subtração da condutividade hidráulica saturada.

2.7.4 Armazenamento em depressões

A rugosidade da superfície do solo é variável e usada como uma medida do microrrelevo. O armazenamento em microdepressões é simulado por uma equação que utiliza a rugosidade da camada superficial do solo como o principal parâmetro, obtida pela seguinte equação:

$$MDS = 0,243 \times RR + 0,010 \times RR^2 - 0,012 \times RR \times S \quad (4)$$

em que MDS é o armazenamento máximo de água nas depressões (cm), RR é a rugosidade da camada superficial do solo (cm) e S é a declividade do terreno (%).

Além da disponibilidade de água para escoamento superficial direto, a rugosidade também determina a largura do fluxo superficial de água no LISEM. A largura de fluxo não é considerada igual à largura da célula, mas é assumida como sendo linearmente relacionada à fração de superfície alagada (f_{pa}) na célula, dada pela seguinte expressão:

$$f_{pa} = 1 - \exp(-ah) \quad (5)$$

em que a é um parâmetro empírico, variando entre 0,04 e 1,8, e h é a lâmina de água na superfície (mm). O parâmetro “a” é estimado por:

$$a = 1,406 \times (10RR)^{-0,942} \quad (6)$$

2.7.5 Escoamento superficial direto e em canais

Para a distribuição do fluxo sobre a superfície do solo e em canais o modelo emprega soluções de diferenças finitas do modelo da onda cinemática, juntamente com a equação de Manning. A descrição numérica destes processos são encontradas em Chow et al. (1988) e Moore & Foster (1990).

2.7.6 Estradas e canais

Estradas e áreas compactadas pelo tráfego de máquinas agrícolas, menores que o tamanho da célula considerada, são incorporadas aos mapas, mediante informações de suas dimensões e localização dentro da área trabalhada. Para as estradas, o modelo considera a infiltração e o salpicamento iguais a zero. O movimento de água no solo é simulado separadamente, pois as propriedades físicas do solo diferem das demais regiões por causa de sua compactação. A água e o fluxo de sedimento em canais são simulados separadamente, utilizando-se o coeficiente de atrito superficial (n), largura do canal, gradiente de declividade do canal e a forma da seção transversal do canal que também devem ser informadas.

2.7.7 Crostas e pedras na superfície

A infiltração em áreas com encrostamento na superfície pode ser simulada usando dados adicionais de condutividade hidráulica destas. Em um mapa, é informada a percentagem (dentro de uma célula) de solos com encrostamento. A equação de Richard é aplicada para ambas as partes do solo, ou seja, com e sem crostas na superfície. A fração coberta com pedras ou afloramentos rochosos (dentro de uma célula), também pode ser informada por um mapa usado apenas para este fim. A versão atual do LISEM simula considerando estas informações, ou seja, considera que nenhum sedimento será

produzido nesta área, assim como também não ocorrerão infiltração e interceptação pela vegetação.

2.8 Procedimentos de calibração do LISEM

A calibração do LISEM, de acordo com Jetten (2002), deve ser iniciada pela vazão de pico, pois este é o parâmetro chave para o bom desempenho de calibração do modelo. A obtenção de outros parâmetros, como a produção total de sedimentos, a lâmina que se converte em escoamento superficial direto e o índice C de escoamento superficial, dentre outros, utiliza direta ou indiretamente, o valor de calibração da vazão de pico ou o formato da hidrógrafa derivado dela, tornando-a imprescindível no processo (De Roo & Jetten, 1999).

Nos procedimentos de calibração do LISEM, sempre que possível, deve se atentar, ainda, para que o início do escoamento superficial direto e a ocorrência da vazão de pico da hidrógrafa simulada aconteçam no mesmo intervalo de tempo da hidrógrafa observada, o que possibilita a avaliação de desempenho do modelo por uma função objetivo, como o coeficiente de Nash-Sutcliffe-Sutcliffe. No entanto, a ocorrência de translação da hidrógrafa simulada em relação à observada (antecipação ou retardamento do início do escoamento superficial direto e da vazão de pico) é comum, o que tem inviabilizado a aplicação deste coeficiente para avaliar o LISEM, pois este trata apenas do escoamento superficial direto (Hessel et al., 2003a).

No trabalho realizado por Elsen et al. (2003), para uma bacia hidrográfica com área total de 3,5 km², o monitoramento da umidade antecedente do solo aos eventos de precipitação foi feito por 29 baterias de sensores tipo TDR, instalados horizontal e verticalmente a diferentes espessuras, em função do uso e da ocupação do solo e do gradiente de declividade, programados para fazer leituras a cada 12 horas. Nesse trabalho, a variação da lâmina d'água na seção de controle foi mensurada a intervalos de 5 minutos, por calha equipada com sensor

ultra-sônico com resolução de 2 mm. Na calibração do LISEM, para a bacia de Danangou, China, feita por Hessel et al. (2003a), foram utilizadas cinco equações de regressão para estimar a umidade antecedente do solo aos eventos de precipitação, as quais foram interpoladas em função da direção predominante do fluxo na superfície do terreno, sua declividade e também a espessura da camada de solo estudada.

Stolte et al. (2003) e Hessel et al. (2003a e 2003b) utilizaram valores estimados de condutividade hidráulica saturada ($k_{sat(est)}$) como sendo aqueles obtidos pela multiplicação da condutividade hidráulica saturada medida no campo por 0,75 mais 0,25 da condutividade hidráulica saturada obtida pelo método de Mualem-Van Genuchten, que emprega os parâmetros da curva de retenção de água no solo. Esse procedimento, segundo os autores, garante que a condutividade hidráulica saturada estimada ($k_{sat(est)}$) estará sempre entre a condutividade hidráulica saturada obtida no campo e a condutividade hidráulica saturada média estimada ($k_{sat(est)-média}$), o que permite a simulação sem a influência de valores extremos.

O coeficiente de atrito superficial (n) adotado para as simulações hidrológicas influencia a velocidade do escoamento superficial e, por consequência, a forma e o tempo de pico da hidrógrafa (Hessel et al., 2003c). Takken et al. (1999) adotaram valores de (n) em função do uso e da ocupação do solo, pois, segundo estes autores, os valores de (n) para glebas que recebem maior número de operações agrícolas para preparo do solo devem ser menores que aqueles de glebas ocupadas com pastagens, pomares ou florestas.

Conforme Jetten (2002), a espessura da camada de solo a ser considerada na simulação hidrológica com o LISEM pode chegar até a 1.000 mm, não devendo ultrapassar este valor. De Roo et al. (1996b) comentam que a espessura da camada de solo é variável em função de umidade antecedente ao evento de precipitação a ser calibrado. Segundo estes autores, o estabelecimento de camada

pouco espessa, com elevado teor de umidade do solo, pode superestimar a vazão de pico e o escoamento superficial direto, ao passo que, se apresentarem déficit hídrico, pode-se subestimá-los. Ainda segundo estes autores, no geral, menores espessuras das camadas, superestimam o escoamento superficial direto e a vazão de pico, enquanto maiores espessuras o subestimam em função de alterar a capacidade de armazenamnteo de água pelo solo.

2.9 Algumas aplicações do LISEM

Chaplot et al. (2005) utilizaram o LISEM para modelar a dinâmica inicial e o desenvolvimento da erosão em sulcos, em uma bacia hidrográfica de 0,62 km², com declividade média de 28%, altitude variando de 425 m a 718 m e gradientes de declividade oscilando entre 3% a mais que 350%, ao norte de Laos, França. Os autores tinham objetivos de investigar até que ponto um modelo SIG, baseado nos processos de interceptação da precipitação, armazenamento de água na superfície, infiltração de água no solo e escoamento superficial direto e, que utiliza informações topográficas, é útil para predizer o início e o desenvolvimento da erosão em sulcos em paisagens agrícolas. A bacia estava ocupada com culturas anuais (9,1%), pastagem (52,7%), pomar (12,2%) e floresta (26%) e os cenários trabalhados foram (i) aumento da área com cultivos anuais de 9,1% para 65% e 100% e (ii) diminuição da área com cultivos anuais para 0% e cobertura de 100% com floresta. Para o cenário de uso atual, foram registradas velocidades de fluxo nos canais na ordem de 0,037 m s⁻¹ à 0,062 m s⁻¹, com valores máximos próximos a 0,186 m s⁻¹ nos locais de maior declividade. Aumentando-se a área com cultivos anuais de 9,1% para 65% da superfície da bacia, registraram-se velocidades de fluxo ligeiramente superiores (0,062 m s⁻¹ a 0,112 m s⁻¹) e, com ocupação de 100% da bacia hidrográfica com culturas anuais, a velocidade máxima do fluxo foi muito alta (0,298 m s⁻¹ a 0,336 m s⁻¹), especialmente ao longo dos caminhos preferenciais do fluxo, definidos pelas

condições topográficas. Quando o uso do solo foi apenas a floresta, a velocidade de fluxo foi reduzida significativamente, não alcançando $0,0625 \text{ m s}^{-1}$. No que tange aos sulcos de erosão, o aumento da extensão da área com cultivos anuais de 9,1% para 65% incrementou o comprimento linear destes de 1.100 m para 2.860 m, com valor máximo de 7.700 m registrado quando a cobertura da bacia com culturas anuais alcançou os 100%. Isto correspondeu a um aumento de comprimento dos sulcos em 600%. Já para a ocupação florestal, não foi observado o desenvolvimento de sulcos lineares de erosão, evidenciando assim, segundo estes autores, a proteção que a ocupação florestal oferece aos recursos naturais solo e água.

O fluxo de água e o transporte de sedimentos de uma voçoroca, com área aproximada de $1.950,0 \text{ m}^2$, comprimento e largura do canal principal de 40,0 m e 30,0 m, respectivamente, inclinação dos taludes entre 40° a 60° e gradiente de declividade do fundo do canal variando de 32° e 40° , foram modelados por Stolte et al. (2003). Este autores obtiveram bom ajuste da hidrógrafa simulada quando utilizaram um valor de condutividade hidráulica igual a 75% do valor medido diretamente no campo, alcançando, assim, bom ajuste quando comparada à hidrógrafa mensurada, o que foi identificado de forma gráfica. Comentam, ainda, que erros entre as medições de campo e simulações feitas pelo LISEM podem ser oriundos da precisão de equipamentos utilizados nas mensurações, intervalos de tempo nos quais são coletadas as informações e, possivelmente, variações da descarga líquida. Isto, particularmente, segundo estes autores, é importante para eventos que promovem baixas vazões, pois o LISEM trabalha apenas com o escoamento superficial direto, o que induziria a erros nos processos de calibração e validação. Outras possíveis fontes de erros nas simulações deste trabalho em particular podem estar atreladas à forma do canal da voçoroca (paredes íngremes e profundidade), pois o LISEM faz uso de equações físicas padrões, sendo a maioria delas válida para declives mais suaves

e condições não tão extremas. Ao concluírem, relatam que, respeitando estas considerações, o LISEM pode ser usado satisfatoriamente.

O LISEM foi calibrado para três eventos de precipitação, cujas intensidades de precipitação foram de $69,9 \text{ mm h}^{-1}$, $47,2 \text{ mm h}^{-1}$ e $66,2 \text{ mm h}^{-1}$, respectivamente, por Hessel et al. (2003a), para uma bacia hidrográfica de $3,5 \text{ km}^2$, com altitude variando de 1.070 m a 1.370 m, sendo os seus principais usos: culturas anuais, 28%; solos improdutivos, 40% e outros cultivos, 32%. O gradiente de declividade na bacia, em certos trechos, era de até 250%, com as glebas cultivadas localizadas próximas ao canal principal, com declividade média ultrapassando os 50%, predispondo a referida bacia a altas taxas de erosão. Os autores relatam que o modelo antecipou a ocorrência da vazão de pico para os três eventos simulados e que as possíveis causas deste fato são: primeiro, poderia ser causado pelo efeito de sulcos e fissuras, o que facilita um fluxo preferencial, diminuindo o tempo de percurso do deflúvio e segundo, o gradiente de declividade, o que aumentaria a velocidade do fluxo, antecipando o tempo de pico. O LISEM simula o caminho percorrido pela água em função do modelo digital de elevação do terreno e quando este é muito íngreme, caso da referida bacia, o caminho simulado pode ser menor que o real, fazendo com que o modelo antecipe a vazão de pico em função do menor trecho percorrido pelo escoamento. A terceira possibilidade seria a contribuição do volume de água vindo da infiltração lateral, o que também anteciparia a descarga de pico, pois esta aumentaria o volume de água no canal principal. No que se refere à validação, quando foram utilizados os parâmetros de calibração do evento de intensidade de $47,2 \text{ mm h}^{-1}$ para validar os eventos de intensidade de precipitação de $69,9 \text{ mm h}^{-1}$ e $66,2 \text{ mm h}^{-1}$ os resultados apresentaram maiores erros, -9,25% e -25,0% para o tempo de pico; -99,77% e 99,73% para a vazão de pico e, 99,68% e 99,64% para o deflúvio total, respectivamente. Os autores associaram esta menor precisão dos resultados à diferença de intensidade da

precipitação dos eventos, pois, quando validaram o evento de 69,9 mm h⁻¹ com os parâmetros de calibração do evento de 66,2 mm h⁻¹, os erros foram de -11,31%, -14,69% e 9,87%, para o tempo de pico, vazão de pico e deflúvio total, respectivamente. Quando fizeram o contrário, ou seja, validaram o evento de 66,2 mm h⁻¹ com os parâmetros de calibração do evento de 69,9 mm h⁻¹, também obtiveram menores erros: -7,41%, 25,51% e 68,48% para o tempo de pico, vazão de pico e deflúvio total, respectivamente. Segundo os autores, isso comprova a importância do parâmetro intensidade das precipitações na calibração do LISEM.

Neste contexto, é razoável supor que a intensidade das precipitações deve ser um dos critérios considerados para os processos de calibração e validação do LISEM, ou seja, não é aconselhável, por exemplo, calibrar um evento com intensidade máxima de precipitação de 47,2 mm h⁻¹ e utilizar seus parâmetros para validar um evento cuja intensidade máxima de precipitação foi de 69,9 mm h⁻¹. Outras aplicações do LISEM são descritas em Liu et al. (2003), Hessel et al. (2003b), Takken et al. (1999) e De Roo & Jetten (1999).

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AVANZI, J.C. **Modelagem do escoamento superficial e erosão hídrica em uma microbacia hidrográfica na região dos Tabuleiros Costeiros**. 2005. 68p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- CARUZZO, A.R.; ROCHA, H.R. da. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) em regiões de pastagem e floresta com um método indireto (gap fraction) durante o Experimento AMC/LBA-1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira e Meteorologia, 2000. p. 2478-2485.
- CASTRO, L.G.; COGO, N.P.; VOLK, B.da.S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 339-352, 2006.
- 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**, Amsterdam, v. 63, n. 2, p. 318-328, 2005.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Applied hydrology**. Amsterdam: McGraw-Hill, 1988. 527p.
- COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. 2006. 128p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 194p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- CORREIA, M.L. A crise mundial da água e o papel da cooperação entre os países de língua oficial portuguesa na sua resolução. In: SIMPÓSIO DE HIDRAULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 6., 2003, Cabo Verde. **Anais eletrônicos ...** Cabo Verde, 2003. p. 1-15. Disponível em: <www.aprh.pt>. Acesso em: 23 maio 2007.

DE ROO, A.P.J. **Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems; validity and applicability of the 'ANSWERS' model in two catchments in the loess area of South Limburg, the Netherlands, and one in Devon -UK.** Utrecht: University of Utrecht, 1993. 302p. (Netherlands Geographical Studies, 157).

DE ROO, A.P.J.; HAZELHOFF, L.; BURROUGH, P.A. Soil erosion modelling using 'ANSWERS' and Geographical Information Systems. **Earth Surface Processes and Landforms**, Amsterdam, n. 14, p. 517-532, 1989.

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**, Amsterdam, v. 37, n. 3, p. 477-493, 1999.

DE ROO, A.P.J.; WESSELING, C.G.; RITSEMA, C.J. LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. **Hydrological Processes**, Amsterdam, v. 10, n. 8, p. 1107-1118. 1996a.

DE ROO, A.P.J.; OFFERMANS, R.J.E.; CREMERS, N.H.D.T. LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins: II. Sensitivity analysis, validation and application. **Hydrological Processes**, Amsterdam, v. 10, n. 8, p. 1119-1126, 1996b.

ELSEN, E. van den; XIE, Y.; LIU, B.; STOLTE, J.; WU, Y.; TROUWBORST, K.; RITSEMA, C.J. Intensive water content and discharge measurement system in a hillslope gully in China. **Catena**, Amsterdam, v. 54, n. 1, p. 93-115, 2003.

FAGUNDES, J.L.; FONSECA, D.M. da.; MISTURA, C.; MORAIS, R.V. de.; VITOR, C.M.T.; REIS, G. da. C.; CASAGRANDE, D.R.; SANTOS, M.E.R. Índice de área foliar, densidade de perfilhos e acúmulo de forragem em pastagem de capim-braquiária adubada com nitrogênio. **Brasil Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 62, n. 2, p.125-133, 2005.

FAVARIN, J.L.; DOURADO NETO, D.; GARCÍA, A.G.; NOVA, N.A.V.; FAVARIN, M. da. G.G.V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 769-773, jun. 2002.

FERREIRA, L. **Simulação hidrológica utilizando o modelo TOPMODEL em bacias rurais, estudo de caso na bacia hidrográfica do ribeirão dos Marins – seção Monjolinho – SP.** 2004. 205p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

GOLDENFUM, J.A. Pequenas bacias hidrológicas: conceitos básicos. In: PAIVA, J.B.D.de.; PAIVA, E.M.C.D.de. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 3-13.

GOMES, N. M. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do ribeirão Marcela na região do Alto Rio Grande, MG.** 2005. 124p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

HESSEL, R.; JETTEN, V.; BAOYUAN, L.; YAN, Z.; STOLTE, J. Calibration of the LISEM model for a small Loess Plateau catchment. **Catena**, Amsterdam, v. 54, n. 1, p. 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**, Amsterdam, v. 54, n. 1, p. 289-302. 2003b.

HESSEL, R.; JETTEN, V.; GUANGHUI, Z. Estimating Manning's n for steep slopes. **Catena**, Amsterdam, v. 54, n. 1, p.77-91. 2003c.

JETTEN, V.; DE JONG, S. **PCRaster course: erosion modeling – erosion simulation of the Ngoye Hills area (KwaZulu-Natal, RSA).** Amsterdam, Holanda: University Utrecht/Lavras: Universidade Federal de Lavras. Departamento de Ciências Florestais, 2006.

JETTEN, V. **LISEM user manual, version 2.x. Draft version January 2002.** The Netherlands: Utrecht University. Utrecht Centre for Environmental and Landscape Dynamics, 2002. 148p.

LIMA, J.M.de; NÓBREGA, J.C.A.; MELLO, C.R. de. **Erosão do solo e seu controle (teoria e prática).** Lavras: UFLA/FAEPE, 2003. 91p.

LIU, G.; XU, M.; RITSEMA, C. A study of soil surface characteristics in a small watershed in the hilly, gullied area on the Chinese Loess Plateau. **Catena**, Amsterdam, v. 54, n. 1, p. 31-44, 2003.

LUPINACCI, A.V. **Reservas orgânicas, índice de área foliar e produção de forragem em *Bracharia brizantha* cv. Marandu submetida a intensidade de pastejo por bovinos de corte.** 2002. 160p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

MACHADO, R.E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** 2002. 154p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

MAGALHÃES, L.P.C. de. **Modelo integrado para simulação de sistemas hídricos.** 2005. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

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. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 333-342, 2003.

MANZIONE, R.L.; DRUCK, S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. Modelagem de incertezas na análise espaço-temporal dos níveis freáticos em uma bacia hidrográfica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 25-34, jan. 2007.

MELLO, C.R. de.; LIMA, J.M.; SILVA, A.M. da. Simulação do deflúvio e vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 410-419, 2007.

MOORE, I.D.; FOSTER, G.R. Hydraulics and overland flow: In: ANDERSON, M.G; BURT, T.P (Ed.). **Process studies in hillslope hydrology.** Amsterdam, Holanda: J. Wiley, 1990. p. 215-254.

MOREIRA, I.A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros.** 2005. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidrológica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

PINTO, E.J. de. A. **Estudo de indicadores climáticos para a previsão de longo termo de vazões na bacia do Alto São Francisco.** 2005. 245p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Recurso Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

SETTI, A.A.; LIMA, J.E.F.W.; CHAVES, A.G.M.; PEREIRA, I.C. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. Brasília: ANEEL/ANA, 2001. 328p.

SILVA, D.D. da.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; AMORIM, R.S.S. Escoamento superficial para diferentes intensidades de chuva e porcentagens de cobertura num Podzólico Vermelho Amarelo com preparo e cultivo em contornos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 21, n. 1, p.12-22, jan. 2001.

SILVA, P.M. de. O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG**. 2006. 155p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

STOLTE, J.; LIU, B.; RSTSEMA, C.J.; ELSSEN, H.G.M. van den; HESSEL, R. Modelling water flow and sediment processes in a small gully system on the Loess Plateau in China. **Catena**, Amsterdam, v. 54, n. 1, p. 117-1130, 2003.

TAKKEN, I.; BEUSELINCK, L.; NACHTERGAELE, J.; GOVERS, G.; POESEN, J.; DEGRAER, G. Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). **Catena**, Amsterdam, v. 37, n. 3, p. 431-447, 1999.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3.ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2004. 943p.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2005. 678p.

TUCCI, C.E.M. Oportunidades de ciência e tecnologia em recursos hídricos. **Parcerias Estratégicas**, Brasília, v. 11, p. 103-126, 2001.

TUCCI, C.E.M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O. de M. Cenários da gestão da água no Brasil: uma contribuição para a “Visão Mundial da Água”. **Bahia Análise & Dados**, Salvador, v.13, p.357-370, 2003. Edição Especial.

VIOLA, M.R. **Simulação hidrológica nas bacias de drenagem para o reservatório da UHE de Camargos/CEMIG**. 2008. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

XAVIER, A.C.; VETTORAZZI, C.A.; MACHADO, R.E. Relação entre índice de área foliar e frações de componentes puros do modelo linear de mistura espectral, usando imagens ETM+/LANDSAT. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 421-430, maio/ago. 2004.

XAVIER, A.C. **Estimativa da dinâmica do índice de área foliar em uma microbacia hidrográfica por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 2000. 111p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiros”, Piracicaba, SP.

CAPÍTULO 2

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO HIDROLÓGICA DO MODELO LISEM PARA UMA BACIA HIDROGRÁFICA DA REGIÃO ALTO RIO GRANDE, MG

1 RESUMO

GOMES, Natalino Martins. Calibração e validação hidrológica do modelo LISEM para bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande – MG. In: _____. **Aplicação do LISEM (Limburg Soil Erosion Model) para simulação hidrológica em bacia hidrográfica tropical**. 2008. Cap. 2, p. 35 – 111. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG ⁴

O escoamento superficial direto (ESD), uma das principais etapas do ciclo hidrológico, fenômeno influenciado por diversos fatores, é um dos agentes responsáveis pela produção e o transporte de sedimentos no contexto de bacias hidrográficas, além de ser uma importante variável hidrológica requerida para trabalhos de engenharia. Assim, objetivou-se com este trabalho: calibrar e validar os parâmetros de entrada mais importantes do ponto de vista da gênese do ESD (umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação - θ_{ap} e espessura da camada do solo considerada para o armazenamento hídrico), para eventos de diferentes intensidades de precipitação – I_{max} ; verificar o potencial de aplicação do LISEM a bacias hidrográficas agrícolas tropicais, a fim de prever o seu comportamento hidrológico; avaliar a sensibilidade do modelo aos parâmetros calibrados e a eventos extremos. O LISEM apresentou alta sensibilidade a θ_{ap} , sendo este o seu principal parâmetro de calibração, obtida próximo à saturação. A espessura da camada de solo influencia a umidade ótima de calibração do LISEM. Não é confiável a simulação hidrológica de eventos isolados de precipitação utilizando-se parâmetros calibrados de outros eventos, mesmo que de igual intensidade. O LISEM não produziu resultados satisfatórios para eventos cuja I_{max} foi \leq à capacidade de infiltração de água no solo, mas apresentou resultados satisfatórios quando calibrado a eventos de precipitação cuja I_{max} foi $>$ que 30 mm h^{-1} . Em 82,5% dos casos, a vazão de pico foi estimada com erros menores que 3,0% para mais ou para menos.

⁴ Comitê de orientação: Antônio Marciano da Silva – DEG/UFLA (Orientador), Carlos Rogério de Mello – DEG/UFLA (Co-orientador).

2 ABSTRACT

Hydrological calibration and validation of the LISEM to a watershed of the Alto Rio Grande Region, MG. In: _____. **Applicability of the LISEM (Limburg Soil Erosion Model) for hydrological simulation at a tropical watershed.** 2008. Chap. 2, p. 35 - 111 Thesis (Doctor Science in Agricultural Engineering. Soil Water Engineering) – Federal University of Lavras, Lavras, MG⁵.

The surface runoff is one of the main responsible by production and sediment transport at a watershed, being a very important parameter applied to the dams and terraces design and soil erosion control. The objectives of this work were: 1 – to calibrate and validate the input parameters most relevant in terms of the surface runoff genesis (soil moisture antecedent to the rainfall events and soil layer depth of water budgeted) for different rainfall events; 2 - to verify the performance of LISEM to predict the hydrological behavior at a tropical agricultural watershed and; 3 - to evaluate the model sensitivity to the parameters calibrated and extreme rainfall events. The LISEM has presented high sensitivity to the soil moisture antecedent which is the most important parameters of calibration, verifying that the appropriated values are near to the soil moisture saturation. The LISEM calibrated for a specific condition of rainfall has not produced good performance whether applied to the different rainfall event. The application of LISEM considering rainfall intensities smaller than soil infiltration capacity has not been satisfactory in tropical conditions. However, for rainfall intensities greater than 30 mm h^{-1} , the model performance can be considered satisfactory, verifying that the peak discharges matched well to the observed values. In 82.5% of situations, the values of peak discharge have been over or under-estimated, with error less than 3%.

⁵ Guidance Committee: Antônio Marciano da Silva – DEG/UFLA and Carlos Rogério de Mello – DEG/UFLA.

3 INTRODUÇÃO

No contexto de bacias hidrográficas, o escoamento superficial representa a movimentação da água sobre a superfície do solo, podendo ser considerado como um dos mais importantes fatores no que tange ao manejo e à conservação dos recursos naturais solo e água.

O comportamento do escoamento superficial direto depende, essencialmente, da cobertura vegetal da bacia hidrográfica, de sua declividade e de sua rede de drenagem. Sua representação, em todos os detalhes complexa, é devido à grande heterogeneidade espacial presente neste ambiente (Tucci, 2005). O escoamento superficial direto é apontado como a principal forma de erosão hídrica (Silva, 2006) e, de acordo com Lima et al. (2003), grandes quantidades de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, além de húmus, microorganismos benéficos e parte do material do solo, são perdidos, irremediavelmente, pela ação direta deste.

A umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação (θ_{ap}) é uma das principais variáveis que governam processos hidrológicos no contexto de bacias hidrográficas (Western et al., 2004). Estes autores estudaram as correlações espaciais da θ_{ap} e sua relação com o domínio espacial de processos hidrológicos em pequenas bacias hidrográficas na Austrália, Islândia e Nova Zelândia. Concluíram que as condições topográficas, as frações texturais e a vegetação sobre as glebas, são os principais responsáveis pela variação espacial da θ_{ap} no contexto das bacias hidrográficas. As condições topográficas determinam o gradiente de declividade, o comprimento de rampa e a direção do fluxo, determinando assim, o tempo de deslocamento da água pelas vertentes da bacia hidrográfica. As propriedades físicas do solo (teores de silte, areia, argila, porosidade e estrutura), afetam a infiltração de água e sua redistribuição no perfil

do solo, por meio de sua condutividade hidráulica (condução de água) e capacidade de retenção de água, enquanto a vegetação contribui com a taxa de interceptação da precipitação pelo dossel e com a transpiração. Ainda segundo Western et al. (2004), esta combinação de fatores, afeta diretamente, o escoamento superficial direto que ocorre nas bacias hidrográficas.

Vários são os modelos hidrológicos, registrados na literatura, que tratam deste fenômeno. Entre eles, podem-se citar: SWAT (Soil and Water Assessment Tool), que vem sendo usado com frequência nos EUA (Machado, 2002); o método do CN-SCS (Curve Number – Soil Conservation Service), bastante difundido para simulação do escoamento superficial direto e muito utilizado no Brasil (Mello et al. 2007; Silva, 2006; Avanzi, 2005; Martins, 2005; Mello, 2003; Martins, 2001, dentre outros); o modelo TOPMODEL (Topographic Model), que utiliza a informação topográfica como o principal fator responsável pela produção do escoamento superficial direto, aplicado em bacias hidrográficas brasileiras por Ferreira (2004), Coelho (2003), Mine et al. (1996) e Schuler (1998), dentre outros, e, recentemente, o LISEM (Limburg Soil Erosion Model), muito utilizado como ferramenta de pesquisa em países como Holanda, Alemanha, Austrália, África do Sul, China e França, não sendo encontrados, ainda, registros de sua aplicação em bacias hidrográficas brasileiras.

O LISEM simula hidrológicamente o escoamento superficial direto e o transporte de sedimentos durante e imediatamente após um evento de precipitação e, até o momento, foi aplicado em bacias hidrográficas com área de 1 a 620 ha, permitindo, avaliar os efeitos do uso atual do solo, bem como, o impacto da adoção de práticas conservacionistas (Jetten, 2002). Este modelo pode ser utilizado para planejar usos e ocupação do solo, mas é, essencialmente, uma ferramenta de pesquisa, devido à sua complexidade e necessidade de muitos parâmetros de entrada. Uma mudança de cultivo, por exemplo, altera a rugosidade superficial do solo, a fração do solo coberta pela vegetação e o índice

de área foliar, modificando também todas as condições superficiais do solo nas quais acontecem o escoamento superficial direto e a produção e transporte de sedimentos (Jetten, 2002). Esta característica do LISEM fornece ao usuário grande flexibilidade e liberdade para modelar e simular tais processos, exigindo-lhe, porém, conhecimento aprofundado dos processos e variáveis envolvidas.

Diante do exposto, trabalhando com o LISEM, objetivou-se: calibrar os parâmetros de entrada mais importantes, do ponto de vista da gênese do escoamento superficial (umidade do solo antecedente a eventos de precipitação - θ_{ap} e a espessura da camada de solo considerada para o balanço hídrico) para eventos isolados de precipitação, tendo como variáveis respostas o próprio ESD e suas grandezas (formato da hidrógrafa, tempo de pico, vazão de pico e índice C de escoamento superficial); validar a aplicação do modelo para eventos de precipitação de diferentes intensidades; verificar o potencial de aplicação do modelo a bacias hidrográficas agrícolas tropicais para predizer o seu comportamento hidrológico e avaliar a sensibilidade do modelo aos parâmetros calibrados e a eventos extremos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, situada às proximidades da comunidade do Jaguará, Município de São João Del Rei, MG. Esse ribeirão drena área aproximada de 470 ha, à margem direita do córrego do Jaguará, que deságua diretamente no reservatório da usina hidroelétrica de Camargos/CEMIG. Situa-se entre as coordenadas geográficas 21°14'24'' e 21°15'54'' de latitude Sul e 44°29'24'' e 44°30'54'' de longitude

Oeste, estando inserida na unidade geomorfológica Planalto Campos das Vertentes, na região Alto Rio Grande, MG.

A bacia hidrográfica estudada encontra-se na Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRH) Alto Rio Grande (GD1). O Rio Grande, nasce no Estado de Minas Gerais, na serra da Mantiqueira, próximo à divisa com o estado do Rio de Janeiro, no Município de Bocaina de Minas, sendo um dos principais afluentes do Rio Paraná. Destaca-se, também, pela importância na produção de energia elétrica no contexto estadual e nacional. Após percorrer 1.300 km, recebe a afluência do Rio Paranaíba, na divisa dos Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, formando o Rio Paraná.

A inserção da bacia hidrográfica estudada no contexto regional, estadual, nacional e continental pode ser visualizada na Figura 1.

Predomina na bacia hidrográfica o LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico típico (LAd), ocupando cerca de 65% da área, ocorrendo tanto em locais de relevo suave ondulado nos topos e sopés das elevações, como nas encostas de relevos ondulados, locais de sua maior expressão. O LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd) está presente em 14% da área total da bacia hidrográfica, aparecendo mesclado dentro do LAd. Os Cambissolos (CXd), ocupando menos de 5%, estão presentes nos locais mais íngremes da bacia e os solos hidromórficos (RUd) compreendem as várzeas, com, aproximadamente, 17% da área da bacia (Giarola et al., 1997; Motta et al., 2001). A distribuição espacial das unidades pedológicas presentes na bacia hidrográfica pode ser observada na Figura 2.

Algumas características físicas das unidades pedológicas da bacia hidrográfica estão apresentadas na Tabela 1. Observa-se que a densidade dos solos encontra-se com valores superiores a $1,06 \text{ g cm}^{-3}$ e há forte predominância da fração textural argila ($> 59 \text{ dag kg}^{-1}$), fazendo com que sua textura seja classificada como argilosa a muito argilosa.

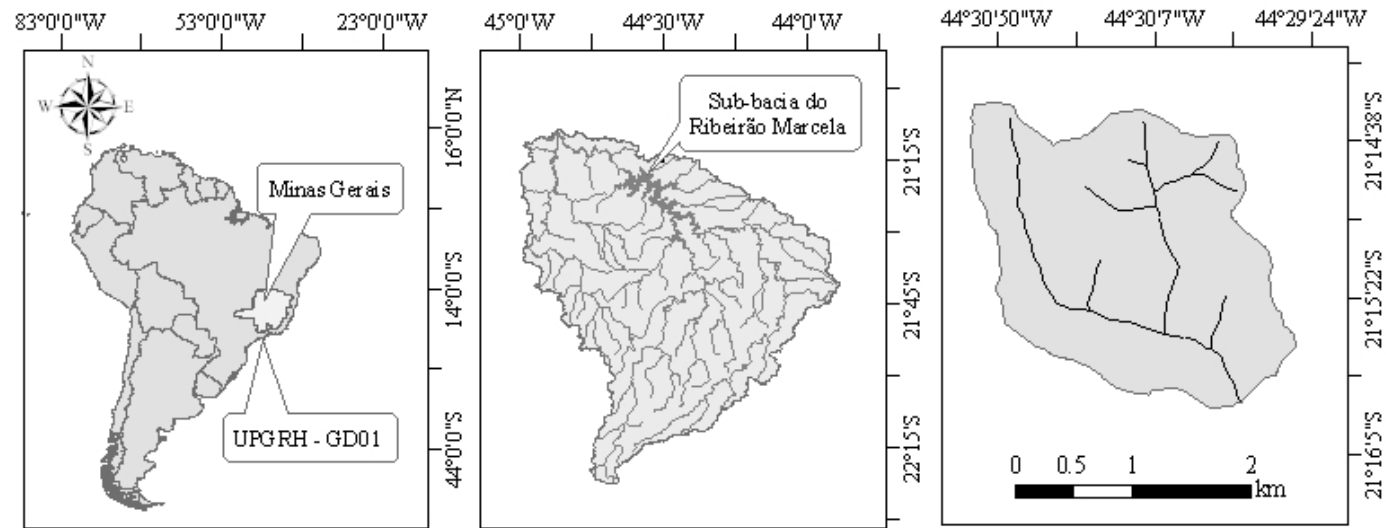


FIGURA 1 Inserção da bacia hidrográfica estudada, no contexto do continente sul americano, nacional e estadual, à esquerda e, na UPGRH Alto Rio Grande, ao centro, e a bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, à direita. Adaptado de Viola (2008).

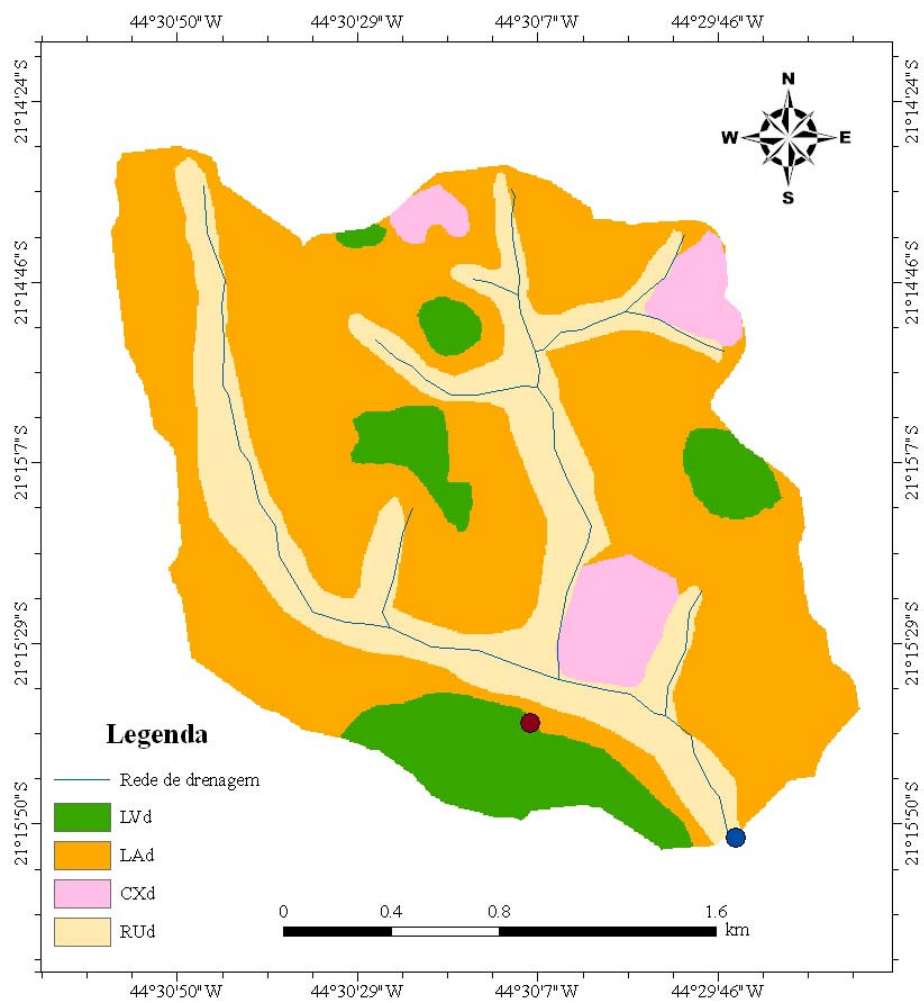


FIGURA 2 Mapa de solos da bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, adaptado de Motta et al. (2001).

TABELA 1 Valores característicos para alguns atributos físicos apresentados pelas unidades pedológicas presentes na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG, para espessura da camada de 150 mm.

Solos	Densidade		Teor				Classificação textural
	----- g cm ⁻³ -----		-----dag kg ⁻¹ -----				
	Solo	Partículas	Areia	Silte	Argila	MO	
LAd	1,13	2,52	22,6	18,2	59,2	2,5	Argilosa
RUd	1,06	2,51	24,1	18,6	57,3	4,0	Argilosa
LVd	1,08	2,56	16,9	21,6	61,5	3,0	M. argilosa
CXb	1,16	2,55	19,8	18,2	62,0	3,5	M. argilosa

Adaptado de Gomes (2005). MO: matéria orgânica.

A classificação climática de Köppen para a região da bacia hidrográfica é Cwa (temperado com verões quentes e úmidos e invernos secos e frios), estando os solos, exceto os hidromórficos, sujeitos ao regime údico e isotérmico. 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 e do mais quente 22°C. Aproximadamente 80% das precipitações ocorrem na bacia no período de outubro a abril e precipitação média anual é de 1.570 mm (Mello et al., 2007).

A distribuição espacial do uso e da ocupação da paisagem na bacia hidrográfica em questão pode ser observada na Figura 3. Foi relatada, por Gomes et al. (2007a,b), pequena diversidade de uso nas terras da bacia hidrográfica, destacando-se pastagem (natural e plantada), ocupando 75,87% da área, tendo sido observados também outros usos, como culturas anuais (16,69% da área é cultivada com milho), lavoura de café, ocupando cerca de 2,6% da bacia e um açude com espelho de, aproximadamente, 3,27 ha, o que corresponde a 0,68% do espaço físico da bacia hidrográfica do ribeirão Marcela. Os 4,16% restantes são fragmentos de mata natural, especificamente floresta tropical semidecídua (subcaducifólia). Gomes et al. (2007b) relatam também a ausência de mata ciliar (floresta ripária) ao longo da rede de drenagem, o que predispõe, segundo estes

autores, os corpos d'água ao escoamento superficial direto, bem como ao assoreamento e à perda da qualidade dos recursos hídricos presentes na bacia. Isto porque, segundo Silva (2006), existem áreas críticas na bacia no tocante à erosão, especialmente aquelas ocupadas por pastagem em domínio de Cambissolos.

A vegetação nativa dominante era o cerrado tropical subcaducifólio (usado como pastagem natural), ocorrendo, ocasionalmente, floresta tropical subcaducifólia ou campo de surgente no terço inferior das encostas, campo cerrado tropical nos locais de domínio de solos mais rasos e campo hidrófilo de várzea nas baixadas (Giarola et al., 1997).

São os seguintes os atributos hidrológicos da bacia: declividade média de 13,65%; elevação média de 1.003 m; comprimento do curso d'água principal de 3,83 km, sendo sua declividade 1,57% e a densidade da rede de drenagem da bacia igual a 1,8 km km⁻². O perímetro da bacia e o coeficiente de compacidade (kc) são de 8,94 km e 1,14, respectivamente Silva (2006). Com base no coeficiente de forma (kf = 0,79), verifica-se que a bacia tem tendência mediana à formação de enchentes. O modelo digital de elevação do terreno, a seção de controle, a rede de drenagem e a posição em que a estação meteorológica se encontra na bacia hidrográfica são mostrados na Figura 4.

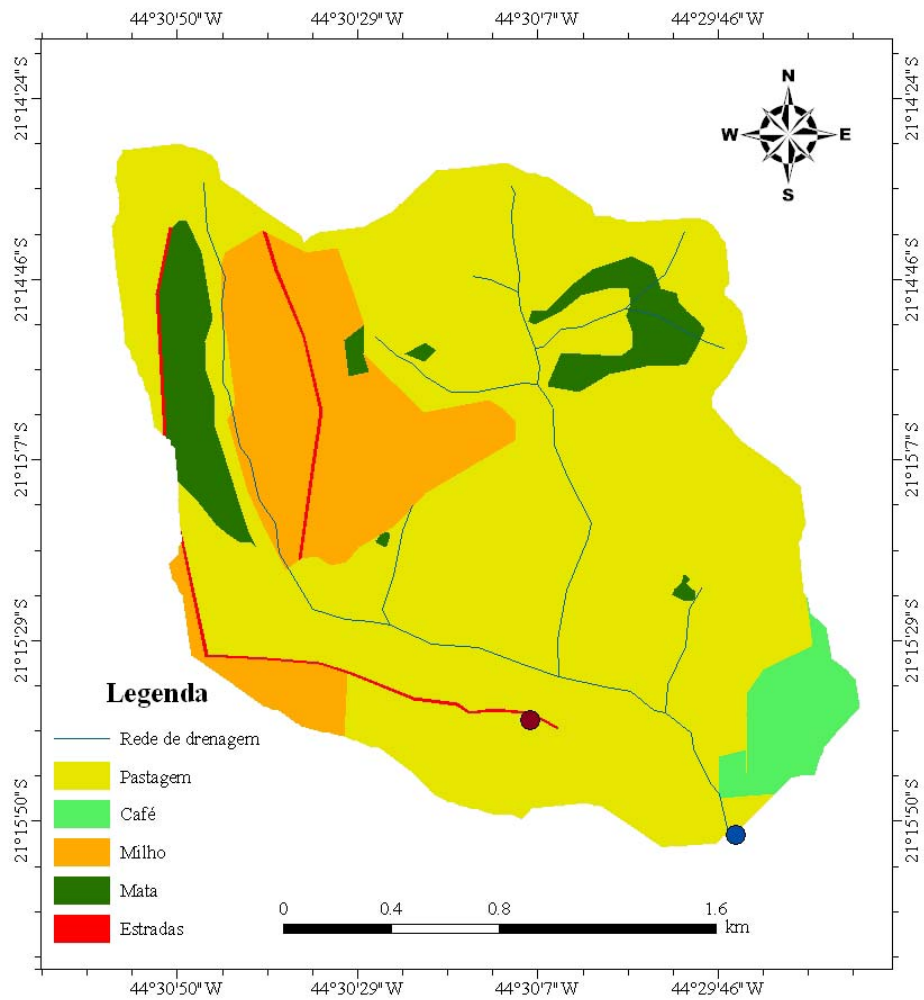


FIGURA 3 Uso atual das terras da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, adaptado de Gomes et al. (2007b).

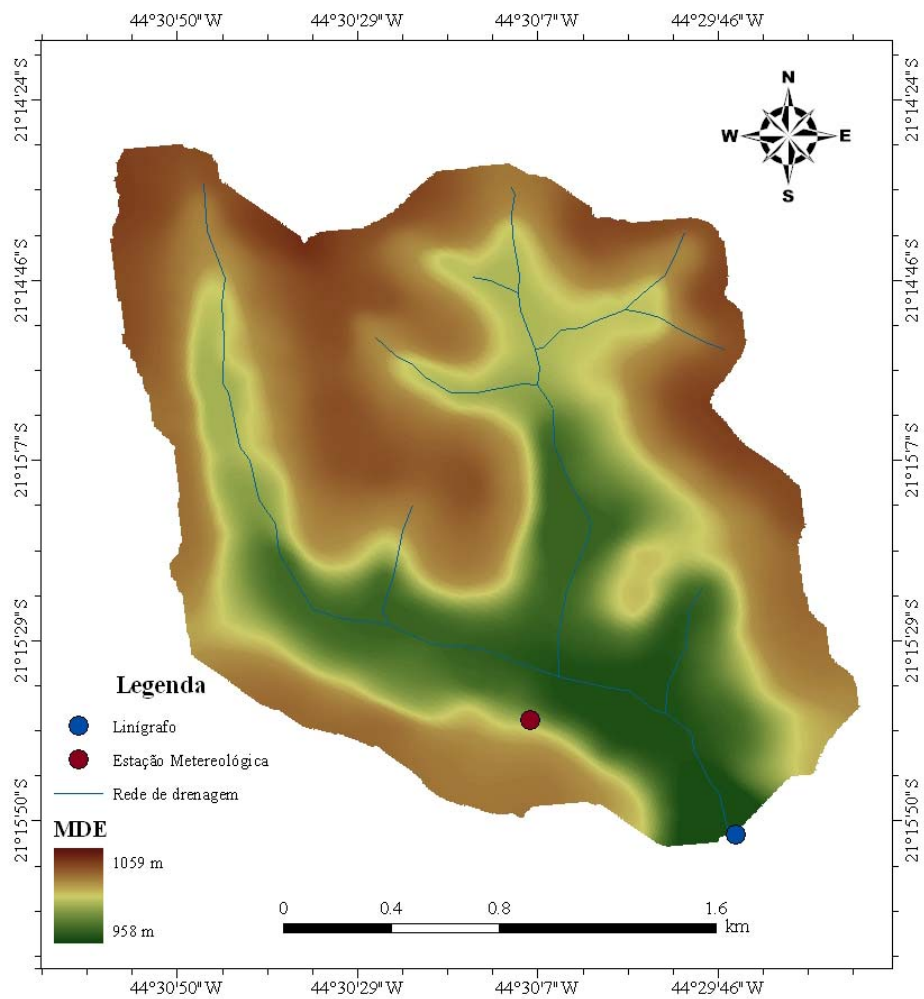


FIGURA 4 Modelo digital de elevação da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, com a localização da seção de controle, da rede de drenagem e da estação meteorológica.

4.2 Levantamento dos dados de entrada para simulação hidrológica com o modelo LISEM

4.2.1 Informações topográficas

O modelo digital de elevação do terreno não é utilizado diretamente pelo modelo LISEM, porém, são usadas outras informações derivadas do mesmo, que descrevem a morfologia da bacia hidrográfica. Sua obtenção se deu a partir das cartas topográficas das folhas Itutinga (SF-23-X-C-I-4) e Madre de Deus (SF-23-X-C-II-3), com curvas de nível apresentando equidistância de 20 m e pontos cotados no terreno. Utilizou-se a ferramenta TOPOGRID do pacote de análises espaciais do ARCMAP 9.1, para a obtenção do modelo digital de elevação.

O mapa proveniente do ARCMAP 9.1 foi rasterizado com células de 20 m x 20 m, e convertido para o formato ASCII para possibilitar a transferência para o PCRaster. O PCRaster possui funções próprias para a conversão de dados de SIGs comerciais para o seu formato específico.

4.2.1.1 Delimitação da área da bacia hidrográfica

Todos os mapas foram conferidos com o mapa de área da bacia, devendo todos, possuírem o mesmo número e tamanho de células, além do mesmo posicionamento destas na bacia. Caso contrário, ocorrerão erros no processamento das informações. A delimitação da área da bacia hidrográfica foi obtida a partir do modelo digital de elevação, utilizando-se o programa PCRaster.

4.2.1.2 Direção e localização da rede de drenagem

A direção e localização da rede de drenagem indica para cada célula do grid, o sentido do escoamento superficial, por meio de um número (1 a 9), associando-o à direção dos pontos cardeais (N, S, E, W, NE, SE, SW e NW),

com o número 5, usado exclusivamente para indicar o exutório da bacia hidrográfica.

Deve-se destacar que este mapa não pode conter depressões locais, pois, todo o escoamento da bacia tem que convergir para a seção de controle. O PCRaster possui comandos que podem gerar o mapa de direção e localização da rede de drenagem automaticamente, com remoção das depressões, baseado em restrições fornecidas pelo usuário.

4.2.1.3 Gradiente de declividade da rede de drenagem

O gradiente de declividade na direção da rede de drenagem foi obtido utilizando-se o seno do ângulo formado pela rampa do terreno e a horizontal. Isso porque o gradiente de declividade pode estar no denominador de vários algoritmos, não podendo ser, portanto, igual a zero (0).

4.2.1.4 Área monitorada pela estação meteorológica

Uma única estação meteorológica foi utilizada para monitorar as precipitações na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela. O número de classes deste mapa tem que corresponder ao número de estações meteorológicas usadas. Necessariamente, a posição da estação meteorológica tem que estar dentro dos limites da bacia hidrográfica a ser trabalhada.

4.2.2 Informações referentes à vegetação

Estes mapas foram criados por operações similares aos anteriores, na linguagem PCRaster, tendo como referência o uso do solo e as características de cada uso. As informações pertinentes à vegetação, requeridas pelo LISEM para simulação hidrológica do escoamento superficial direto são: índice de área foliar (IAF) e a fração do solo coberta pela vegetação. Estas informações são utilizadas pelo LISEM no cálculo da interceptação da precipitação pela vegetação. Tendo

em vista o uso atual do solo na bacia hidrográfica (Figura 2). O IAF e a FSCV utilizados neste trabalho para todos os eventos calibrados, estão apresentados na Tabela 1A, no Anexo A.

a) pastagem: IAF de $2,63 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, conforme Caruzzo & Rocha (2000), FSCV de 0,70, conforme Takken et al. (1999);

b) cultura do milho: admitiu-se que o plantio foi feito em 15 de outubro e a colheita no final de fevereiro. Para períodos não compreendidos entre estas datas, adotaram-se para a gleba cultivada com milho, os mesmos índices da pastagem. O IAF para o milho foi obtido empregando-se modelo apresentado por Manfron et al. (2003):

$$IAF = -0,0003 \times h^2 + 0,0851 \times h \quad (1)$$

em que h é a altura da planta. Conforme estes autores, o híbrido utilizado para gerar o modelo atinge altura máxima de 150 cm, aos 75 dias após semeadura (DAS), o que corresponde a uma taxa de crescimento de 2 cm dia^{-1} . Dos 75 aos 90 DAS (30/12 a 13/01), o IAF foi máximo, sendo igual a $6,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, quando então começou a decrescer, em função da senescência das folhas. A FSCV foi adotada em função do estágio de desenvolvimento da cultura.

c) lavoura de café: por esta se encontrar em fase de pós-plantio, primeiros seis meses e presença de ervas daninhas rasteiras nas entrelinhas, somando-se a vestígios do sulcamento para o plantio, optou-se por considerar as mesmas condições da pastagem para esta gleba;

d) fragmentos de mata natural: os valores de IAF considerados para os fragmentos de mata natural foram aqueles apresentados por Xavier (2000),

conforme Tabela 2 e a A FSCV adotada foi de 0,95 conforme Takken et al. (1999)

TABELA 2 Variação mensal do IAF ($m^2 m^{-2}$) para floresta ripária, localizada na bacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, Município de Piracicaba, SP.

Variável	Meses											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
IAF	3,2	3,2	2,8	2,5	2,4	2,5	2,6	1,9	1,7	2,8	2,9	3,1

e) açude: este foi desconsiderado, pois o LISEM não dispõe de opções para tratar este tipo de informação hidrológica. Além disso, ele ocupa apenas 0,68% da área da bacia hidrográfica.

Estas informações foram organizadas em tabelas e convertidas em mapas temáticos, utilizando-se o PCRaster.

4.2.3 Informações referentes à superfície do solo

Por se tratar de uma bacia hidrográfica agrícola, o coeficiente de atrito superficial (n), que representa a resistência da superfície ao fluxo de água e as irregularidades do terreno, representadas como o desvio padrão das alturas do micro relevo, foram adotadas em função do uso ocupacional do solo. O mapa de (n) pode assumir valores compreendidos entre 0,001 a 10, enquanto as irregularidades estão compreendidas entre 0,05 a 20 cm (Jetten, 2002). Como são de difícil obtenção no campo, são parâmetros calibráveis. Para os propósitos deste trabalho, adotaram-se os valores sugeridos por Takken et al. (1999). Os valores de (n) e rugosidade superficial utilizados neste trabalho para todos os eventos calibrados, estão apresentados na Tabela 2A, do Anexo A.

4.2.4 Parâmetros referentes à infiltração de água no solo

No contexto deste trabalho, fez-se opção pelo modelo de Green & Ampt, com uma camada, para tratar a infiltração de água no solo. A escolha deste modelo foi condicionada à disponibilidade de informações especializadas, adaptadas do trabalho realizado por Gomes (2005). Tais informações são:

4.2.4.1 Condutividade hidráulica saturada (k_0)

O mapa de condutividade hidráulica saturada, em mm h^{-1} , foi obtido utilizando-se o pacote geoestatístico GStat (Pebesma & Wesseling, 1998) do PCRaster, empregando-se semivariograma exponencial, ajustado por máxima verossimilhança, extraído de Gomes et al. (2007a):

$$\gamma(h) = 0,0909 + 0,1873 \left[1 - \exp\left(-3 \frac{h}{77,46}\right) \right] \quad (2)$$

em que h é a distância na qual o semivariograma se estabiliza. As amostras foram coletadas obedecendo-se grids de 240 m x 240 m e 60 m x 60 m. Neste trabalho, utilizou-se o permeâmetro de fluxo constante (permeâmetro de Ghelph – modelo 2800KI) para se obter os valores deste atributo. A faixa de valores aceita pelo LISEM, para k_0 , está compreendida entre 0 a 1.000 mm h^{-1} . Os valores obtidos por Gomes (2005) e Gomes et al. (2007a) variaram entre 22,92 mm h^{-1} a 29,17 mm h^{-1} , sendo considerados como solos de alta condutividade hidráulica, segundo Bernardo (2002) e Libardi (2005).

4.2.4.2 Umidade de saturação do solo ou VTP

Este mapa foi obtido de forma semelhante ao mapa de condutividade hidráulica, utilizando semivariograma esférico, extraído de Gomes et al. (2007a):

$$\gamma(h) = 0,0004 + 0,0018 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{1000} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{1000} \right)^3 \right] \quad (3)$$

Os valores para este atributo, na bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, variaram de $0,52 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a $0,58 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

4.2.4.3 Umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação - θ_{ap}

O LISEM é bastante sensível a esta variável, sendo este um dos principais parâmetros de calibração (Hessel et al., 2003a). Para tal, utilizou-se de umidade retida às tensões de 0 kPa, 2 kPa, 6 kPa, 10 kPa, 33 kPa e 100 kPa. Utilizando dados do trabalho de Gomes (2005), foi possível ajustar semivariogramas para a umidade retida em cada uma destas tensões e, assim, conhecer a variabilidade espacial da umidade em função da tensão para toda a bacia, conforme os seguintes semivariogramas: esférico ajustado por mínimos quadrados ponderados para 0 kPa, 33 kPa e 100 kPa (equações 4, 8 e 9), esférico ajustado por máxima verossimilhança para 2 kPa (equação 5) e exponencial ajustado por máxima verossimilhança para 6 kPa e 10 kPa (equações 6 e 7):

$$\gamma(h) = 0,0006 + 0,0013 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{1000} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{1000} \right)^3 \right] \quad (4)$$

$$\gamma(h) = 0,0020 + 0,0006 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{316,72} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{316,72} \right)^3 \right] \quad (5)$$

$$\gamma(h) = 0,0017 + 0,0003 \left[1 - \exp \left(-3 \frac{h}{982,57} \right) \right] \quad (6)$$

$$\gamma(h) = 0,0014 + 0,0004 \left[1 - \exp \left(-3 \frac{h}{1199,99} \right) \right] \quad (7)$$

$$\gamma(h) = 0,0008 + 0,0010 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{1200} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{1200} \right)^3 \right] \quad (8)$$

$$\gamma(h) = 0,0004 + 0,0010 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{100} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right] \quad (9)$$

O conteúdo de umidade espacializado na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, para as tensões de 0 kPa, 2 kPa, 6 kPa, 10 kPa e 33 kPa, estão apresentados no Anexo G.

No momento da calibração, pode ser que seja necessário, em alguns casos, utilizar um percentual de umidade intermediário entre duas tensões, por exemplo, se a umidade retida a 0 kPa produzir vazão de pico e deflúvio total acima dos observados e a umidade retida a 2 kPa produzia valores abaixo. Nesta situação, um percentual da umidade retida a 0 kPa será utilizado, multiplicando-se o mapa deste potencial matricial por um fator decimal até alcançar valores de vazão de pico e escoamento superficial direto próximos aos observados.

4.2.4.4 Potencial matricial na frente de umedecimento para o modelo de Green & Ampt

O potencial matricial na frente de umedecimento foi obtido mediante a aplicação da equação desenvolvida por Rawls et al. (1983), os quais empregaram o volume total de poros e as frações texturais argila e areia, respectivamente, para sua modelagem:

$$\Psi_m = \text{Exp} (6,5309 - 7,3256 \times \text{VTP} + 0,001583 \times \text{Arg}^2 + 3,809479 \times \text{VTP}^2 + 0,0003444 \times \text{ar} \times \text{Arg} - 0,049837 \times \text{ar} \times \text{VTP} + 0,001608 \times \text{ar}^2 \times \text{VTP}^2 + 0,001602 \times \text{Arg}^2 \times \text{VTP}^2 - 0,000014 \times \text{ar}^2 \times \text{Arg} - 0,00348 \times \text{Arg}^2 \times \text{VTP} - 0,0008 \times \text{ar}^2 \times \text{VTP}) \quad (10)$$

em que: Ψ_m é o potencial matricial na frente de umedecimento, em mm; VTP é a porosidade total do solo, em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; Arg é o percentual de argila e ar é a percentagem de areia. Ressalta-se que as equações apresentadas por Ataíde (2005) para estimativa do Ψ_m , para solos brasileiros também foram testadas, mas por apresentarem valores acima e abaixo daqueles recomendados por Jetten (2002), foram descartadas.

A espacialização dos percentuais de argila e areia foi obtidas utilizando-se semivariogramas exponenciais, ajustados por máxima verossimilhança, extraídos de Gomes et al. (2007b), respectivamente:

$$\gamma(h) = 26,39 + 42,81 \left[1 - \exp\left(-3 \frac{h}{3000}\right) \right] \quad (11)$$

$$\gamma(h) = 11,09 + 47,07 \left[1 - \exp\left(-3 \frac{h}{3000}\right) \right] \quad (12)$$

4.2.4.5 Espessura das camadas de solo

Trabalhou-se com cinco espessuras da camada de solo: 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1000 mm. Conforme Jetten (2002), a espessura máxima da camada de solo para simulação com o LISEM é de 1000 mm.

Motta et al. (2001) realizaram o levantamento dos solos na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, utilizando-se de perfis para descrever suas propriedades. Os resultados analíticos de cinco dos nove perfis descritos por estes autores para atributos físicos e teor de matéria orgânica do solo, para a bacia em questão, estão apresentados na Tabela 3.

Para as frações texturais areia fina, silte e argila, nota-se ligeira uniformidade ao longo do perfil, com variações médias de 16,83%, 14,49% e 14,06%, respectivamente. Esta uniformidade, de certa forma, já era esperada, pois relatos da literatura reportam aos Latossolos (presentes em 78,80% da bacia) uniformidade vertical.

Dentro de certos limites, a uniformidade apresentada para os perfis descritos por Motta et al. (2001) permite extrapolar os semivariogramas ajustados por Gomes (2005) e Gomes et al. (2007a,b) para a espessura de 150 mm para as demais espessuras avaliadas neste trabalho.

TABELA 3 Resultados analíticos de perfis de solo para unidades pedológicas presentes na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, adaptados de Motta et al. (2001).

Solo	Horizonte	Espessura (cm)	C	A.	A.	Silte	Argila	D.
			orgânico	Grossa	Fina			partícula
			-----g kg ⁻¹ -----					g cm ⁻³
LAd ¹	A	0 - 25	18	60	180	190	570	2,70
	AB	25 - 45	18	40	160	180	620	2,70
	Bw1	45 - 80	11	20	140	170	670	2,78
	Bw2	80 - 145	7	20	120	180	680	2,82
LAd ²	A	0 - 27	24	40	140	170	590	2,67
	AB	27 - 47	20	40	120	150	630	2,70
	Bw1	47- 108	11	20	160	130	670	2,74
LAd ³	A	0 - 24	1,8	100	180	200	580	2,63
	AB	24 - 44	1,7	100	200	150	610	2,70
	Bw	44 - 185	1,1	40	180	150	650	2,63
LVd	A	0 - 15	0,3	40	140	230	590	2,82
	AB	15 - 35	0,4	20	140	170	670	2,74
	BA	35 - 50	0,4	20	140	210	630	2,70
	Bw1	50 -115	0,4	20	120	190	670	2,78
CXd	A	0 - 19	18	40	200	190	570	2,70
	AB	19 - 35	18	20	220	170	590	2,63
	Bi	35 - 58	11	20	160	180	640	2,82
	BC	58 - 79	6	20	140	190	650	2,74
	C	79 - 155 ⁺	3	20	140	190	650	2,74

^{1, 2 e 3} correspondem aos perfis 2, 3 e 4, respectivamente, apresentados por Motta et al. (2001).

4.2.5 Parâmetros referentes aos canais de escoamento da bacia hidrográfica

Para a simulação no LISEM são utilizados canais que possuem tamanho menor que o pixel, tipicamente, com até 1,5 m de largura para pixel's de 10 m x 10 m (Jetten, 2002). Os canais devem estar conectados por uma rede contínua e esta conectada à saída, ou seja, exutório da bacia. Caso contrário, o LISEM considera que a água que iniciou o escoamento em um dado canal não conectado aos demais está armazenada em microdepressões na superfície do terreno. Os parâmetros adotados para os canais da bacia hidrográfica estão apresentados na Tabela 4 e a direção e a localização da rede de drenagem para a bacia hidrográfica em questão podem ser vistas na Figura 5.

TABELA 4 Parâmetros referentes aos canais presentes na bacia hidrográfica.

Parâmetro	Valor/referência	Referência
Direção de drenagem	Mapa de canais	Modelo digital de elevação
“n” de Manning para o canal	0,070	Baptista & Lara (2003)
Declividade dos canais	Mapa de canais	Modelo digital de elevação
Largura do fundo do canal	0,8 m	Valores característicos
Talude	45°	representativos da bacia hidrográfica

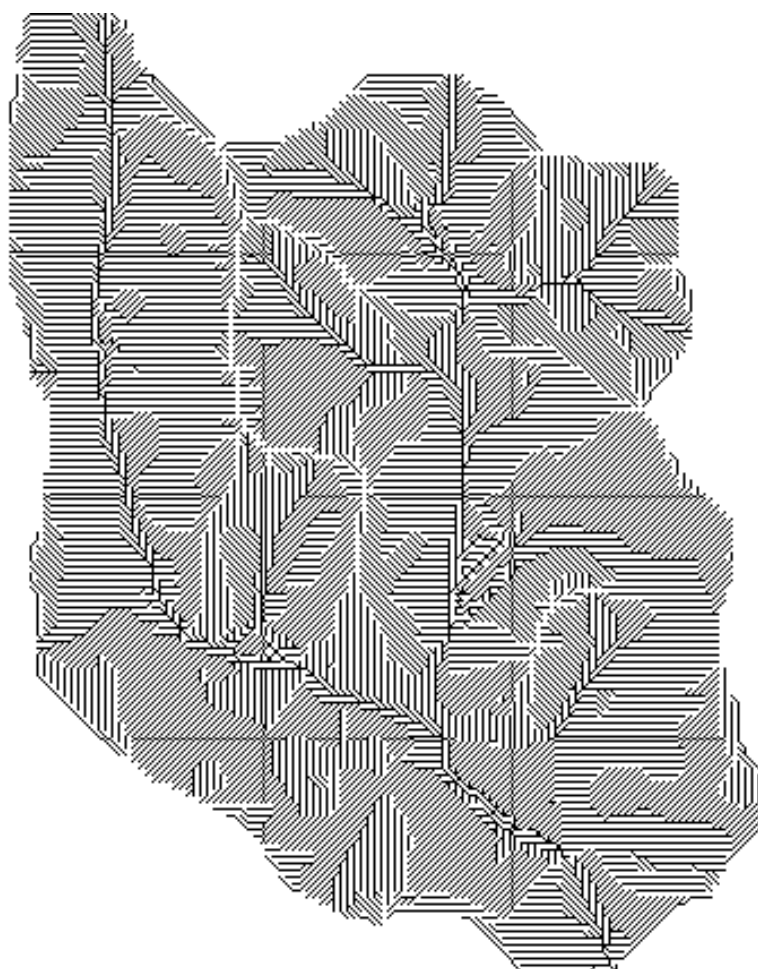


FIGURA 5 Direção e localização da rede de drenagem para a bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, obtidas a partir de grid de 20 m x 20 m, utilizando ferramentas do PCRaster, tendo como referência o modelo digital de elevação do terreno.

4.3 Eventos para calibração e validação

De um total de vinte eventos, dezesseis foram utilizados para a calibração do LISEM e quatro para validação, utilizando-se os parâmetros ajustados para os eventos calibrados. Neste trabalho, foram utilizados eventos registrados entre fevereiro de 2004 a março de 2006.

Os eventos de precipitação foram monitorados por uma estação meteorológica completa programada para coletar informações em intervalos de 15 ou 30 minutos, de acordo com a estação do ano. De posse das lâminas precipitadas, construíram-se os hietogramas para os eventos trabalhados, possibilitando obter a intensidade máxima de precipitação, duração do evento, bem como total precipitado.

Os eventos utilizados foram agrupados em função da intensidade máxima de precipitação (I_{max}), da seguinte forma:

- Classe 1: $I < 10 \text{ mm h}^{-1}$, três eventos;
- Classe 2: $10 \leq I < 20 \text{ mm h}^{-1}$, quatro eventos;
- Classe 3: $20 \leq I < 30 \text{ mm h}^{-1}$, três eventos;
- Classe 4: $30 \leq I < 40 \text{ mm h}^{-1}$, quatro eventos;
- Classe 5: $40 \leq I < 50 \text{ mm h}^{-1}$, três eventos e,
- Classe 6: $I \geq 50 \text{ mm h}^{-1}$, três eventos.

Os hietogramas e as hidrógrafas dos eventos trabalhados estão apresentados no anexo B.

4.4 Separação das hidrógrafas

O escoamento superficial foi monitorado por meio de uma estação fluviométrica contendo um linígrafo automático com sensor de pressão instalado em poço tranquilizador, programado para coletar informações da lâmina d'água em intervalos de 15 ou 30 minutos. Os linigramas originados dos eventos de

precipitação escolhidos foram convertidos em hidrogramas por meio de curva-chave, gerada para a seção de controle:

$$Q = 180,36 \times h^{0,995} \quad (R^2 = 0,89) \quad (13)$$

em que Q é a vazão, em L s⁻¹; H é a lâmina d'água acima do sensor, em m.

Após a obtenção dos hidrogramas, promoveu-se a separação do escoamento superficial direto do subterrâneo, determinando-se o deflúvio total, pela regra dos trapézios, conforme Tucci (2004). Foi possível então, obter o escoamento superficial direto, o formato da hidrógrafa de cheia, a vazão de pico, o tempo de pico e o índice C de escoamento superficial (índice C), para cada evento. O índice C de escoamento superficial direto foi obtido conforme a relação:

$$C = \frac{D_t}{P_t} \times 100 \quad (14)$$

em que C = é o índice C de escoamento superficial direto, D_t representa o deflúvio total (mm) e P_t a precipitação total (mm).

4.5 Calibração e validação

A calibração do modelo foi obtida ajustando-se, por tentativa, o conteúdo de umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para cada uma das cinco espessuras de solo consideradas. Os demais parâmetros foram mantidos fixos e adotados conforme literatura citada anteriormente. Os valores das variáveis vazão de pico, tempo de pico, escoamento superficial direto e índice C de escoamento superficial, obtidos pelo monitoramento feito na bacia hidrográfica (estações meteorológica e fluviométrica), foram as referências a serem alcançadas pelas tentativas de calibração.

A validação consistiu em aplicar os parâmetros de calibração de um evento a outro de igual intensidade de precipitação e posterior comparação dos resultados.

A aferição da precisão do modelo foi feita de forma qualitativa, por meio de plotagem dos hidrogramas calibrados e observados na bacia, podendo, assim, promover uma comparação visual de sua adequação e aderência. De forma quantitativa, a avaliação foi feita por meio de coeficientes de avaliação, conhecidos como função objetivo. Foi usado o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, dado pela equação 15, o qual, segundo Nash & Sutcliffe (1970), é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar modelos hidrológicos. Utilizou-se também a diferença entre valores simulados e observados, que, segundo Collischonn (2006), pode ser empregada para quantificar a precisão do modelo. Assim, os resultados obtidos também foram avaliados pelas diferenças entre os valores observados e calibrados, como se segue pelas equações 16, 17, 18 e 19:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qp_{obs} - Qp_c)^2}{\sum_{i=1}^n (Qp_c - Qobs_m)^2} \quad (15)$$

$$E_{Qp} = \frac{Qp_c - Qp_{ob}}{Qp_{ob}} \times 100 \quad (16)$$

$$E_{TP} = \frac{Tp_c - Tp_{ob}}{Tp_{ob}} \times 100 \quad (17)$$

$$E_{ESD} = \frac{ESD_c - ESD_{ob}}{ESD_{ob}} \times 100 \quad (18)$$

$$E_C = \frac{C_{obs}}{C_c} \times 100 \quad (19)$$

em que E_{Qp} , E_{Tp} , E_{ESD} e E_c são erros para as variáveis vazão de pico, tempo de pico, deflúvio total e índice C de escoamento superficial, respectivamente; $Q_{p_{ob}}$, $T_{p_{ob}}$, ESD_{ob} , C_{ob} e Q_{p_c} , T_{p_c} , ESD_c e C_c são valores observados e obtidos por calibração, para as variáveis vazão de pico (Qp), tempo de pico (Tp), deflúvio total e índice C de escoamento superficial, respectivamente e Q_{obs_m} corresponde à vazão de pico média observada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Calibração

5.1.1 Umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação (θ_{ap}) e espessura das camadas de solo

As informações apresentadas na Tabela 5 permitem inferir que as condições iniciais de umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação (θ_{ap}) utilizados para a simulação e validação do LISEM eram diferentes entre si, para todos os eventos trabalhados. Isso vale mesmo para eventos em que a I_{max} e a lâmina total precipitada foram iguais, caso dos eventos da classe 1, têm-se diferentes valores da precipitação acumulada de cinco dias anteriores (P. A. 5) e, conseqüentemente, diferentes condições iniciais de θ_{ap} .

De acordo com Gomes (2005), a disponibilidade total de água média do solo (DTA) na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela é de $1,8 \text{ mm cm}^{-1}$, sendo sua condutividade hidráulica saturada média (k_0) igual a $26,05 \text{ mm h}^{-1}$. Considerando tais informações e as espessuras das camadas de solo avaliadas (150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm), podem-se pressupor dificuldades de calibração do LISEM para os seis primeiros eventos apresentados na Tabela 5 (baixa I_{max} e pequenas lâminas totais precipitadas). Para estes casos, são remotas as possibilidades de ocorrência de escoamento superficial direto, objeto de calibração do LISEM. Isto se deve ao fato da

intensidade de precipitação não superar a velocidade de infiltração básica (VIB) e a lâmina total precipitada não atingir a capacidade total de armazenamento (CTA), que é igual a uma lâmina de 27,0 mm para os primeiros 150 mm de espessura para os solos da bacia em questão. Esta situação, por não favorecer a ocorrência de ESD, poderá se converter em dificuldades de calibração do LISEM, culminando com maiores erros para as variáveis respostas avaliadas.

TABELA 5 Total precipitado e precipitação acumulada de 5 dias anteriores (P.A. 5), em mm e intensidade máxima de precipitação (I_{\max}), em mm h^{-1} , para os eventos calibrados e validados, para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Data evento	Início (h)	P. Total	I_{\max}	P. A. 5
08/02/04	10:54	6,00	8,00	13,00
11/02/06	08:45	6,00	8,00	10,00
11/02/06*	20:45	6,00	8,00	16,00
23/02/04	19:24	6,00	12,00	100,00
15/12/06	21:02	28,00	12,00	1,00
21/02/04	09:54	17,00	16,00	22,00
28/02/06	20:12	20,00	20,00	13,00
14/02/04	19:55	36,00	24,00	10,00
18/03/05	12:00	21,00	24,00	11,00
08/03/05	20:15	26,00	32,00	9,30
07/04/04	00:52	29,50	32,40	0,30
12/04/04*	20:11	22,30	34,40	12,60
05/04/04	22:52	30,10	38,80	56,60
19/03/04	22:08	25,20	43,60	4,40
09/12/04	23:52	17,00	48,00	14,00
21/03/05	16:45	24,00	48,00	30,00
11/03/06*	00:27	34,00	48,00	29,00
04/04/04	16:23	45,40	52,80	11,20
31/05/04*	23:24	23,90	52,00	0,60
24/02/04	21:54	37,00	84,00	106,00

* eventos achurados foram utilizados na validação.

Para eventos em que a I_{\max} e a lâmina total precipitada são da mesma ordem de grandeza da k_0 e CTA, respectivamente, tem-se, provavelmente, pequena parcela da precipitação convertida em escoamento superficial direto, caso dos eventos de 14/02/04, 18/03/05 e 28/02/06, apresentados na Tabela 5 e, teoricamente, menor dificuldade de calibração do LISEM. Para eventos de precipitação em que a I_{\max} supera a k_0 , caso dos 11 últimos eventos apresentados na Tabela 5, esperam-se maior facilidade de calibração e menores erros para as variáveis respostas. Isso porque a lâmina que excede a capacidade de infiltração também suprirá a capacidade de armazenamento de água nas microdepressões, transformando-se em escoamento superficial direto.

Quando se trabalha com eventos de baixa I_{\max} e pequena lâmina total precipitada, as prováveis formas de se contornar as dificuldades de calibração do LISEM são: i) diminuir a espessura da camada de solo considerada no balanço hídrico; ii) reduzir sua k_0 ou iii) considerar θ_{ap} próximo à saturação. As tentativas de calibração deste trabalho mostraram que, a utilização da menor espessura (150 mm) juntamente com maiores conteúdos de θ_{ap} foi a solução mais indicada para calibrar eventos de baixa I_{\max} e pequena lâmina total precipitada. Ao se adotar menor espessura para a camada de solo e maiores conteúdos de θ_{ap} , reduziu-se o déficit hídrico de armazenamento de água do solo, fazendo com que maior parcela da precipitação se convertesse em escoamento superficial direto, tornando possível a calibração do LISEM.

A redução da k_0 (o que pode ser conseguido por multiplicação do mapa deste atributo por um fator decimal) também conduziu a uma maior produção de escoamento superficial direto. Solos com baixa k_0 possuem menor capacidade de condução de água, ou seja, apresentam restrições ao fluxo de água no seu perfil, o que potencializa a ocorrência de escoamento superficial direto. Porém, alterações na k_0 mostraram-se mais complexas, pois esta variável estava sendo utilizada em outras etapas do processo, como no modelo de infiltração de Green

& Ampt. Há que se considerar também que o LISEM é conceitual e alterações em determinados parâmetros implicam em conhecer suas relações intrínsecas com os demais processos considerados pelo LISEM.

O modelo de infiltração de Green & Ampt, utilizado para descrever o processo de infiltração de água no solo neste trabalho, é muito sensível às variações de k_0 e ao conteúdo de umidade inicial do solo (Jetten, 2002). Em uma das tentativas de calibração, utilizou-se a relação $k(\theta)$, para relacionar as variações de θ e $k(\theta)$. Os resultados mostraram que pequenas variações em θ provocaram grandes reduções em $k(\theta)$, o que, por sua vez, reduziu a capacidade de infiltração do solo. Esta situação potencializou o escoamento superficial direto, culminando com elevados valores para as variáveis vazão de pico e para o escoamento superficial direto, confirmando a grande sensibilidade do modelo de Green & Ampt a k_0 , conforme Jetten (2002), o que impossibilitou a calibração do LISEM.

No processo de calibração do LISEM, um único mapa de condutividade hidráulica, seja ela k_0 ou $k(\theta)$, é utilizado do início ao fim da simulação. Com as restrições ao fluxo de água no perfil do solo em virtude da utilização do mapa de $k(\theta)$, pode-se dizer que, desde o início da simulação, está se subestimando a parcela da precipitação que se infiltra e superestimando a que se transforma em escoamento superficial direto, sendo está, a provável causa dos elevados valores obtidos para Q_p e ESD, quando se utilizou $k(\theta)$. Há que se ressaltar também que o modelo de Green & Ampt utiliza k_0 e não $k(\theta)$ e, por esta razão, adotou-se k_0 para calibração do LISEM neste trabalho. Neste caso, admite-se que a parcela da precipitação convertida em infiltração foi superestimada, pois em todo o tempo de simulação, o fluxo de água no solo foi igual à k_0 . O mapa de k_0 utilizado nas simulações do LISEM na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela está apresentado no anexo G.

A sensibilidade do LISEM à umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação (θ_{ap}) pode ser constatada pela variação dos erros apresentados pelas variáveis hidrológicas do escoamento superficial direto conforme Tabelas 6 (tempo de pico e vazão de pico) e 7 (escoamento superficial direto e índice C).

A variável hidrológica tempo de pico mostrou-se pouco sensível à variação da umidade do solo, exceto para a menor classe de intensidade de precipitação ($I_{max} < 10 \text{ mm h}^{-1}$). Para o evento de 08/02/04, a alteração de 0,5% no conteúdo de umidade (de 96,00% para 96,50% de $0,5601 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ retido à tensão de 0 kPa) provocou variação no tempo de pico em 88%, ou seja, um atraso de 40% na sua ocorrência (de 375 para 525 minutos), passou-se para uma antecipação de 48% (de 375 para 195 minutos). Situação semelhante a esta também foi verificada para o evento de 11/02/06, confirmando as dificuldades de calibração para eventos de baixa intensidade de precipitação e pequena lâmina total precipitada. Para os eventos mais intensos, o tempo de pico permaneceu praticamente inalterado para as variações do conteúdo de umidade do solo.

A variável hidrológica vazão de pico apresentou comportamento distinto, quando comparada à variável tempo de pico, mostrando-se sensível a variações no conteúdo de umidade do solo em todas as classes de intensidade de precipitação avaliadas. Variação de apenas 0,10% no conteúdo de umidade (de 94,10% para 94,20% de $0,5601 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ retido à tensão de 0 kPa) provocou alteração na vazão de pico em 54,63%, ou seja, de subestimada em 33,17% (de $4,68 \text{ L s}^{-1}$ para $3,13 \text{ L s}^{-1}$), para superestimada em 21,46% (de $4,68 \text{ L s}^{-1}$ para $5,68 \text{ L s}^{-1}$) para o evento de 11/02/06 (classe 1).

TABELA 6 Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial direto (tempo de pico e vazão de pico), em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação, para a camada de 150 mm de espessura, na bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Ψ_m (kPa)	θ (cm ³ cm ⁻³)	% de θ	Variáveis do escoamento superficial direto					
				T.p (minutos)			Qp (L s ⁻¹)		
				Obs	Cal	ΔTc (%)	Obs	Cal	ΔQp (%)
08/02/04	0	0,5601	96,00		525	40,00		4,35	-80,15
			96,50	375	195	-48,00	21,92	20,56	-6,18
			97,00		735	96,00		230,97	953,91
11/02/06	0	0,5601	94,10		120	-63,64		3,13	-33,17
			94,20	330	120	-63,64	4,68	5,68	21,46
			94,30		360	9,09		8,02	71,41
23/02/04	0	0,5601	96,58		270	5,88		69,13	-9,23
			96,59	255	285	11,76	76,16	80,44	5,63
			96,60		285	11,76		92,05	20,86
15/12/06	10	0,4052	88,20		360	-11,11		77,91	-0,54
			88,50	405	345	-14,81	78,33	86,69	10,67
			90,00		345	-14,81		132,47	69,12
21/02/04	2	0,4829	92,80		555	131,25		170,99	-2,12
			92,90	240	555	131,25	174,69	177,87	1,82
			93,00		555	131,25		179,88	2,97
28/02/06	6	0,4348	93,00		315	-19,23		85,51	-13,40
			93,50	390	330	-15,38	98,74	96,39	-2,38
			95,00		315	-19,23		146,19	48,05
14/02/04	100	0,3109	95,00		975	8,33		34,89	-33,04
			96,00	900	975	8,33	52,11	42,15	-19,11
			97,00		975	8,33		54,30	4,21
18/03/05	10	0,4052	99,80		315	-25		101,37	-4,13
			99,90	420	315	-25	105,73	107,96	2,11
			100,00		315	-25		112,71	6,60
08/03/05	10	0,4052	99,08		225	-16,67		314,28	0,81
			99,10	270	225	-16,67	311,76	314,34	0,83
			99,20		225	-16,67		320,42	2,78
07/04/04	10	0,4052	86,00		420	154,55		71,83	-12,00
			86,50	165	420	154,55	81,63	83,57	2,38
			87,00		435	163,64		92,05	12,76

“TABELA 6, cont.”

			96,87		75	-75,00		103,91	16,40
05/04/04	6	0,4348	96,88	300	75	-75,00	89,27	104,31	16,85
			96,89		75	-75,00		104,83	17,44
			94,00		240	6,67		88,78	-16,57
19/03/04	10	0,4052	95,00	225	240	6,67	106,41	123,45	16,02
			98,00		255	13,33		277,34	160,64
			99,50		180	-50,00		112,56	-3,55
09/12/04	6	0,4348	99,60	360	180	-50,00	116,71	114,67	-1,75
			99,70		180	-50,00		119,48	2,37
			96,00		210	-33,33		127,74	-13,14
21/03/05	10	0,4052	96,60	315	210	-33,33	147,06	146,17	-0,61
			97,00		225	-28,57		157,49	7,09
			78,80		285	72,73		134,93	-4,84
04/04/04	33	0,3415	78,90	165	285	72,73	141,80	143,08	0,90
			79,00		285	72,73		147,03	3,69
			94,00		300	11,11		105,12	-8,95
24/02/04	33	0,3415	94,35	270	315	16,67	115,45	113,34	-1,83
			94,38		315	16,67		113,10	-2,04

Valores em negrito correspondem aos valores de calibração

Para a classe de maior I_{\max} , caso do evento de 04/04/04, foi observada menor sensibilidade, mas, ainda assim, superior àquela apresentada pelo tempo de pico, pois variação de 0,20% no conteúdo de umidade (de 78,80% para 79,00% de $0,3415 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ retido a 33 kPa) induziu variação de 8,53% na vazão de pico, ou seja, de subestimada em 4,84% (de $141,80 \text{ L s}^{-1}$ para $134,93 \text{ L s}^{-1}$) para superestimada em 3,69% (de $141,80 \text{ L s}^{-1}$ para $147,03 \text{ L s}^{-1}$). Esta menor sensibilidade da variável hidrológica vazão de pico, para eventos mais intensos, reflete a influência das características do próprio evento de precipitação na ocorrência do escoamento superficial direto. Para eventos de maior intensidade, as condições iniciais de umidade do solo e demais características fisiográficas da bacia pouco influenciam, sendo este regido pelas características do próprio

evento, como I_{\max} e lâmina total precipitada, o que também foi relatado por Mello (2003).

A sensibilidade apresentada pela vazão de pico reforça sua importância na calibração do LISEM, devendo-se dar a esta variável, atenção especial, pois, segundo Hessel et al. (2003b), outras variáveis respostas, como deflúvio total, formato da hidrógrafa e o índice C, são influenciadas pelo seu comportamento.

As variáveis escoamento superficial direto e o índice C (Tabela 7) também apresentaram elevada sensibilidade à variação do conteúdo de umidade do solo, o que vai ao encontro dos comentários anteriores, confirmando a relação destas com a vazão de pico, o que pode ser confirmado pelos eventos de 23/02/04 e 04/04/04.

Em 23/02/04, os erros na vazão de pico, escoamento superficial direto e índice C calibrados foram de 5,63%, -16,72% e -17,22%, respectivamente, enquanto que, em 04/04/04, estes foram de 0,90%, -0,79% e -1,15%, respectivamente, ou seja, menor erro na calibração da vazão de pico proporcionou menores erros nas demais variáveis. Para as demais espessuras das camadas de solo, o comportamento das variáveis tempo de pico, vazão de pico, escoamento superficial direto e índice C foram semelhantes aos apresentados nas Tabelas 6 e 7. Os resultados obtidos para as demais espessuras das camadas de solo avaliadas, podem ser observadas nas Tabelas 1H, 2H, 3H, 4H, 5H, 6H, 7H e 8H, no Anexo H.

TABELA 7 Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial direto (deflúvio total e índice C), em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 150 mm de espessura, na bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Ψ_m (kPa)	θ (cm ³ cm ⁻³)	% de θ	Variáveis do escoamento superficial direto					
				ESD (m ³)			Índice C		
				Obs	Cal	Δ (%)	Obs	Cal	Δ (%)
08/02/04	0	0,5601	96,00		61,11	-87,47		0,22	-87,54
			96,50	487,78	147,89	-69,68	1,75	0,53	-69,87
			97,00		2.599,73	432,97		9,27	429,79
11/02/06	0	0,5601	94,10		33,20	-59,43		0,12	-57,71
			94,20	81,82	78,33	-4,27	0,28	0,28	0,00
			94,30		140,18	71,32		0,50	79,21
23/02/04	0	0,5601	96,58		1.284,10	-27,38		4,58	-27,82
			96,59	1.768,32	1.472,67	-16,72	6,34	5,25	-17,22
			96,60		1.658,70	-6,20		5,91	-6,77
15/12/06	10	0,4052	88,20		1.233,37	-37,45		0,94	-37,82
			88,50	1.971,79	1.358,77	-31,09	1,52	1,04	-31,49
			90,00		2.091,88	6,09		1,60	5,48
21/02/04	2	0,4829	92,80		1.364,74	-48,94		1,72	-49,20
			92,90	2.672,83	1.395,98	-47,77	3,38	1,76	-48,05
			93,00		1.418,61	-46,92		1,78	-47,22
28/02/06	6	0,4348	93,00		1.556,35	-18,86		1,59	-15,69
			93,50	1.918,04	1.739,16	-9,33	1,88	1,77	-5,80
			95,00		2.539,78	32,42		2,59	37,55
14/02/04	100	0,3109	95,00		368,66	-77,58		0,22	-77,65
			96,00	1.644,01	413,25	-74,86	0,98	0,25	-75,00
			97,00		483,68	-70,58		0,29	-70,71
18/03/05	10	0,4052	99,80		1.673,53	2,19		1,70	1,55
			99,90	1.637,72	1.777,53	8,54	1,68	1,81	7,87
			100,00		1.833,75	11,97		1,87	11,26
08/03/05	10	0,4052	99,08		4.938,15	-21,11		4,06	-21,57
			99,10	6.259,20	4.953,63	-20,86	5,18	4,07	-21,32
			99,20		5.034,86	-19,56		4,14	-20,03

“TABELA 7, cont.”

			86,00		1.066,63	-28,43		0,77	-28,89
07/04/04	10	0,4052	86,50	1.490,27	1.233,96	-17,20	1,09	0,89	-17,76
			87,00		1.419,92	-4,72		1,03	-5,34
			96,87		1.711,33	-2,49		1,63	30,08
05/04/04	6	0,4348	96,88	1.755,04	1.716,27	-2,21	1,25	1,63	30,48
			96,89		1.721,21	-1,93		1,64	30,88
			94,00		1.321,34	-37,77		1,12	-38,07
19/03/04	10	0,4052	95,00	2.123,24	1.802,67	-15,10	1,81	1,53	-15,47
			98,00		3.908,70	84,09		3,32	83,43
			99,50		2.085,41	-5,42		2,62	-5,99
09/12/04	6	0,4348	99,60	2.204,82	2.140,16	-2,93	2,79	2,69	-3,51
			99,70		2.196,25	-0,39		2,76	-1,00
			96,00		1.964,37	-10,42		1,75	-11,17
21/03/05	10	0,4052	96,60	2.192,90	2.280,14	3,98	1,97	2,03	3,10
			97,00		2.519,11	14,88		2,24	13,91
			78,80		2.816,43	-4,22		1,33	-4,60
04/04/04	33	0,3415	78,90	2.940,40	2.917,21	-0,79	1,39	1,37	-1,15
			79,00		2.973,79	1,14		1,40	0,72
			94,00		1.769,04	-8,59		1,02	-9,16
24/02/04	33	0,3415	94,35	1.935,31	1.871,63	-3,29	1,13	1,08	-3,82
			94,38		1.876,95	-3,02		1,09	-3,56

Valores em negrito correspondem aos valores de calibração

As combinações de potenciais matriciais (ψ_m) e percentuais de umidades (% de θ) retidos a estes potenciais matriciais que produziram os melhores resultados de calibração para o LISEM, nas cinco espessuras da camada de solo estudadas e seis classes de intensidade de precipitação avaliadas, estão apresentadas nas Tabelas 8 e 9.

Comparando-se as intensidades de precipitação e as lâminas totais precipitadas (Tabela 5) com a k_0 (26,05 mm h⁻¹) e a CTA (27,0 mm), para a espessura de 150 mm, percebe-se que, teoricamente, os eventos da classe 1 ($I_{max} < 10$ mm), registrados nos dias 08/02/04, 23/02/04 e 11/02/06, não teriam condições de produzir escoamento superficial, mesmo se a espessura de 150 mm

estivesse saturada, pois a k_0 é maior que a I_{\max} . Porém, a estação fluviométrica registrou alteração na lâmina d'água na seção de controle e estes eventos foram calibrados considerando-se θ_{ap} próximo à saturação, com potencial matricial de 0 kPa e percentual de θ acima de 94% do conteúdo total de água retido a este potencial, conforme Tabelas 8 e 9. Pelos dados de P. A. 5 (Tabela 5) e considerando a DTA de $1,8 \text{ mm cm}^{-1}$, pode-se concluir que o armazenamento de água no solo na data de ocorrência destes eventos não estava próximo à saturação e, mesmo após a ocorrência das referidas precipitações, também não o estaria, pois as lâminas totais precipitadas foram insuficientes para saturar os primeiros 150 mm de espessura do solo com CTA de 27,0 mm.

Nesse contexto, é razoável supor que, para eventos de baixa intensidade de precipitação, provavelmente, tem-se a contribuição de fatores como a precipitação direta na calha da rede de drenagem, escoamento superficial direto de pequenas áreas saturadas próximas à calha (várzeas), influência de uma camada de solo com espessura menor que os 150 mm considerados e, principalmente, ocorrência de fluxo subsuperficial e subterrâneo, aumentando a lâmina na seção de controle. Para estes eventos, espera-se que as variáveis respostas (vazão de pico, tempo de pico, escoamento superficial direto e o índice C apresentem maiores erros, quando comparadas às demais classes de precipitação estudadas.

TABELA 8 Valores para os potenciais matriciais (ψ_m) e percentuais relativos de umidades (% de θ), retidos a estes potenciais matriciais, obtidos na calibração do LISEM, para diferentes intensidades de precipitação e camada de solo de 150, 300 e 450 mm de espessura, para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Potencial matricial e umidade de calibração								
	Camadas (mm)								
	150			300			450		
ψ_m (kPa)	θ (cm ³ cm ⁻³)	% de θ	ψ_m (kPa)	θ (cm ³ cm ⁻³)	% de θ	ψ_m (kPa)	θ (cm ³ cm ⁻³)	% de θ	
08/02/04	0	0,5601	96,50	0	0,5601	98,25	0	0,5601	98,16
11/02/06	0	0,5601	94,20	0	0,5601	97,07	0	0,5601	98,04
23/02/04	0	0,5601	96,59	0	0,5601	98,27	0	0,5601	98,87
15/12/06	10	0,4052	88,20	2	0,4829	90,80	2	0,4829	95,70
21/02/04	2	0,4829	92,90	0	0,5601	92,06	0	0,5601	94,72
28/02/06	6	0,4348	93,50	2	0,4829	96,40	2	0,4829	99,50
14/02/04	100	0,3109	97,00	10	0,4052	99,80	6	0,4348	99,40
18/03/05	10	0,4052	99,90	2	0,4829	96,10	2	0,4829	99,50
08/03/05	10	0,4052	99,08	2	0,4829	96,40	0	0,5601	91,56
07/04/04	10	0,4052	86,50	6	0,4348	98,10	2	0,4829	96,20
05/04/04	6	0,4348	96,87	2	0,4829	96,00	2	0,4829	99,10
19/03/04	10	0,4052	95,00	2	0,4829	93,30	2	0,4829	97,50
09/12/04	6	0,4348	99,60	2	0,4829	99,60	0	0,5601	94,38
21/03/05	10	0,4052	96,60	2	0,4829	95,50	2	0,4829	98,90
04/04/04	33	0,3415	78,90	10	0,4052	94,80	6	0,4348	95,40
24/02/04	33	0,3415	94,35	6	0,4348	94,30	2	0,4829	93,00

TABELA 9 Valores para os potenciais matriciais (ψ_m) e percentuais de umidades (% de θ), retidos a estes potenciais matriciais, obtidos na calibração do LISEM, para diferentes intensidades de precipitação e camada de solo de 600 e 1.000 mm, para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Potencial matricial e umidade de calibração					
	Camadas (mm)					
	600			1000		
	ψ_m (kPa)	θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	% de θ	ψ_m (kPa)	θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	% de θ
08/02/04	0	0,5601	98,62	0	0,5601	99,17
11/02/06	0	0,5601	98,53	0	0,5601	99,12
23/02/04	0	0,5601	99,15	0	0,5601	99,49
15/12/06	2	0,4829	98,07	0	0,5601	95,46
21/02/04	0	0,5601	96,04	0	0,5601	97,63
28/02/06	0	0,5601	94,72	0	0,5601	96,83
14/02/04	2	0,4829	96,00	2	0,4829	99,90
18/03/05	0	0,5601	94,51	0	0,5601	96,71
08/03/05	0	0,5601	93,67	0	0,5601	96,20
07/04/04	2	0,4829	98,80	0	0,5601	95,10
05/04/04	0	0,5601	94,00	0	0,5601	96,00
19/03/04	2	0,4829	99,50	0	0,5601	96,05
09/12/04	0	0,5601	95,79	0	0,5601	97,48
21/03/05	0	0,5601	93,69	0	0,5601	96,21
04/04/04	6	0,4348	99,40	2	0,4829	95,80
24/02/04	2	0,4829	96,20	2	0,4829	99,80

Reportando-se ainda às Tabelas 8 e 9 e considerando os eventos da classe 1 ($I_{\max} < 10 \text{ mm h}^{-1}$), percebe-se que os percentuais de umidade que possibilitaram a calibração do LISEM aumentam com a espessura das camadas de solo considerada. Este comportamento é explicado pelo fato de as camadas de solo mais espessas apresentarem maior capacidade de armazenamento de água e, como não há aporte desta na superfície para suprir esta demanda, a alternativa é aumentar a θ_{ap} , pois, assim, diminui-se o déficit hídrico de armazenamento de água da camada de solo e maior parcela da precipitação converte-se em escoamento superficial direto. Comportamento semelhante é observado para as demais classes de precipitação, pois, claramente, tem-se redução do potencial matricial (ψ_m) à medida que a espessura da camada de solo é alterada de 150 mm para as demais espessuras avaliadas, conforme as Tabelas 8 e 9. Neste contexto, entende-se que a espessura da camada de solo exerce influência na umidade de calibração do LISEM.

Nota-se, ainda pela Tabela 8, que as maiores variações nos valores de θ_{ap} ocorrem entre as camadas de 150 mm e 300 mm. Isto pode ser atribuído ao fato de esta ser a faixa de solo explorada pelo sistema radicular das gramíneas, o que, conseqüentemente, condiciona maior consumo de água armazenada, além da evaporação direta do solo, pois as pastagens da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela oferecem pouca proteção ao solo, em função do seu baixo índice de área foliar e avançado estado de degradação. Nesse sentido, Mello et al. (2007) relatam que alterações nas proporções da cobertura vegetal em uma bacia hidrográfica de fluxo efêmero influenciaram as condições de umidade do solo e a interceptação pelo dossel, pois foram registradas variações consideráveis de umidade do solo, tanto no espaço quanto em profundidade. Ainda segundo estes autores, glebas ocupadas por pastagem são quase sempre mais úmidas que glebas ocupadas por eucalipto, nas profundidades de 50 e 80 cm, refletindo um perfil médio mais úmido.

Visualiza-se na Tabela 8, que três eventos (14/02/04, 04/04/04 e 24/02/04) apresentaram potenciais matriciais (ψ_m) de calibração para a espessura de 150 mm acima dos demais. A provável explicação para este fato pode ser obtida analisando-se os dados da Tabela 5. Para estes eventos, registram-se as maiores lâminas totais precipitadas, 36 mm, 45 mm e 37 mm, respectivamente, superando a CTA desta espessura (27,0 mm), em 33,33%, 68,15% e 37,04%, respectivamente. Em função da lâmina total precipitada exceder a CTA e a intensidade de precipitação superar a k_0 , grande parte da precipitação foi convertida em escoamento superficial direto. No processo de calibração, aumentar o déficit hídrico de armazenamento da camada de solo considerada é uma das possibilidades de contorno da situação, o que foi possível trabalhando-se com baixo valor de θ_{ap} , ou seja, maiores potenciais matriciais (ψ_m), como as apresentado na Tabela 8, aumentando o déficit de armazenamento de água no solo. Ao se reter maior parcela da lâmina total precipitada na forma de armazenamento de água no solo, tem-se, conseqüentemente, menor percentual transformado em escoamento superficial direto. Utilizando-se deste artifício, pôde-se calibrar com melhor precisão eventos de maior intensidade de precipitação, quando comparados aos eventos de menor intensidade.

A umidade volumétrica de calibração obtida neste trabalho está de acordo com aquelas apresentadas por De Roo & Jetten (1999) em trabalho semelhante de calibração do LISEM em bacia hidrográfica na África do Sul, ou seja, θ de $0,44 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a $0,45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para eventos de inverno, situação em que o solo encontrava-se completamente saturado e θ variando de $0,34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a $0,44 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, para eventos de verão. Ainda segundo estes autores, a θ ótima de calibração de cada evento, para ambas as estações, é função das condições iniciais de θ , sendo encontrada, especificamente, por calibração individual em cada evento, o que também foi constatado neste trabalho, para os eventos calibrados. Takken et al. (1999) assumiram que a θ inicial dos solos da bacia de

Tongerem, Bélgica, era de $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e a θ de saturação igual a $0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ com a calibração do LISEM também alcançada com valores de θ próximos à saturação. Com relação ao potencial matricial (ψ_m) de calibração, Rawls et al. (1983) recomendam usar, para solos argilosos, caso da bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, um potencial matricial (ψ_m) entre 2,92 cm (0,286 kPa) e 95,39 cm (9,35 kPa), com valor ótimo de 16,68 cm (1,63 kPa). No trabalho realizado por De Roo & Jetten (1999), o valor de ψ_m de 15 cm (1,5 kPa) foi adotado. Os valores de ψ_m descritos por estes autores estão bem próximos daqueles apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Ante o exposto, os resultados apresentados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9 podem ser resumidos assim: i) a umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação (θ_{ap}) e as espessuras da camada de solo interagem, possibilitando várias combinações e tornando possível a calibração do LISEM para as cinco espessuras avaliadas; ii) para eventos da classe 1 ($I_{max} < 10 \text{ mm h}^{-1}$), a θ_{ap} de calibração esteve sempre próxima à saturação, pois, nos três eventos analisados, o potencial matricial (ψ_m) ótimo de calibração foi de 0 kPa e o percentual de θ foi superior a 96% da umidade retida àquela tensão, para todas as espessuras analisadas; iii) para eventos cujo volume total precipitado supera a CTA da camada de 150 mm em mais de 33% e $I_{max} > 52,0 \text{ mm h}^{-1}$ (superior a k_0), a umidade de calibração foi obtida empregando-se potencial matricial (ψ_m) de 33 kPa, podendo chegar até a 100 kPa; para as demais espessuras, a umidade de calibração foi obtida com ψ_m de 2 kPa, 6 kPa e 10 kPa; iv) em eventos cuja I_{max} oscilou entre 12 e 48 mm h^{-1} , mas que o volume total precipitado foi da mesma ordem de grandeza da CTA para a camada de 150 mm, a umidade ótima de calibração foi obtida empregando-se ψ_m de 2 kPa, 6 kPa e 10 kPa; para as espessuras de 300 mm, 450 mm e 600 mm, ψ_m de 0 kPa e 2 kPa e, para a camada de 1.000 mm, ψ_m de 0 kPa e v) a espessura da camada de solo influenciou a

umidade ótima de calibração do LISEM, mas não os resultados obtidos para as variáveis hidrológicas respostas, pois, para todas as camadas avaliadas, foi possível calibrar o modelo com erros de mesma magnitude.

5.2 Componentes do ciclo hidrológico simulados pelo LISEM

Na Tabela 10 estão apresentados os componentes do ciclo hidrológico simulados pelo LISEM, para cada evento de precipitação, considerando as respectivas espessuras da camada de solo. Nota-se que, para os eventos de menor I_{\max} , há maiores percentuais para a parcela interceptada pela vegetação, quando comparadas aos eventos de maior I_{\max} . Trancoso et al. (2007) relatam que a vegetação, em uma bacia hidrográfica, participa ativamente do ciclo hidrológico, por meio da evapotranspiração e da interceptação pelo dossel. De acordo com estes autores, a retenção da água pelo dossel quebra a energia da gota de chuva e faz com que a água chegue de forma mais disciplinada ao solo, escoando por galhos e troncos ou caindo em pingos mais lentos, reduzindo a possibilidade de formação de escoamento superficial direto. Outra forma de contribuição da vegetação é a formação de serrapilheira sobre a superfície do solo, que também oferece proteção além de aumentar a capacidade de absorção de água, controlando o escoamento superficial direto.

TABELA 10 Total precipitado, escoamento superficial direto (ESD), lâminas interceptada, infiltrada, armazenada na superfície (A. Sup.) e que ainda estava em movimento ao término da simulação (A. Mov.), para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Eventos	Camadas (mm)	Precipitação total e parcelas da precipitação (mm)					
		P. total	ESD	Interceptada	Infiltrada	A. Sup.	A. Mov.
08/02/04	150	5,9377	0,0313	0,5161	4,4674	0,4574	0,4654
	300	5,9377	0,0282	0,5161	4,4793	0,4572	0,4568
	450	5,9377	0,0709	0,5161	5,1108	0,1431	0,0626
	600	5,9377	0,0722	0,5161	5,1126	0,1413	0,0614
	1000	5,9377	0,0679	0,5161	5,1296	0,1316	0,0616
11/02/06	150	5,9377	0,0166	0,5161	5,3762	0,0198	0,0026
	300	5,9377	0,0088	0,5161	5,4013	0,0053	0,0005
	450	5,9377	0,0078	0,5161	5,4040	0,0038	0,0004
	600	5,9377	0,0077	0,5161	5,4041	0,0037	0,0003
	1000	5,9377	0,0084	0,5161	5,4030	0,0041	0,0004
23/02/04	150	5,9384	0,3117	0,5161	4,9660	0,0853	0,0439
	300	5,9384	0,1120	0,5161	5,2729	0,0275	0,0032
	450	5,9384	0,3074	0,5161	5,0013	0,0659	0,0371
	600	5,9384	0,2861	0,5161	5,0348	0,0593	0,0327
	1000	5,9384	0,2767	0,5161	5,0517	0,0549	0,0299
15/12/06	150	27,7113	0,2610	1,5307	25,8267	0,0594	0,0243
	300	27,7113	0,1961	1,5307	25,9426	0,0307	0,0050
	450	27,7113	0,1758	1,5307	25,9803	0,0180	0,0021
	600	27,7113	0,1670	1,5307	25,9967	0,0119	0,0012
	1000	27,7113	0,3567	1,5307	25,5122	0,1979	0,0836
21/02/04	150	16,8248	0,2954	1,1012	15,0230	0,1016	0,1889
	300	16,8248	0,2851	1,1012	14,8892	0,1487	0,2610
	450	16,8248	0,2964	1,1012	14,8708	0,1472	0,2674
	600	16,8248	0,2987	1,1012	14,8878	0,1410	0,2674
	1000	16,8248	0,3134	1,1012	14,8550	0,1441	0,2732

“TABELA 10, Cont.”

28/02/06	150	20,7826	0,3681	1,2372	19,0689	0,0780	0,0221
	300	20,7826	0,2838	1,2372	19,2043	0,0456	0,0071
	450	20,7826	0,2318	1,2372	19,2780	0,0289	0,0036
	600	20,7826	0,5213	1,2372	18,5517	0,3533	0,0867
	1000	20,7826	0,5088	1,2372	18,5670	0,3515	0,0858
14/02/04	150	35,6316	0,1024	1,5413	33,9493	0,0188	0,0022
	300	35,6316	0,1786	1,5413	33,8324	0,0322	0,0189
	450	35,6316	0,2156	1,5413	33,8175	0,0225	0,0164
	600	35,6316	0,2197	1,5413	33,8206	0,0225	0,0081
	1000	35,6316	0,2463	1,5413	33,8098	0,0141	0,0040
18/03/05	150	20,7833	0,3762	1,0780	19,1943	0,0755	0,0418
	300	20,7833	0,3017	1,0780	19,3344	0,0453	0,0119
	450	20,7833	0,2761	1,0780	19,3797	0,0321	0,0075
	600	20,7833	0,3839	1,0780	18,8277	0,2903	0,1478
	1000	20,7833	0,3975	1,0780	18,8118	0,2923	0,1451
08/03/05	150	25,7317	1,0450	1,1982	23,3390	0,1108	0,0288
	300	25,7317	0,9216	1,1982	23,5065	0,0775	0,0188
	450	25,7317	0,9919	1,1982	23,3751	0,1275	0,0253
	600	25,7317	0,9600	1,1982	23,4171	0,1213	0,0223
	1000	25,7317	0,9176	1,1982	23,4721	0,1107	0,0209
07/04/04	150	29,1971	0,2611	1,2555	27,4970	0,0344	0,1002
	300	29,1971	0,3111	1,2555	27,5126	0,0195	0,0623
	450	29,1971	0,3104	1,2555	27,5502	0,0181	0,0323
	600	29,1971	0,3263	1,2555	27,5485	0,0149	0,0240
	1000	29,1971	0,1905	1,2555	27,3876	0,0887	0,1698
05/04/04	150	22,2690	0,3639	1,1088	20,6991	0,0318	0,0409
	300	22,2690	0,3244	1,1088	20,7748	0,0210	0,0198
	450	22,2690	0,2589	1,1088	20,8706	0,0101	0,0060
	600	22,2690	0,2886	1,1088	20,7672	0,0318	0,0417
	1000	22,2690	0,2972	1,1088	20,7636	0,0229	0,0433
19/03/04	150	24,9398	0,2796	1,1811	23,3275	0,0888	0,0452
	300	24,9398	0,2200	1,1811	23,4696	0,0466	0,0109
	450	24,9398	0,1994	1,1811	23,5143	0,0306	0,0060
	600	24,9398	0,1725	1,1811	23,5585	0,0185	0,0026
	1000	24,9398	0,3346	1,1811	22,9775	0,2975	0,1003

“TABELA 10, Cont.”

09/12/04	150	16,8269	0,4529	1,1950	15,0705	0,0690	0,0271
	300	16,8269	0,3603	1,1950	15,2045	0,0482	0,0090
	450	16,8269	0,4450	1,1950	14,9697	0,1381	0,0553
	600	16,8269	0,4529	1,1950	14,9606	0,1388	0,0557
	1000	16,8269	0,4689	1,1950	14,9359	0,1427	0,0600
21/03/05	150	23,7535	0,4825	1,1540	21,9333	0,0976	0,0617
	300	23,7535	0,5378	1,1540	21,9189	0,0769	0,0408
	450	23,7535	0,4015	1,1540	22,1254	0,0445	0,0130
	600	23,7535	0,5188	1,1540	21,5554	0,2999	0,1520
	1000	23,7535	0,5540	1,1540	21,5441	0,2756	0,1538
04/04/04	150	44,9372	0,6174	1,4393	42,4572	0,1896	0,1522
	300	44,9372	0,4514	1,4393	42,8752	0,0707	0,0678
	450	44,9372	0,3537	1,4393	43,0771	0,0285	0,0203
	600	44,9372	0,3351	1,4393	43,1177	0,0185	0,0102
	1000	44,9372	0,3027	1,4392	43,1767	0,0044	0,0014
24/02/04	150	36,6179	0,3972	1,5537	34,4354	0,1174	0,0775
	300	36,6179	0,3730	1,5537	34,5760	0,0549	0,0391
	450	36,6179	0,2961	1,5537	34,7093	0,0334	0,0102
	600	36,6179	0,2927	1,5537	34,7280	0,0242	0,0065
	1000	36,6179	0,2770	1,5537	34,7646	0,0119	0,0023

P. Total: precipitação total; A. Sup.: armazenamento em depressões superficiais; A. Mov.: parcela da precipitação que ainda estava por passar na seção de controle ao término das simulações.

Para os eventos de 14/02/04, 04/04/04 e 24/02/04 (I_{\max} de 8,0 mm h⁻¹), o percentual interceptado é da ordem de 8,69%; para os eventos de 04/04/04 e 24/02/04, cujas I_{\max} foram de 52,80 mm h⁻¹ e 84,0 mm h⁻¹, respectivamente, os percentuais interceptados foram de 3,20% e 4,20%, redução de 5,49% e 4,49%, respectivamente. Isso pode ser atribuído às próprias características do evento de precipitação (I_{\max} , lâmina total precipitada, energia cinética) o que promove a “drenagem das folhas” durante o evento, diminuindo assim, sua capacidade de armazenamento de água, fazendo com que maior lâmina chegasse ao solo mais rapidamente.

Outro fator que interfere na interceptação é a diversidade da vegetação presente na bacia hidrográfica, o que significa diferentes valores para o índice de área foliar (IAF). No contexto de uso dos solos da bacia hidrográfica do ribeirão Marcela (Figura 3), pode-se dizer que os percentuais de precipitação interceptados pelo dossel da vegetação, são distintos e, provavelmente, com grandes variações entre si, pois as variações no índice de área foliar chegam a mais de 123,95% (pastagem com IAF de $2,63 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e cultura de milho com IAF $5,89 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). De acordo com Trancoso et al. (2007), o desmatamento nas bacias hidrográficas ou a substituição de suas matas naturais por cultivos agrossilvopastoris promovem diminuição da interceptação pelo dossel, redução da evapotranspiração, redução da infiltração e armazenamento de água no solo, aumento do escoamento superficial direto e aumento da vazão de pico dos cursos d'água. Este contexto reflete as condições atuais da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, haja vista a taxa de uso e ocupação de seus solos, o estado de degradação de suas pastagens e a falta de mata de cabeceira no terço superior dos morros e entorno de suas nascentes, além da ausência de mata ciliar, conforme Figura 3 e relatos de Gomes et al. (2007b).

A parcela da lâmina infiltrada foi a que obteve os maiores percentuais entre as cinco possíveis, apresentadas na Tabela 10. Detecta-se que há maiores percentuais infiltrados para as camadas de solo de maior espessura, o que é reflexo da maior capacidade de armazenamento de água dessas camadas. Entre os eventos de precipitação, exatamente aqueles de menor I_{\max} e que apresentaram os maiores percentuais de interceptação da precipitação pelo dossel da vegetação obtiveram os menores percentuais para as lâminas infiltradas. Em eventos da classe 1, a interceptação média da lâmina total precipitada foi de 8,69% (0,5161 mm interceptados dos 5,9377 mm precipitados) e o percentual médio de infiltração foi de 86,02% (5,1077 mm infiltrados dos 5,9377 mm precipitados). Para eventos da classe 6, com menor taxa de interceptação (4,10%), a lâmina

infiltrada média atingiu 94,00%. Isso pode ser explicado pelo fato de que menores taxas de interceptação proporcionam maiores lâminas na superfície do solo e passam a compor outros segmentos do ciclo hidrológico, dentre eles a infiltração.

Para os eventos de 14/02/04, 04/04/04 e 24/04/04, que foram simulados com potencial matricial (ψ_m) de 100 kPa, 33 kPa e 33 kPa respectivamente, para a espessura de 150 mm, tem-se elevados percentuais da precipitação total convertidos em lâmina infiltrada, 95,28%, 94,48% e 94,04%, respectivamente. Quanto maior o ψ_m , maior o déficit hídrico do solo, sendo maior a sua capacidade em absorver e também de armazenar água. Neste contexto, Mello et al. (2007), simularam o deflúvio e a vazão de pico em microbacia hidrográfica de fluxo efêmero e relataram que, quanto maior a umidade do solo, menor será a sua abstração inicial, ou seja, menor a capacidade deste em absorver água, tendo menor capacidade de armazenamento potencial e, portanto, produzirá maior deflúvio.

5.3 Variáveis respostas do escoamento superficial direto

5.3.1 Formato das hidrógrafas

A avaliação qualitativa de um modelo de simulação hidrológica pode ser feita de forma gráfica, plotando-se as hidrógrafas simuladas e observadas, possibilitando a comparação do formato e a aderência entre elas.

Na Figura 6 é mostrado o formato padrão obtido para as hidrógrafas calibradas pelo LISEM, para as seis classes de precipitação e as cinco espessuras das camadas de solo avaliadas. Visualizam-se, nesta Figura, que há proximidade entre os valores de vazão de pico simuladas e observadas para todas as camadas de solo e para ambos os eventos.

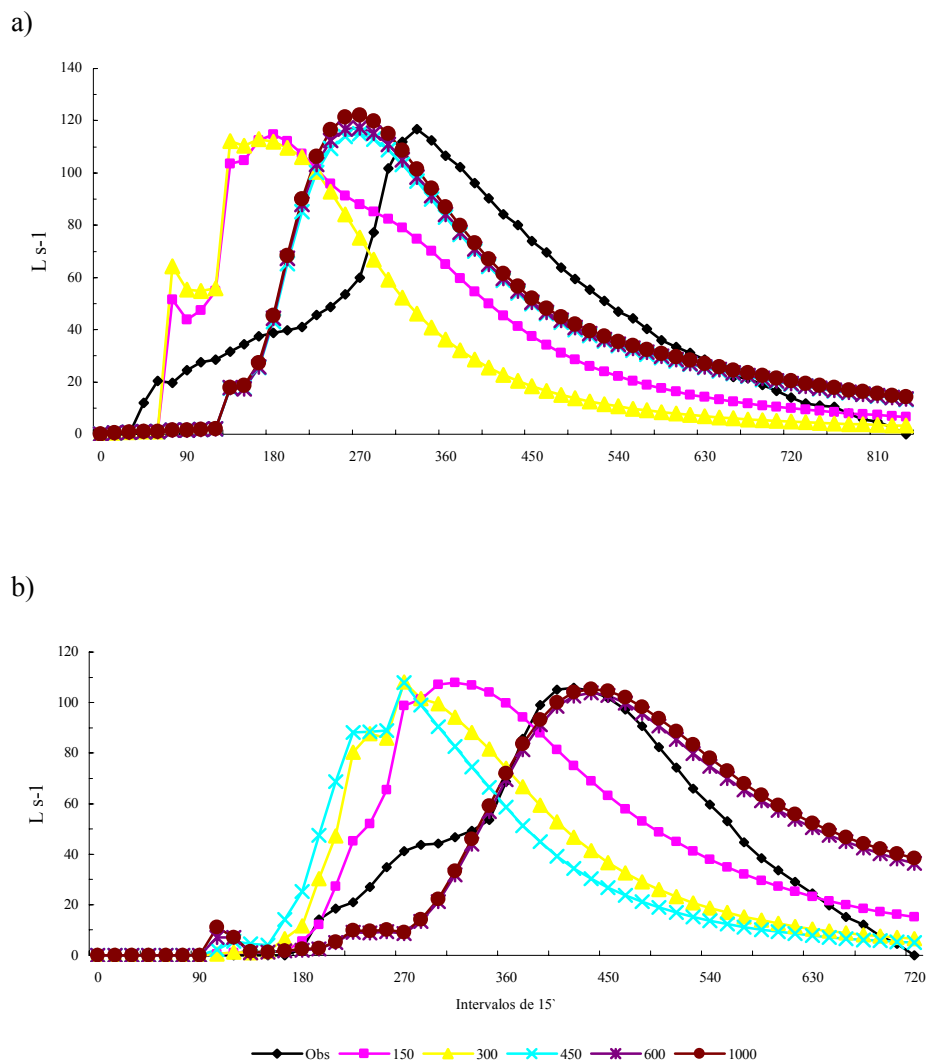


FIGURA 6 Formato das hidrógrafas observadas e simuladas pelo LISEM para as cinco camadas de solo avaliadas. a) evento de 09/12/04, I_{\max} de $48,0 \text{ mm h}^{-1}$, b) evento de 18/03/05, I_{\max} de $24,0 \text{ mm h}^{-1}$.

Constata-se também, translação a esquerda das hidrógrafas simuladas em relação às observadas, o que pode ser interpretado como consequência da antecipação do tempo de pico. Quando a translação ocorreu à direita, alguns casos caracterizaram-se o retardamento desta variável.

Viola (2008) utilizou o coeficiente de Nash-Sutcliffe de forma qualitativa, para avaliar modelo de simulação hidrológica, relatando também, que este coeficiente é uma das principais estatísticas de precisão aplicada para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos.

TABELA 11 Coeficientes de Nash-Sutcliffe para as hidrógrafas calibradas pelo LISEM, nas cinco camadas de solo avaliadas na bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Eventos	Coeficiente de Nash-Sutcliffe				
	Camadas (mm)				
	150	300	450	600	1000
08/02/04	-1,48	-1,66	-2,50	-2,45	-2,10
11/02/06	0,23	-0,93	-1,11	-1,13	-1,03
23/02/04	0,50	-1,40	0,46	0,43	0,40
15/12/06	0,48	0,04	-0,16	-0,25	0,45
21/02/04	-2,73	-2,72	-2,82	-2,80	-2,95
28/02/06	0,21	-0,50	-0,69	0,60	0,60
14/02/04	-0,59	-0,25	0,14	0,38	0,63
18/03/05	0,43	-0,05	-0,30	0,77	0,74
08/03/05	0,04	-0,01	0,23	0,13	0,09
07/04/04	-2,12	-1,12	-0,83	-0,27	-2,54
05/04/04	-0,04	-0,24	-0,83	0,23	-0,30
19/03/04	0,04	-0,42	-0,70	-0,84	-0,14
09/12/04	-0,08	-0,73	0,52	0,50	0,48
21/03/05	0,57	0,39	-0,30	0,68	0,79
04/04/04	0,34	0,45	-0,04	-0,16	-0,45
24/02/04	0,34	0,69	0,50	0,34	0,06

O coeficiente de Nash-Sutcliffe pode variar de menos infinito até 1. Quando igual a 1, corresponde a um ajuste perfeito; se superior a 0,75, o desempenho do modelo é considerado adequado e bom; se entre 0,36 e 0,75, o desempenho é aceitável e se menor que 0,36 inaceitável, conforme Collischonn (2001). Os resultados obtidos para o coeficiente de Nash-Sutcliffe, pelas hidrógrafas calibradas pelo LISEM, estão apresentados na Tabela 11. A translação das hidrógrafas simuladas em relação às observadas proporcionaram baixo desempenho do LISEM, quando avaliado pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe, acarretando, principalmente, valores negativos para este, que compara a variância não só da vazão máxima, mas sim, de todos os valores de vazão da hidrógrafa e posterior divisão desta variância pela variância das vazões observadas.

Os resultados apresentados na Tabela 11 mostram que, em 26,25% das calibrações (21 situações), o LISEM apresentou rendimento classificado como aceitável e, em algumas delas, esteve bem próximo do adequado, atingindo esta classificação em 2,5% das situações apresentadas (duas calibrações). De maneira geral, os eventos mais intensos apresentaram melhor desempenho, correspondendo às expectativas, pois, entre os onze últimos eventos, apenas o de 07/04/04 apresentou coeficiente de Nash-Sutcliffe discrepante com relação aos demais. Entre os dezesseis eventos trabalhados, os registrados em 23/02/04 (classe 2) e 21/03/05 (classe 5) foram os que apresentaram os melhores desempenhos, pois, das cinco espessuras avaliadas, o desempenho do evento de 23/02/04 foi considerado aceitável em quatro, não sendo classificado assim, apenas para a espessura de 300 mm; já para o evento de 21/03/05, o rendimento foi aceitável em três espessuras, adequado e bom em uma e apenas para a espessura de 450 mm não atingiu índice satisfatório. Os piores resultados foram apresentados pelos eventos das classes 1 ($I_{\max} < 10 \text{ mm h}^{-1}$) e 4 ($30 \leq I < 40 \text{ mm h}^{-1}$), as quais não apresentaram nenhuma situação com rendimento aceitável,

confirmando o baixo desempenho do LISEM para eventos de baixa intensidade de precipitação e pequena lâmina total precipitada.

5.3.2 Tempo de pico (Tp)

Na Tabela 12 observou-se os valores da variável hidrológica tempo de pico observados e simulados pelo LISEM. Nota-se grande variação para esta variável entre eventos de uma mesma classe de precipitação e também entre as próprias classes.

TABELA 12 Comparação entre resultados obtidos por simulação e observados para a variável resposta tempo de pico (Tp), em minutos e erros verificados (em %), registrados para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Eventos	Tempo de pico (minutos)										
	Obs.	Espessura das camadas (mm)									
		150		300		450		600		1000	
	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	
08/02/04	375	195	-48,00	195	-48,00	615	64,00	615	64,00	615	64,00
11/02/06	255	120	-52,94	120	-52,94	120	-52,94	120	-52,94	120	-52,94
23/02/04	330	285	-13,64	165	-50,00	270	-18,18	255	-22,73	255	-22,73
15/12/06	405	360	-11,11	315	-22,22	300	-25,93	300	-25,93	450	11,11
21/02/04	240	555	131,25	555	131,25	555	131,25	555	131,25	555	131,25
28/02/06	390	330	-15,38	270	-30,77	270	-30,77	420	7,69	420	7,69
14/02/04	900	975	8,33	975	8,33	975	8,33	975	8,33	855	-5,00
18/03/05	420	315	-25,00	270	-35,71	270	-35,71	435	3,57	435	3,57
08/03/05	270	225	-16,67	225	-16,67	225	-16,67	225	-16,67	225	-16,67
07/04/04	165	420	154,55	405	145,45	405	145,45	390	136,36	555	236,36
05/04/04	300	60	-80,00	105	-65,00	90	-70,00	135	-55,00	135	-55,00
19/03/04	225	240	6,67	195	-13,33	195	-13,33	150	-33,33	300	33,33
09/12/04	360	180	-50,00	165	-54,17	270	-25,00	270	-25,00	270	-25,00
21/03/05	315	210	-33,33	225	-28,57	165	-47,62	300	-4,76	300	-4,76
04/04/04	165	285	72,73	180	9,09	135	-18,18	135	-18,18	120	-27,27
24/02/04	270	315	16,67	240	-11,11	225	-16,67	195	-27,78	195	-27,78

Obs.: valores observados; Sim.: valores obtidos por simulação.

Segundo Tucci (2004), este alto desvio é natural, pois há parâmetros que afetam o tempo de pico que são variáveis de evento para evento, como a intensidade da precipitação e também as condições iniciais de θ_{ap} do solo.

A condição de θ_{ap} afeta o tempo de pico na medida em que influi na infiltração de água no solo e, conseqüentemente, na intensidade de chuva efetiva. Altas condições de umidade diminuem a infiltração e aumentam o escoamento superficial direto, com conseqüente redução no tempo de pico.

Analisando o efeito da espessura da camada de solo no tempo de pico, pode-se dizer que, quanto mais profunda, maior a capacidade de armazenamento de água e menor a possibilidade de ocorrência de precipitação efetiva, tendo efeito contrário ao da θ_{ap} . Ou seja, para maiores espessuras, espera-se que haja retardamento no tempo de pico.

Reportando-se à Tabela 12, depreende-se que há tendência de antecipação do tempo de pico pelo LISEM, para a maioria das situações estudadas (53 em 80 possibilidades), ou seja, percentual de 66,25%, contrariando as expectativas de que este fosse retardado para as camadas mais profundas. No entanto, esta tendência está em conformidade com os elevados percentuais de umidade de calibração apresentados nas Tabelas 8 e 9. Há a predominância de baixos valores do potencial matricial, ou seja, elevados valores de θ_{ap} .

Mello (2003) relata que, para a estimativa do tempo de pico em sub-bacias hidrográficas, é necessário que o modelo contemple a θ_{ap} , especialmente quando se busca a modelagem das respostas hidrológicas a eventos isolados, caso do presente estudo. Ainda segundo este autor, elevados valores de θ_{ap} além de anteciparem o tempo de pico, são responsáveis também pela geração de maiores deflúvios e, conseqüentemente, maiores vazões de pico.

Outro fato que pode ajudar a explicar a tendência de antecipação no tempo de pico, para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, são as elevadas intensidades de precipitação para os eventos trabalhados, fazendo com que haja

predominância das características dos eventos de precipitação e não das condições fisiográficas da bacia hidrográfica. Isto se confirmada, confrontando-se os dados apresentados nas Tabelas 5 e 12, referentes aos seis últimos eventos de precipitação (classes 5 e 6), cuja I_{\max} está entre 40 a 50 mm h^{-1} e maior que 50 mm h^{-1} . Observa-se antecipação do tempo de pico em 83,33% das situações analisadas (classes 5 e 6), enquanto que para os seis primeiros eventos (classes 1 e 2), I_{\max} menor que 10 mm h^{-1} e entre 10 a 20 mm h^{-1} , este percentual reduz-se para 63,33%. Stolte et al. (2003) calibraram e validaram o LISEM para eventos de alta intensidade de precipitação (70 mm h^{-1} , 100 mm h^{-1} e 200 mm h^{-1}) e observaram que os retardamentos do tempo de pico simulado em relação aos valores observados foram de 9 minutos, 2 minutos e 0 minuto, respectivamente, ou seja, à medida que se trabalha com eventos de maior intensidade de precipitação, há predominância das características do evento influenciando a antecipação do tempo de pico, concordando com os resultados apresentados para a bacia hidrográfica em questão.

Ainda com relação às informações contidas na Tabela 12, percebe-se que os erros percentuais de antecipação do tempo de pico são menores que os erros de retardamento para todas as espessuras da camada de solo estudada. Os erros médios de antecipação de tempo de pico por espessura de camada foram: -34,61%; -35,29%; -30,92%; -19,24% e -23,36% enquanto que, para o retardamento, estes atingem 65,03%, 73,53%, 87,26%, 58,54% e 69,62%, para 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, respectivamente. Estes resultados estão em conformidade com o trabalho de calibração do LISEM realizado por Hessel et al. (2003b), para eventos com I_{\max} entre 60 e 70 mm h^{-1} , os quais relatam erros de antecipação no tempo de pico entre -9,52% a -25% e erros de retardamento variando de 48,78% a 81,09%.

Para situações em que há retardamento no tempo de pico, uma possível explicação é a predominância das condições fisiográficas da bacia, aliada a

baixos conteúdos de θ_{ap} . No caso da bacia hidrográfica em questão, pode-se admitir a atuação da sua área de várzea como filtro, amortecendo o deslocamento da massa de água, retardando o tempo de pico. Já para a situação de antecipação, uma possível explicação pode estar atrelada aos valores adotados para o coeficiente de atrito superficial (n). Outra explicação para a antecipação do tempo de pico, é a forma da bacia, pois esta se aproxima bem a uma circunferência, pois seu Kc é igual a 1,14 conforme Silva (2006).

O LISEM utiliza o método da onda cinemática e a equação de Manning para a distribuição do fluxo sobre a superfície e em canais e, assim sendo, é possível que os valores de (n) adotados propiciem maiores velocidades de deslocamento da água sobre a bacia, antecipando, conseqüentemente, o tempo de pico. Cabe ressaltar que os valores de (n) utilizados neste trabalho são aqueles recomendados por Takken et al. (1999), não sendo, portanto, obtidos de medições diretas na bacia hidrográfica.

Uma das conseqüências esperadas da antecipação do tempo de pico é a ocorrência de maiores vazões máximas para a bacia. A rápida concentração do escoamento superficial na rede de drenagem, seja pela predominância das características dos eventos de precipitação (maior intensidade), quer por suas condições fisiográficas (intensidade da rede de drenagem, declividade e θ_{ap}), imprimem maiores velocidades ao fluxo de água, diminuem o tempo de oportunidade para a infiltração e proporcionam maior ocorrência de precipitação efetiva, resultando em maiores vazões.

5.3.3 Vazão de pico (Q_p)

Os resultados obtidos para a vazão de pico podem ser visualizados na Tabela 13. Nota-se que as diferenças entre os valores observados e simulados (erros) são bem menores, quando comparadas àquelas apresentadas para o tempo de pico (Tabela 12), o que indica boa correspondência entre as vazões

observadas e simuladas. Os menores erros para a Q_p podem ser atribuídos à metodologia de calibração adotada, pois esta tinha a vazão de pico como a principal referência e meta a ser alcançada pelas tentativas de calibração, dada a alta variabilidade deste atributo hidrológico e à dificuldade de sua modelagem, bem como sua importância.

TABELA 13 Comparação entre resultados obtidos por simulação e observados para a variável resposta vazão de pico (Q_p), em $L s^{-1}$, e erros verificados, valores em %, registrados para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Vazão de pico ($L s^{-1}$)										
	Obs.	Camadas (mm)									
		150		300		450		600		1000	
	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	
08/02/04	21,9	20,6	-6,18	23,4	6,76	21,9	-0,2	21,8	-0,33	19,8	-9,35
11/02/06	4,7	5,7	21,46	5,1	8,58	4,3	-7,83	4,3	-8,11	4,9	6,47
23/02/04	76,2	80,4	5,63	78,3	2,85	80,1	5,23	75,8	-0,44	74,5	-2,09
15/12/06	78,3	77,9	-0,54	80,6	2,94	81,3	3,81	79,9	2,10	79,2	1,08
21/02/04	174,7	177,8	1,82	171,7	-1,71	177,5	1,58	172,9	-1,03	182,1	4,26
28/02/06	98,7	96,4	-2,38	98,7	0,01	96,9	-1,80	100,3	1,55	96,4	-2,43
14/02/04	52,1	54,3	4,21	54,5	4,61	55,5	6,54	52,8	1,30	50,1	-3,85
18/03/05	105,7	107,9	2,11	108,1	2,25	107,8	1,91	103,9	-1,71	105,4	-0,36
08/03/05	311,8	314,3	0,81	317,1	1,72	313,0	0,41	320,6	2,85	310,2	-0,49
07/04/04	81,6	83,6	2,38	81,9	0,31	84,0	2,95	80,3	-1,65	85,1	4,24
05/04/04	89,3	105,9	18,69	108,4	21,48	106,3	19,04	102,3	14,64	81,20	-9,04
19/03/04	106,4	88,8	-16,57	92,9	-12,70	90,1	-15,34	102,40	-3,76	111,45	4,74
09/12/04	116,7	114,7	-1,75	113,0	-3,15	114,9	-1,48	117,4	0,61	122,2	4,72
21/03/05	147,1	146,2	-0,61	142,8	-2,90	142,5	-3,10	146,1	-0,67	146,3	-0,54
04/04/04	141,8	143,1	0,90	143,3	1,02	144,6	1,98	142,4	0,41	141,7	-0,07
24/02/04	115,5	113,1	-2,04	117,4	1,67	115,5	0,07	115,9	0,38	113,2	-1,91

Obs.: valores observados; Sim.: valores obtidos por simulação.

Esta prioridade se fez necessária, pois, segundo Hessel et al. (2003a), as demais variáveis resposta, como escoamento superficial direto e índice C, dependem diretamente da vazão de pico, além de ser utilizada também no cálculo da produção total e transporte de sedimentos e também por ser um dos principais parâmetros utilizados no dimensionamento de obras hidráulicas.

Detecta-se que a Q_p foi superestimada na maioria das situações analisadas, o que está em conformidade com a antecipação do tempo de pico (Tabela 12). Conforme comentários anteriores, maiores valores para Q_p seriam um dos efeitos da antecipação do T_p . O maior erro apresentado pela Tabela 13 superestima a Q_p do dia 11/02/06 em 21,46%, para a camada de solo de 150 mm de espessura, situação que teve o tempo de pico antecipado em 52,94%, confirmando o efeito da antecipação do tempo de pico na magnitude de Q_p .

Explorando um pouco mais os dados da Tabela 13, depreende-se que as médias dos erros subestimando a vazão de pico foram de -1,81%, -2,59%, -2,43%, -1,80% e -1,62%, respectivamente e, superestimando, alcançaram os percentuais médios de 4,91%, 2,78%, 2,54%, 1,31% e 4,11%, respectivamente, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, respectivamente. Nota-se que os erros na Q_p , em função da espessura da camada analisada, foram baixos e de mesma magnitude para todas as camadas, o que permite pressupor que as vazões máximas sofrem pequena interferência da espessura da camada de solo analisada. Estes resultados estão em conformidade com Mello (2003) que demonstrou, estatisticamente, que as diferentes condições de umidade do solo em espessura não produziram influência nos valores da vazão de pico.

Fazendo-se a análise anterior para as classes de intensidade de precipitação, registraram-se erros subestimando as vazões máximas em -6,00%, -1,06%, -2,36%, -0,87%, -1,57% e -1,02%, respectivamente e, superestimando, em 9,46%, 3,20%, 2,34%, 2,20%, 1,66% e 0,89%, respectivamente, para as

intensidades de precipitação de $I < 10 \text{ mm h}^{-1}$, $10 \leq I < 20 \text{ mm h}^{-1}$, $20 \leq I < 30 \text{ mm h}^{-1}$, $30 \leq I < 40 \text{ mm h}^{-1}$, $40 \leq I < 50 \text{ mm h}^{-1}$ e $I \geq 50 \text{ mm h}^{-1}$, respectivamente.

Ao contrário da espessura das camadas de solo, detecta-se que há tendência geral de menores erros para as vazões máximas à medida que se trabalha com eventos de precipitação de maior intensidade. Tal fato permite inferir que as vazões máximas são mais sensíveis às características da precipitação que às condições fisiográficas da bacia hidrográfica e ao conteúdo de θ_{ap} . Resultados semelhantes são descritos por Mello et al. (2007) que também constataram tendência geral de menores erros para maiores vazões, oriundas de eventos de maior intensidade de precipitação, concluindo que as vazões máximas são mais sensíveis às características da precipitação e que a umidade do solo pouco influencia no comportamento de vazões mais elevadas.

De acordo com Silva (2006), para a região do presente estudo, tem-se a concentração de 70% das precipitações totais anuais entre janeiro a março, sendo parte destas, do tipo convectivas, com altas intensidades e pequena duração, o que favorece a ocorrência de cheias neste período, para a bacia hidrográfica em questão. Outro fato que contribui para o registro das vazões máximas, neste período, é que o armazenamento de água dos solos da região, neste período, é próximo do máximo, o que é consequência da elevada umidade dos mesmos, quase sempre próximos à capacidade de campo (Mello, 2003), favorecendo o escoamento superficial direto.

No trabalho de calibração e validação do LISEM realizado por De Roo & Jetten (1999), para eventos de intensidade de $8,9 \text{ mm h}^{-1}$, $16,8 \text{ mm h}^{-1}$, $17,0 \text{ mm h}^{-1}$ e $27,2 \text{ mm h}^{-1}$, os erros de subestimativa da vazão de pico foram de -4,46%, -81,48%, -62,97% e -4,54%, respectivamente, enquanto o percentual do erro máximo, superestimando a vazão de pico, atingiu 1,26% para evento de precipitação, com I_{\max} de $18,1 \text{ mm h}^{-1}$. Portanto, erros maiores que aqueles obtidos pelo presente trabalho. Hessel et al. (2003b) calibraram e validaram o

LISEM para eventos com intensidade de precipitação de 47,2 mm h⁻¹, 66,2 mm h⁻¹ e 69,9 mm h⁻¹ e os erros apresentados para as vazões máximas por estes autores foram -2,14%, -1,13% e -0,64%. Ou seja, são semelhantes à magnitude dos erros obtidos neste estudo (Tabela 13), o que por sua vez, credita consistência à metodologia de calibração adotada.

Mello (2003) avaliou a aplicabilidade do método CN-SCS a eventos isolados de precipitação em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero para modelar o deflúvio e a vazão de pico e relatou erros de elevada magnitude, acima de 200%, para a segunda variável. O autor atribui estes erros às bases metodológicas do modelo e ao fato de este não ter nenhum tipo de ajuste ou modelagem com base nas condições hidrológicas antecedentes que governam o fenômeno. Alerta, ainda, para o fato de que a forma como a interação hidrologia e pedologia está apresentada pode comprometer a aplicação do método, pela dificuldade em se enquadrar solos tropicais ao que é proposto pelo método.

Percebe-se que os erros apresentados pelo LISEM são bem inferiores aos relatados por Mello (2003), o que pode ser atribuído à estrutura do modelo, que considera não só a variabilidade espacial dos solos presente na bacia, mas também a variabilidade espacial de fatores, como cobertura vegetal e condições iniciais de umidade dos solos, além do modelo numérico do terreno, retratando as condições topográficas que governam o fenômeno, como sugeriu o autor. Vale ressaltar que, no método CN-SCS, os parâmetros representativos do modelo (abstração inicial, tipo de solo e armazenamento potencial do solo) são adotados com um único e invariável valor para toda a bacia, o que não acontece no LISEM pelo fato de ser distribuído.

Avanzi (2005) modelou o escoamento superficial e a erosão hídrica em uma microbacia hidrográfica na região dos tabuleiros costeiros, ES, utilizando o método CN-SCS, e também relatou dificuldades de se trabalhar com este

modelo, sem ajustes prévios. A primeira dificuldade consiste em adotar um grupo representativo para os solos, seja pela diversidade de atributos físicos que ocorrem nas bacias hidrográficas ou pelo uso destes, o que leva a adotar um CN não representativo, do ponto de vista hidrológico. Com relação aos resultados obtidos, o autor comenta que não foram satisfatórios e que quanto maior o CN adotado (piores condições de infiltração), maiores foram as imprecisões nas estimativas dos parâmetros de escoamento. Entretanto, a partir de um determinado CN, os erros do deflúvio tenderam a diminuir, porém, permaneceram elevados. O autor relata, ainda, que os resultados foram altamente comprometedores, demonstrando a baixa aplicabilidade do método para estimativas de eventos isolados de escoamento.

Os resultados obtidos pelo LISEM, foram satisfatórios e confiáveis, demonstrando que este pode ser aplicado para a previsão do comportamento hidrológico de eventos isolados de precipitação, não se esquecendo da complexidade de obtenção das informações espacializadas para descrever as condições hidrológicas das bacias hidrográficas, o volume de informações a ser trabalhado, bem como a forma trabalhosa de lidar com tais informações.

Outro modelo que vem sendo empregado em estudos de modelagem hidrológica no Brasil é o TOPMODEL, que também considera a bacia hidrográfica inteira como uma unidade e no qual as variáveis e os parâmetros são tidos como valores únicos para toda a área (Ferreira, 2004), o que consiste numa simplificação. O TOPMODEL estabelece que a topografia é a informação fundamental na geração do escoamento superficial direto, o que é uma pressuposição parcialmente verdadeira, pois há outras informações, como as próprias características do evento de precipitação, a variabilidade espacial do solo e sua condutividade hidráulica, bem como a umidade antecedente do solo, que não são menos importantes que as condições topográficas e também influenciam diretamente o escoamento superficial direto. Os resultados obtidos

por Ferreira (2004), aplicando o modelo TOPMODEL, mostram que há uma tendência do modelo de superestimar as vazões máximas e, em alguns casos, a vazão simulada foi até cinco vezes superior à observada.

5.3.4 Escoamento superficial direto (ESD)

O deflúvio superficial total sumariza diretamente as interações e as condições que regeram o escoamento superficial direto na bacia hidrográfica, tais como: formato da bacia, vazão de pico, tempo de pico, condições iniciais de umidade, condutividade hidráulica do solo, armazenamento em microdepressões superficiais e interceptação pelo dossel da vegetação existente, dentre outras. Assim, espera-se que os eventos que apresentaram os melhores ajustes para os parâmetros discutidos anteriormente (eventos das maiores classes de intensidade de precipitação) apresentem também melhores ajustes para esta variável resposta. Os resultados obtidos para o escoamento superficial direto no presente estudo estão apresentados na Tabela 14.

Percebe-se que, de maneira geral, há uma tendência de subestimar esta variável nas simulações com o LISEM, situação registrada em 69 das 80 possíveis, ou seja, em apenas 13,75% (11 registros) o escoamento superficial direto foi superestimado, na média, em 12,98%. Os resultados subestimando o escoamento superficial direto eram esperados, pois os solos da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela apresentam alta k_0 , culminando em subestimativa do ESD, conforme Tabela 14 e superestimativa da parcela infiltrada (Tabela 10), o que foi confirmado pelos resultados apresentados. Se, durante a calibração, o LISEM permitisse variações nos valores da condutividade hidráulica, partes das diferenças entre ESD observado e calibrado poderiam ser menores, contribuindo, assim, para aumentar a precisão do modelo.

Uma das explicações possíveis para a tendência de subestimativa do deflúvio total na calibração do LISEM está associada à separação do escoamento

superficial direto do subterrâneo, uma vez que a bacia hidrográfica apresenta fluxo perene. Segundo Tucci (2005), sempre haverá incerteza associada à separação dos escoamentos numa hidrógrafa, sendo plausível admitir, em alguns casos deste estudo, que os erros encontrados são, em parte, devidos a este aspecto.

TABELA 14 Comparação entre resultados obtidos por simulação e observados para a variável resposta escoamento superficial direto (ESD), em m³, e erros (em %) registrados para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Eventos	Escoamento superficial direto (m ³)										
	Obs.	Camadas (mm)									
		150		300		450		600		1.000	
	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	
08/02/04	487,8	147,9	-69,7	133,1	-72,7	335,1	-31,3	341,3	-30,0	320,8	-34,2
11/02/06	81,8	78,3	-4,3	41,7	-49,1	36,9	-55,0	36,6	-55,3	39,8	-51,3
23/02/04	1.768,3	1.472,7	-16,7	529,0	-70,1	1.452,6	-17,9	1.351,8	-23,6	1.307,5	-26,1
15/12/06	1.971,8	1.233,4	-37,4	926,8	-53,0	830,6	-57,9	789,2	-60,0	1.685,6	-14,5
21/02/04	2.672,8	1.396,0	-47,8	1.347,3	-49,6	1.400,5	-47,6	1.411,2	-47,2	1.480,8	-44,6
28/02/06	1.918,0	1.739,2	-9,3	1.341,1	-30,1	1.095,3	-42,9	2.463,5	28,4	2.404,3	25,4
14/02/04	1.644,0	483,7	-70,6	843,8	-48,7	1.019,0	-38,0	1.038,3	-36,8	1.163,7	-29,2
18/03/05	1.637,7	1.777,5	8,5	1.425,5	-13,0	1.304,5	-20,3	1.813,9	10,8	1.878,1	14,7
08/03/05	6.259,2	4.938,2	-21,1	4.354,7	-30,4	4.686,8	-25,1	4.536,3	-27,5	4.335,7	-30,7
07/04/04	1.490,3	1.234,0	-17,2	1.469,9	-1,4	1.466,9	-1,6	1.542,0	3,5	900,1	-39,6
05/04/04	1.755,0	1.719,5	-2,0	1.533,1	-12,6	1.223,4	-30,3	1.314,72	-25,1	974,0	-44,5
19/03/04	2.123,2	1.321,3	-37,8	1.039,8	-51,0	942,3	-55,6	908,7	-52,2	1.808,4	-14,8
09/12/04	2.204,8	2.140,2	-2,9	1.702,6	-22,8	2.102,8	-4,6	2.140,3	-2,9	2.215,7	0,5
21/03/05	2.192,9	2.280,1	4,0	2.541,1	15,9	1.897,3	-13,5	2.451,3	11,8	2.617,6	19,4
04/04/04	2.940,4	2.917,2	-0,8	2.133,0	-27,5	1.671,5	-43,2	1.583,2	-46,2	1.430,5	-51,4
24/02/04	1.935,3	1.877,0	-3,0	1.762,6	-8,9	1.399,0	-27,7	1.382,9	-28,5	1.308,9	-32,4

Obs.: valores observados; Sim.: valores obtidos por simulação.

Os efeitos do valor fixo da condutividade hidráulica são mais pronunciados em bacias hidrográficas que têm seus solos mecanizados, pois, durante um forte evento de precipitação, pode ocorrer selamento superficial pelo desprendimento de partículas e isso muda, rapidamente, a condutividade hidráulica saturada do solo. Esta mudança de condutividade hidráulica durante o evento de precipitação não é simulada pelo LISEM.

Para as classes de menor I_{\max} e menor volume total precipitado, eventos com $I_{\max} < 20 \text{ mm h}^{-1}$, o ESD foi subestimado, em média, em 42,70%, podendo atingir até 72,70%, ao passo que, para as duas maiores classes de I_{\max} a média deste percentual é de 27,40%.

Os menores erros para os eventos de maior intensidade de precipitação podem ser explicados pelo fato das condições de ESD de eventos mais intensos serem governadas pelas próprias características do evento e sofrerem menor interferência das condições de θ_{ap} e de k_0 . Por outro lado, pode-se dizer que, para eventos cuja intensidade de precipitação não supere a capacidade de infiltração, há predominância de fluxo subsuperficial ou subterrâneo, sendo este um processo não modelado pelo LISEM, o que acarreta maiores erros nas simulações para eventos desta natureza.

Os registros de erros superestimando o deflúvio superficial total são observados para eventos cuja I_{\max} e o total precipitado são iguais ou superiores a 20 mm, valores que se aproximam da k_0 e da CTA para a camada de 150 mm de espessura. Das 11 situações de superestimativa, oito foram registradas para as camadas mais espessas, 600 mm e 1.000 mm, respectivamente. Uma das possíveis explicações para este fato pode ser a maior umidade do solo nestas espessuras, o que diminui sua capacidade de armazenamento adicional, corroborando para que maior parcela da precipitação se converta em escoamento superficial direto.

Nesse sentido, Mello et al. (2007) registraram para ambientes de bacias hidrográficas constituídos de pastagens, solos mais úmidos a maiores profundidades (50 a 80 cm), ao passo que, nas camadas superficiais (20 cm), o solo apresenta-se mais seco, provavelmente, refletindo o consumo das gramíneas e as taxas de evaporação direta. Solo mais úmido possui menor capacidade de armazenamento de água e maior potencial para produzir escoamento superficial direto, o que culminou em superestimativa do ESD para estas camadas, conforme apresentado na Tabela 14.

Os erros de calibração para o ESD apresentados na Tabela 14 são compatíveis com aqueles apresentados por De Roo & Jetten (1999), os quais apresentaram erros de -22,28% (I_{\max} de 8,9 mm h⁻¹), -37,79% (I_{\max} de 18,1 mm h⁻¹), -77,22% (I_{\max} de 27,2 mm h⁻¹), -76,69% (I_{\max} de 17,0 mm h⁻¹) e -85,14% (I_{\max} de 16,8 mm h⁻¹), não tendo sido registrados por estes autores, casos de superestimativa do ESD. Hessel et al. (2003a) apresentam erros de calibração do LISEM em que houve superestimativa do ESD em 45,05% (I_{\max} de 69,9 mm h⁻¹), 56,60% (I_{\max} de 47,2%) e 25,24% (I_{\max} de 66,2%). Esta superestimativa do deflúvio, segundo estes autores, se deve aos baixos valores de k_0 adotados na calibração do modelo, na ordem de 20% dos valores mensurados em campo, sendo de 1 mm h⁻¹ para solos cultivados e 3,0 mm h⁻¹ para pastagem.

O escoamento superficial direto foi objeto de estudo de Silva (2006) na bacia hidrográfica do ribeirão Marcela pelos métodos de Nash e CN-SCS. No que se refere aos resultados obtidos pelo CN-SCS, o autor relata que os resultados não foram satisfatórios e que as estimativas do deflúvio apresentaram erros de elevada magnitude para eventos isolados; o erro médio por este método foi de 1.663%, atingindo um valor máximo de 29.250% e mínimo de 2%. O autor comenta, ainda, que estes valores demonstram a baixa aplicabilidade do método para eventos isolados sem prévio ajuste ou modelagem dos processos hidrológicos envolvidos. Isso é atribuído à adoção de um número da curva

constante para toda a bacia, baseado nas características físicas dos solos, cobertura vegetal e precipitação antecedente. Os resultados obtidos por Silva (2006), empregando o modelo de Nash (conceitual), foram considerados de boa precisão, com coeficiente de Nash médio de 0,853 (k e n gerados pelo método dos momentos) com o erro para o deflúvio total variando de -9,73% a -147,45%. Estes resultados são frutos da escolha do melhor ajuste de 400 tentativas de calibração para cada um dos 20 eventos analisados. O modelo de Nash considera uma precipitação uniforme sobre a bacia e sua propagação até a sua seção de controle. A consideração de reservatórios simula uma amortização da vazão de pico, sendo esta a principal função e outra de translação, ou seja, de um movimento de ondas do escoamento, cujo efeito é mais pronunciado em canais ao longo da bacia.

5.3.5 Índice C

O índice C, para as cinco espessuras da camada de solo analisadas e os 16 eventos de precipitação agrupados em seis classes em função da intensidade de precipitação, podem ser observados na Tabela 15.

A cada evento de precipitação, tem-se uma variação considerável de sua intensidade e duração e dos percentuais interceptados pela vegetação, armazenados na superfície em microdepressões e infiltração, o que, conseqüentemente, provoca variações no índice C, conforme apresentado na Tabela 15. Nota-se que, de maneira geral, este coeficiente foi subestimado pelo LISEM, pois este é uma razão direta entre o escoamento superficial direto e a precipitação total. Como visto anteriormente, o numerador desta razão foi subestimado, fazendo com que a tendência de subestimativa fosse transferida para o índice C, com a mesma ordem de grandeza dos erros e tendências apresentados para o escoamento superficial direto.

TABELA 15 Comparação entre resultados obtidos por simulação e observados para a variável resposta índice C (em %) e erros verificados (em %), registrados para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Índice C (%)										
	Obs.	Camadas (mm)									
		150		300		450		600		1.000	
	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	
08/02/04	1,75	0,53	-69,87	0,47	-72,90	1,19	-31,73	1,22	-30,42	1,14	-34,65
23/02/04	6,34	5,25	-17,22	1,89	-70,27	5,18	-18,34	4,82	-24,01	4,66	-26,51
11/02/06	0,29	0,28	-4,78	0,15	-49,49	0,13	-55,29	0,13	-55,63	0,14	-51,54
15/12/06	1,52	0,94	-37,82	0,71	-53,27	0,63	-58,15	0,60	-60,20	1,29	-15,05
21/02/04	3,38	1,76	-48,05	1,70	-49,85	1,76	-47,87	1,78	-47,49	1,86	-44,88
28/02/06	1,88	1,77	-5,80	1,37	-27,34	1,12	-40,69	2,51	33,46	2,45	30,21
14/02/04	0,98	0,29	-70,71	0,50	-48,88	0,61	-38,27	0,62	-37,04	0,69	-29,49
18/03/05	1,68	1,81	7,87	1,45	-13,53	1,33	-20,86	1,85	10,07	1,91	13,95
8/3/2005	5,18	4,06	-21,57	3,58	-30,84	3,86	-25,55	3,73	-27,95	3,57	-31,13
07/04/04	1,09	0,89	-17,76	1,07	-2,02	1,06	-2,21	1,12	2,85	0,65	-40,02
05/04/04	1,25	1,63	30,72	1,46	16,56	1,16	-6,96	1,25	0,00	0,93	-25,60
19/03/04	1,81	1,12	-38,07	0,88	-51,27	0,80	-55,80	0,69	-61,77	1,54	-14,92
09/12/04	2,79	2,69	-3,51	2,14	-23,26	2,65	-5,20	2,69	-3,51	2,79	-0,11
21/03/05	1,97	2,03	3,10	2,26	14,92	1,69	-14,21	2,18	10,86	2,33	18,38
04/04/04	1,39	1,37	-1,15	1,01	-27,70	0,79	-43,38	0,75	-46,33	0,67	-51,51
24/02/04	1,13	1,09	-3,56	1,02	-9,42	0,81	-28,09	0,80	-28,98	0,76	-32,80

Obs.: valores observados; Sim.: valores obtidos por calibração.

Uma comparação entre os valores do índice C observados (segunda coluna Tabela 15) e aqueles recomendados por Pruski et al. (2003), para as classes de solos presentes na bacia hidrográfica em questão, mostra que estes são bem inferiores àqueles. Esse resultado vai ao encontro dos relatos de Silva (2006), em que o ESD representa, em média, menos de 32% do escoamento total anual da bacia e que esta apresenta boas condições de recarga de seus aquíferos,

o que requer, necessariamente, baixos valores para o índice C de escoamento superficial (Tabela 15) e elevado percentual de infiltração (Tabela 10).

5.4 Validação

Os resultados da validação estão apresentados nas Tabelas 16 (parcelas da precipitação), 17 (tempo de pico), 17 (vazão de pico), 19 (escoamento superficial direto) e 20 (índice C).

Comparando-se as lâminas infiltradas, armazenadas na superfície em microdepressões, interceptadas pela vegetação e que ainda estava em movimento ao término da calibração (Tabela 10) com estas mesmas lâminas para os eventos validados (Tabela 16), percebe-se que, na validação, a lâmina infiltrada continuou sendo maior que as demais, mas, registrou-se redução desta.

Na etapa de calibração, o valor médio da parcela infiltrada foi de 91,34% do volume total precipitado, atingindo valor máximo de 96,08% e mínimo de 75,24%, com desvio padrão de $\pm 3,90$ mm. Já na validação, a lâmina média infiltrada foi de 81,09%, atingindo um percentual máximo de 96,06% e 39,44% para o mínimo, com desvio padrão de $\pm 24,48$ mm, respectivamente. Menor lâmina média infiltrada pode ser entendida como maior parcela da precipitação para ser armazenada em microdepressões e, conseqüentemente, maiores valores para a vazão de pico e escoamento superficial direto, o que já é um indicativo de que os resultados da validação podem não atingir o mesmo nível de precisão da calibração.

Analisando-se a parcela que se converteu em escoamento superficial direto, nota-se que a variação foi ainda maior. Na etapa de calibração, em média, apenas 1,6% do total precipitado compunha este segmento, chegando ao máximo de 5,25%, mínimo de 0,13%, com desvio padrão de $\pm 1,18$ mm, contra 12,34% (médio), 47,73% (máximo), 0,14% (mínimo) e $\pm 20,77$ mm (desvio padrão), na validação, aumentando ainda mais as suspeitas de baixa precisão para os eventos

validados. Esperava-se que, com a redução de aproximadamente 10% da lâmina infiltrada, houvesse uma aproximação entre o escoamento superficial direto observado e validado, uma vez que este foi subestimado em função de se superestimar a infiltração na etapa da calibração, fato que não aconteceu.

TABELA 16 Resultados obtidos pela validação para as parcelas de precipitação que se converteram em escoamento superficial direto (ESD), lâminas interceptada, infiltrada, armazenada na superfície (A. Super) e que ainda estava em movimento ao término da simulação (A. Movi.), para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Referência	Camadas (mm)	Parcelas da precipitação (mm)					
			P. total	ESD	Interceptada	Infiltrada	A. Sup.	A. Mov.
11/2/06 20:45	11/2/06 8:45	150	13,85	6,61	0,98	5,46	0,44	0,26
		300	13,85	6,56	0,98	5,51	0,44	0,26
		450	13,85	6,55	0,98	5,53	0,44	0,26
		600	13,85	6,55	0,98	5,53	0,44	0,26
		1000	13,85	6,55	0,98	5,52	0,44	0,26
12/04/04	0704/04	150	22,07	0,03	1,10	20,93	0,00	0,00
		300	22,07	0,05	1,10	20,90	0,01	0,00
		450	22,07	0,07	1,10	20,88	0,01	0,00
		600	22,07	0,09	1,10	20,86	0,01	0,00
		1000	22,07	0,07	1,10	20,89	0,00	0,00
11/03/06	21/03/05	150	51,47	1,46	1,49	47,85	0,25	0,32
		300	51,47	0,60	1,49	49,12	0,11	0,09
		450	51,47	0,49	1,49	49,39	0,05	0,02
		600	51,47	0,87	1,49	48,58	0,23	0,20
		1000	51,47	0,46	1,49	49,44	0,01	0,03
31/05/04	04/04/04	150	23,65	0,04	1,14	22,47	0,00	0,00
		300	23,65	0,04	1,14	22,47	0,00	0,00
		450	23,65	0,04	1,14	22,46	0,00	0,00
		600	23,65	0,04	1,14	22,46	0,00	0,00
		1000	23,65	0,04	1,14	22,46	0,00	0,00

P. total: precipitação total; A. Sup.: armazenamento superficial; A. Mov.: água que ainda estava em movimento ao término das simulações.

Grande parte destas diferenças parece ser causada pela grande sensibilidade do modelo a algumas das variáveis de entrada, como condutividade hidráulica saturada do solo, que pode ser alterada durante o próprio evento e também, ao conteúdo inicial de umidade. Esta grande sensibilidade pode ser explicada pelo fato de que o escoamento superficial direto na bacia parece acontecer sempre que um conteúdo de umidade do solo é alcançado. Este conteúdo de umidade inicial do solo relaciona o estado de saturação com a umidade inicial ou quando a intensidade de chuva é maior que a taxa de infiltração. Se este conteúdo não é alcançado, pouco ou nenhum escoamento superficial direto ocorre; quando alcançado, volumes repentinamente grandes de escoamento superficial direto são registrados. Próximo a estas condições, a resposta da bacia é muito sensível a pequenas mudanças na umidade antecedente do solo ou à intensidade das precipitações.

As demais parcelas, interceptação pelo dossel da vegetação, armazenamento em microdepressões superficiais e água ainda em movimento ao término das simulações, variaram pouco. Os percentuais médios para estas na calibração foram de 5,73%, 0,68% e 0,49%, respectivamente, enquanto que, na validação, alcançaram 4,94%, 0,87% e 0,54%, respectivamente.

A magnitude dos erros para as variáveis respostas, oriundos da validação é alta, principalmente para a vazão de pico (Tabela 18), escoamento superficial direto (Tabela 19) e o índice C (Tabela 20). Apenas a variável hidrológica tempo de pico (Tabela 17), apresentou a magnitude dos erros da validação equivalente aos erros obtidos na calibração.

Conforme discutido anteriormente, as variáveis do escoamento superficial direto apresentam sensibilidade às condições de umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação e, como pode ser visto pela Tabela 5, as condições de umidade do solo para os eventos calibrados diferiam das condições de umidade do solo para os eventos validados, o que condicionou a elevados

erros apresentados na validação, principalmente para o evento de 11/02/06, pertencente à menor classe de intensidade de precipitação, $I_{\max} < 10 \text{ mm h}^{-1}$. Estes resultados também reforçam a hipótese de que o LISEM não apresenta bom desempenho para eventos cuja intensidade de precipitação não supere a capacidade de infiltração do solo, pois, para tais condições, são remotas as possibilidades de ocorrência de escoamento superficial direto.

TABELA 17 Comparação entre os resultados obtidos por validação e observados para a variável resposta tempo de concentração (T_c), em minutos, e erros verificados, valores em %, registrados para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Referência	Obs.	Tempo de pico (minutos)									
			Camadas (mm)									
			150		300		450		600		1.000	
Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro			
11/2/06 20:45	11/2/06 8:45	600	345	-42,50	345	-42,50	345	-	345	-	345	-42,50
12/04/04	0704/04	285	255	-10,53	45	-84,21	45	84,21	45	84,21	45	-84,21
11/03/06	21/03/05	300	345	15,00	330	10,00	255	-	345	15,00	150	-50,00
31/05/04	04/04/04	105	225	114,29	45	-57,14	45	57,14	45	57,14	45	-57,14

Obs.: valores observados; Sim.: valores obtidos por calibração.

Resultados semelhantes aos apresentados nas Tabelas 18 e 19 são relatados por De Roo & Jetten (1999). Estes autores utilizaram parâmetros de calibração de eventos isolados de precipitação cuja intensidades foram de $8,9 \text{ mm h}^{-1}$, $18,1 \text{ mm h}^{-1}$, $27,2 \text{ mm h}^{-1}$, $17,0 \text{ mm h}^{-1}$ e $16,8 \text{ mm h}^{-1}$, na validação de eventos de precipitação com intensidade de precipitação semelhante ($11,3 \text{ mm h}^{-1}$, $23,0 \text{ mm h}^{-1}$, $11,8 \text{ mm h}^{-1}$, $14,2 \text{ mm h}^{-1}$ e $18,4 \text{ mm h}^{-1}$) e encontraram os seguintes valores para erros das variáveis respostas: i) deflúvio observado: 651 m^3 , 412 m^3 , 433 m^3 , 378 m^3 e 646 m^3 , respectivamente; deflúvio obtido a partir da validação: $132,5 \text{ m}^3$, $68,3 \text{ m}^3$, $649,4 \text{ m}^3$, $539,2 \text{ m}^3$ e $59,8 \text{ m}^3$, respectivamente,

o que corresponde a erros de -79,65%, -81,83%, +49,98%, +42,65% e -90,74%, respectivamente e ii) vazão de pico observada: 86,6 L s⁻¹, 28,5 L s⁻¹, 95,6 L s⁻¹, 343,6 L s⁻¹ e 153,8 L s⁻¹, respectivamente; vazão de pico obtida a partir da validação: 51,0 L s⁻¹, 10,4 L s⁻¹, 356,2 L s⁻¹, 345,4 L s⁻¹ e 6,7 L s⁻¹, respectivamente, o que corresponde a erros de -41,11%, -63,51%, 272,59%, 0,52% e -95,64%, respectivamente. Os resultados aqui apresentados também estão em conformidade com os relatos de Hessel et al. (2003a), pois, estes autores apontam erros na validação, para o tempo de pico, na faixa de -9,25% a 81,09%; para a vazão de pico, a variação foi de -99,77% a 99,73% e o deflúvio atingiu os percentuais de -93,32% a 99,68%.

Os resultados da validação mostraram que é pouco confiável utilizar parâmetros de calibração do LISEM de um dado evento de precipitação para prever comportamento hidrológico em outro, mesmo que de mesma intensidade e volume total precipitado. Isto se deve ao fato de que as condições iniciais de umidade antecedente do solo, as características do evento de precipitação e as variáveis associadas ao solo, dentre outras, quando tratadas à luz da variabilidade espacial, no contexto de bacias hidrográficas, produzem uma infinidade de situações, que se tornam características restritas e exclusivas do evento para qual foram calibradas. Hessel et al. (2003a) relatam que uma calibração separada é requerida para cada evento, tanto de baixa quanto de alta magnitude, o que limita a utilização do LISEM como um preditor de situações futuras. No entanto, os autores comentam que simulações de uso do solo sobre diferentes cenários são menos problemáticas, desde que a análise do cenário possa ser feita com eventos individuais e que tenham as condições iniciais de calibração mantidas. Esta recomendação também é descrita por De Roo & Jetten (1999) no que diz respeito à utilização do LISEM para prever o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, desde que todos os cenários usem os mesmos dados de precipitação e condições iniciais dos parâmetros de calibração.

TABELA 18 Comparação entre resultados obtidos por simulação e observados para a variável resposta vazão de pico (Q_p), em $L s^{-1}$ e erros verificados (em %), registrados para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Referência	Obs	Vazão de pico ($L s^{-1}$)									
			Camadas (mm)									
			150		300		450		600		1.000	
Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro			
11/2/06 20:45	11/2/06 8:45	21,71	2.234,23	10.193,30	2.215,70	10.107,91	2.211,00	10.086,26	2.210,52	10.084,05	2.212,44	10.092,89
12/04/04	07/04/04	127,77	8,45	-93,39	34,96	-72,64	41,64	-67,41	40,92	-67,97	39,92	-68,76
11/03/06	21/03/05	145,33	506,71	248,65	180,55	24,23	173,68	19,50	228,16	56,99	175,00	20,41
31/05/04	04/04/04	84,63	8,56	-89,89	20,86	-75,35	28,34	-66,51	32,33	-61,80	29,81	-64,78

Obs.: valores observados; Sim.: valores obtidos por simulação.

TABELA 19 Comparação entre resultados obtidos por simulação e observados para a variável resposta escoamento superficial direto (em m^3) e erros verificados (em %), registrados para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Referência	Obs	Escoamento superficial direto (m^3)									
			Camadas (mm)									
			150		300		450		600		1.000	
Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro			
11/2/06 20:45	11/2/06 8:45	568,13	31.244,52	5.399,50	31.005,59	5.357,44	30.952,21	5.348,05	30.947,18	5.347,16	30.967,94	5.350,82
12/04/04	07/04/04	1.869,25	143,99	-92,30	247,73	-86,75	314,33	-83,18	422,95	-77,37	311,51	-83,34
11/03/06	21/03/05	2.192,90	6.889,25	214,16	2856,16	30,25	2308,28	5,26	4091,79	86,59	2186,76	-0,28
31/05/04	04/04/04	2.160,18	173,63	-91,96	189,03	-91,25	198,02	-90,83	203,79	-90,57	206,71	-90,43

Obs.: valores observados; Sim.: valores obtidos por simulação.

TABELA 20 Comparação entre resultados obtidos por simulação e observados para a variável resposta índice C de escoamento superficial, em % e erros verificados (em %), registrados para a bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Referência	Obs	Índice C de escoamento superficial (%)									
			Camadas (mm)									
			150		300		450		600		1.000	
Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro	Sim.	Erro			
11/2/06 20:45	11/2/06 8:45	0,82	47,73	5.755,83	47,36	5.711,04	47,28	5.701,10	47,27	5.700,12	47,3	5.704,05
12/04/04	0704/04	1,800	0,138	-92,33	0,238	-86,78	0,301	-83,28	0,406	-77,44	0,299	-83,39
11/03/06	21/03/05	1,320	2,833	114,62	1,174	-11,06	0,949	-28,11	1,682	27,42	0,899	-31,89
31/05/04	04/04/04	1,940	0,155	-92,01	0,169	-91,29	0,177	-90,88	0,182	-90,62	0,185	-90,46

Obs.: valores observados; Sim.: valores obtidos por simulação.

6 CONCLUSÕES

- a) O LISEM apresentou alta sensibilidade ao conteúdo de umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação, sendo este o seu principal parâmetro de calibração, o qual se encontra próximo à saturação, obtida a baixas tensões.
- b) A espessura da camada de solo mostrou-se pouco importante quando analisada isoladamente. Contudo, ao associá-la ao conteúdo de umidade do solo, pôde-se perceber que quanto maior a espessura da camada, maior também o conteúdo de umidade ótimo de calibração do LISEM.
- c) A validação do LISEM mostrou que é pouco confiável a simulação hidrológica de eventos isolados de precipitação utilizando-se diretamente os parâmetros de calibração obtidos de outros eventos, mesmo que de igual intensidade de precipitação e volume total precipitado.
- d) O LISEM não produziu resultados satisfatórios para eventos cuja intensidade de precipitação foi menor ou igual à capacidade de infiltração de água no solo.
- e) O LISEM apresentou resultados satisfatórios quando aplicados a eventos de precipitação cuja intensidade superou os 30 mm h^{-1} .
- f) Desde de que mantidas as condições iniciais dos parâmetros de calibração para um mesmo evento, o LISEM poderá ser utilizado para prever comportamento hidrológico de bacias hidrográficas para diferentes usos e cenários.
- g) A vazão de pico foi sub ou superestimada em 82,50% das simulações em menos de 3%.
- h) O LISEM apresentou tendência de subestimar o escoamento superficial direto.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATAÍDE, W.F. **Modelagem do potencial matricial na frente de umidecimento para a aplicação no modelo de Green & Ampt modificado por Mein & Larson**. 2005. 63p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- AVANZI, J.C. **Modelagem do escoamento superficial e erosão hídrica em uma microbacia hidrográfica na região dos Tabuleiros Costeiros**. 2005. 68p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- BAPTISTA, M.; LARA, M. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 2.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2003. 437p.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6.ed. Viçosa: UFV, 2002. 656p.
- CARUZZO, A.R.; ROCHA, H.R. da. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) em regiões de pastagem e floresta com um método indireto (gap fraction) durante o Experimento AMC/LBA-1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira e Meteorologia. 2000. p. 2478-2485.
- COELHO, F.S.A. **Desenvolvimento de um modelo chuva-deflúvio, para pequenas bacias rurais, a partir dos modelos do hidrograma unitário instantâneo geomorfológico e do TOPMODEL**. 2003. 191p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP.
- COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. 2006. 128p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 194p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

DANTAS, A.A.A.; CARVALHO, L.G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n.6, p.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**, Amsterdam, v. 37, p. 477-493, 1999.

FERREIRA, L. **Simulação hidrológica utilizando o modelo TOPMODEL em bacias rurais, estudo de caso na bacia hidrográfica do ribeirão dos Marins – seção Monjolinho – SP**. 2004. 205p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

GIAROLA, M.F.B.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O.; CHAGAS, C.S.; FERREIRA, M.M. **Solos da região sob influência do reservatório da hidrelétrica de Itutinga/Camargos (MG): perspectiva ambiental**. Lavras: CEMIG/UFLA/FAEPE, 1997. 101 p.

GOMES, N. M. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do ribeirão Marcela na região do Alto Rio Grande, MG**. 2005. 124p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

GOMES, N.M.; FARIA, M.A. de.; SILVA, A.M. da.; MELLO, C.R. de.; VIOLA, M.R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 427-435, 2007a.

GOMES, N.M.; MELLO, C.R. de.; FARIA, M.A. de.; SILVA, A.M. da.; OLIVEIRA, M.S. de. Ajuste de variogramas no estudo da continuidade espacial de atributos físicos do solo. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 1, p. 92-107, 2007b.

HESSEL, R.; JETTEN, V.; BAOYUAN, L.; YAN, Z.; STOLTE, J. Calibration of the LISEM model for a small Loess Plateau catchment. **Catena**, Amsterdam, v. 54, p. 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**, Amsterdam, v. 54, p. 289-302, 2003b.

JETTEN, V. **LISEM user manual, version 2.x.** Draft version January 2002. The Netherlands: Utrecht Centre for Environmental and Landscape Dynamics. Utrecht University, 2002. p.48.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo.** Piracicaba: EDUSP, 2005. 335p.

LIMA, J.M.de.; NÓBREGA, J.C.A.; MELLO, C.R.de. **Erosão do solo e seu controle (teoria e prática).** Lavras: UFLA/FAEPE. 2003. 91p.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** 2002. 154p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

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. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 333-342, 2003.

MARTINS, S.G. **Erosão hídrica em sistemas florestais, nos Tabuleiros Costeiros da região de Aracruz – ES:** primeira aproximação. 2001. 59 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

MARTINS, S.G. **Erosão hídrica em povoamento de eucalipto sobre os solos coesos nos Tabuleiros Costeiros, ES.** 2005. 106 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

MELLO, C.R. **Estudo hidrológico em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero.** 2003. 133 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

MELLO, C.R. de.; LIMA, J.M.; SILVA, A.M. da. Simulação do deflúvio e vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 410-419, 2007.

MINE, M.R.M.; CLARKE, R.T. O uso do TOPMODEL em condições brasileiras: resultado preliminar. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 2, p. 89-105, 1996.

MOTTA, P.E.F. da.; CURI, N.; SILVA, M.L.N.; MARQUES, J.J.G.de.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. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, p. 282-289. 1970.

PEBESMA, E. J.; WESSELING, C. G. GStat: a program for geostatistical modelling, prediction and simulation. **Computers & Geosciences**, Amsterdam, v. 24, n. 1, p. 17-31. 1998

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V. dos S.; SILVA, D.D. da. **Escoamento superficial.** Viçosa: UFV, 88p. 2003.

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. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 26, n. 6, p. 1747-1752, 1983.

SILVA, P.M. de. O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG.** 2006. 155p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

STOLTE, J.; LIU, B.; RSTSEMA, C.J.; ELSSEN, H.G.M. van den; HESSEL, R. Modelling water flow and sediment processes in a small gully system on the Loess Plateau in China. **Catena**, Amsterdam, v. 54, p. 117-1130, 2003.

SCHULER, A.R. **Aplicação do TOPMODEL em uma bacia de mesoescala localizada na cabeceira do Rio Corumbataí.** 1998. 130p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP.

TAKKEN, I.; BEUSELINCK, L.; NACHTERGAELE, J.; GOVERS, G.; POESEN, J.; DEGRAER, G. Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). **Catena**, Amsterdam, v. 37, p. 431-447, 1999.

TRANCOSO, R.; CARNEIRO FILHO, A.; TOMASELLA, J. Amazônia, desflorestamento e água. **Ciência Hoje**, São Paulo, v. 40, n. 239, p. 31-37, 2007.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 3.ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2004. 943p.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2005. 678p.

VIOLA, M.R. **Simulação hidrológica nas bacias de drenagem para o reservatório da UHE de Camargos/CEMIG**. 2008. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

WESTERN, A.W.; ZHOU, S.L.; GRYSON, R.B.; McMAHON, T.A.; BLOSCHL, G.; WILSON, D.J. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 1, n. 286, p. 113-134, 2004.

XAVIER, A.C. **Estimativa da dinâmica do índice de área foliar em uma microbacia hidrográfica por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 2000. 111p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiros”, Piracicaba, SP.

CAPÍTULO 3

EFEITOS HIDROLÓGICOS DE DIFERENTES CENÁRIOS DE USO DO SOLO NUMA BACIA HIDROGRÁFICA TROPICAL SIMULADOS COM O LISEM

1 RESUMO

GOMES, Natalino Martins. Efeitos hidrológicos de diferentes cenários de uso do solo numa bacia hidrográfica tropical simulados com o LISEM. In: _____. **Aplicação do LISEM (Limburg Soil Erosion Model) para simulação hidrológica em bacia hidrográfica tropical**. 2008. Cap. 3, p. 113 - 147. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. ⁶

A intensa utilização dos solos pela agricultura faz com que as mudanças de uso do solo sejam uma de suas principais variáveis, com influência no comportamento das variáveis características do escoamento superficial direto (ESD). Neste contexto, objetivou-se, com a realização do presente trabalho, avaliar a influência de diferentes cenários (uso/ocupação do solo) nas variáveis hidrológicas tempo de pico (T_p), vazão de pico (Q_p), escoamento superficial direto e índice C de escoamento superficial (C) e também identificar as ocupações da paisagem que mais predisõem a bacia hidrográfica do ribeirão Marcela a impactos ambientais, aplicando o modelo hidrológico LISEM, calibrado para a referida bacia. Os cenários simulados são tendências agrícolas da região estudada, sendo eles: cenário atual (92,56% da área ocupada com pastagem e 7,44% com fragmento de mata natural) e os demais (mata nativa, eucalipto aos 7 anos de idade, café aos 15 e 35 meses de idade e milho aos 15 e 75 dias após o plantio - DAP) ocupando 100% da área da bacia hidrográfica, simulados para dois eventos de precipitação, cujas intensidades máximas (I_{max}) foram de 32,40 mm h⁻¹ e 48,0 mm h⁻¹. As variáveis hidrológicas apresentaram respostas distintas em função dos cenários; constatou-se que o coeficiente de atrito superficial de Manning “n” exerce forte influência no tempo de pico. Os cenários mata natural, eucalipto e café, aos 35 meses após o plantio, atenuaram as vazões máximas em 37,62%, 42,17% e 28,04% para o evento em que I_{max} foi igual a 48,0 mm h⁻¹, respectivamente. O cenário milho aos 15 DAP produziu as maiores vazões máximas.

⁶ Comitê de orientação: Antônio Marciano da Silva – DEG/UFLA (Orientador), Carlos Rogério de Mello – DEG/UFLA (Co-orientador).

2 ABSTRACT

Hydrological effects simulation produced by different agricultural land-uses at a tropical watershed with the LISEM. In:_____. **Applicability of the LISEM (Limburg Soil Erosion Model) for hydrological simulation at a tropical watershed**. 2008. Chap. 3, p. 112 – 147. Thesis (Doctor Science in Agricultural Engineering, Soil-Water Engineering) – Federal University of Lavras, Lavras, MG⁷.

The agricultural land-use influences directly the hydrological cycle at watersheds and its change is one of the most important concerns which generate different effects on water dynamic, especially, on the surface runoff. In this context, this work aimed to evaluate the effects of different agricultural land-uses in parameters associated to the surface runoff, such as the time lag, peak discharge, surface runoff and C index which represents the ratio between surface runoff and total precipitation. In addition, to identify the land-use more susceptible to the surface runoff and consequently to the environment impacts, applying the LISEM calibrated to the Marcela Creek Watershed. The scenarios simulated were based on agricultural recent trends in region which were: native forest, eucalyptus 7 years old, coffee crop 15 and 35 months old and corn crop 15 and 75 days after cultivated. The hydrological effects were simulated applying a rainfall event that proportioned good calibration, having been obtained the Nash-Sutcliffe Coefficient of 0.57, corresponding to the event of 48 mm h⁻¹. The results were compared to the actual land-use situation (92.56% of the overall area occupied by grassland and 7.44% by native forest). The Manning coefficient which was inputted according to the land-uses, promoted relevant influence in time lag and in position of peak discharge. The native forest, eucalyptus and coffee 35 months old scenarios would produce, in relation to the actual land-use, reduction of the peak discharge of 37.62%, 42.17% and 28.04%, respectively. The corn crop with 15 days after cultivated was the scenario that would produce the greatest peak discharge, being the most susceptible environment land-use.

⁷ Guidance Committee: Antônio Marciano da Silva – DEG/UFLA and Carlos Rogério de Mello – DEG/UFLA.

3 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a agricultura empresarial e extremamente tecnificada, que utiliza variedades geneticamente modificadas, altamente produtivas e precoces, imprime forte ritmo de uso e de ocupação aos solos. Isso faz com que a constante mudança de cenários nos campos cultivados seja uma de suas principais características.

No âmbito agrícola, o uso dos solos tem favorecido a erosão pela ação do escoamento superficial direto, transformando o fluxo de água em veículo que transporta pesticidas, nutrientes e sedimentos, culminando com impactos ambientais, como contaminação de aquíferos, destruição da flora e fauna aquática, assoreamento, redução da capacidade de armazenamento de água dos reservatórios e danos econômicos, dentre outros. Alterações também são registradas nos processos que regem o escoamento superficial direto, modificando o padrão de suas grandezas características (formato da hidrógrafa, tempo de pico, vazão de pico, escoamento superficial direto e o índice C de escoamento superficial), requerendo assim, novos conhecimentos e ferramentas para tratá-los.

Em face dessa dinâmica, a simulação hidrológica configura-se como uma ferramenta fundamental e indispensável, pois permite prognosticar as condições a que o meio estará sujeito, para que seja possível mitigar seus impactos. De acordo com Tucci (2005), esta ferramenta é essencial para o planejamento e tomada de decisões dentro do complexo processo de condições naturais e das interferências antrópicas.

Mello et al. (2007) simularam o deflúvio e a vazão de pico em uma bacia hidrográfica com escoamento efêmero, vegetada por eucalipto (20%) e pastagem (80%) e mais quatro cenários, projetando-se diferentes percentuais de ocupação

para cada um destes cultivos. Estes autores relatam que, à medida que se aumentou o percentual da área ocupada por eucalipto, registrou-se também redução do deflúvio, obtendo-se uma redução máxima de 29%, neste quando a bacia hidrográfica teve sua área ocupada com 80% de eucalipto, o que promoveria atenuação das cheias na bacia. Os autores atribuem este fato à interceptação do dossel, especialmente para eventos de menor magnitude em intensidade de precipitação. Ainda de acordo com estes autores, a umidade antecedente do solo é uma variável capaz de modificar este quadro, pois observaram a ocorrência de deflúvio semelhante ao produzido pelo cenário atual, independente da cobertura vegetal da bacia hidrográfica quando o solo estava com elevada umidade. Com relação à vazão de pico, quando a bacia hidrográfica foi 100% ocupada com pastagem, esta variou de, aproximadamente, 10 L s^{-1} (cenário atual) para quase 30 L s^{-1} , sendo isto atribuído à menor interceptação das precipitações pelo cenário pastagem, quando comparado ao cenário eucalipto.

Viola (2008) simulou, para a bacia hidrográfica do Rio Grande, a montante do reservatório da usina hidroelétrica de Camargos/CEMIG, três cenários de uso do solo, abordando a recente tendência agrícola na região de substituição de pastagens por eucalipto. Para o cenário com 100% de eucalipto, os resultados apontaram reduções médias no deflúvio ao final de dois anos de simulação na ordem de 17,29%, basicamente, devido ao aumento na taxa de evapotranspiração. Em termos de vazões médias, a variação simulada equivale a $6,99 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, correspondente a uma redução de $40,42 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no cenário atual, para $33,43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

O comportamento hidrológico, o balanço de nutrientes e a perda de solo foram estudados em duas bacias hidrográficas reflorestadas com eucalipto no Vale do Paraíba, SP, por Ranzini & Lima (2002). Estes autores relatam que aquela que apresentou hidrograma mais rápido (menor tempo de concentração) e

maior vazão de pico, produziu 2,5 vezes mais sedimentos em suspensão que a outra. Isso é atribuído ao maior potencial de arraste e transporte do fluxo de água sobre suas vertentes, culminando também com maior taxa de remoção de nutrientes (três vezes mais). Estes autores atribuem esta grande perda de nutrientes ao escoamento superficial direto. Esta maior predisposição da bacia ao escoamento superficial direto está associada à sua maior declividade média (28,9%) e a um gradiente textural do solo acentuado, com 24,7% de argila no horizonte A, contra 40,9% no horizonte B, fazendo com que haja uma redução da infiltração de água do horizonte A para o B, favorecendo o escoamento superficial direto, condicionando à existência de áreas sujeitas aos processos erosivos. Estes fatos ressaltam a importância de um manejo que leve em consideração as características hidrológicas da bacia, o que desempenharia importante papel na conservação de seus recursos.

Neste contexto, objetivou-se, com a realização do presente estudo, aplicando-se o modelo hidrológico LISEM calibrado para a bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, estudar a influência de diferentes cenários nas variáveis características do escoamento superficial direto; avaliar o desempenho do modelo LISEM na previsão de impactos ambientais e identificar possíveis usos dos solos que predisponham os recursos da bacia hidrográfica a maiores impactos ambientais.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Escolha dos eventos de precipitação

Os critérios utilizados para a seleção do evento de precipitação na simulação hidrológica dos cenários propostos neste capítulo baseou-se nos menores erros de calibração apresentados para as variáveis resposta vazão de pico (Q_p) e escoamento superficial direto, avaliados no capítulo anterior.

Procedimento semelhante foi adotado por Chaplot et al. (2005), que utilizaram o LISEM para modelar a dinâmica inicial e o desenvolvimento da erosão em sulcos, em uma bacia hidrográfica de 0,62 km², com declividade média de 28%, altitude variando de 425 m a 718 m e gradientes de declividade oscilando entre 3% a mais de 350%, ao norte de Laos, França. O objetivo destes autores foi o de investigar até que ponto um modelo SIG baseado no processo e que utiliza informações topográficas é útil para prever o início e o desenvolvimento da erosão em sulcos em paisagens agrícolas. A bacia estava ocupada com culturas anuais (9,1%), pastagem (52,7%), pomar (12,2%) e floresta (26%) e os cenários trabalhados foram (i) aumento da área com cultivos anuais de 9,1% para 65% e 100% e (ii) redução da área com cultivos anuais para 0% e cobertura de 100% com floresta.

Aplicando-se os critérios anteriormente mencionados, selecionou-se o evento registrado em 21/03/05, calibrado para a espessura de 150 mm. Este evento, na etapa de calibração, apresentou bom desempenho, obtendo erros - 0,61% para a vazão de pico, 3,98% para o escoamento superficial direto e 3,10% para o índice C. Está agrupado na classe cinco de precipitação proposta no capítulo dois, com I_{\max} entre $40 \leq I \text{ (mm h}^{-1}\text{)} < 50$, pois, a I_{\max} registrada nessa data, foi de 48,0 mm h⁻¹.

Para as simulações dos cenários propostos, o conteúdo de umidade do solo antecedente ao evento de precipitação do dia 21/03/05 foi aquele retido no potencial matricial (ψ_m) de 10 kPa, utilizando-se 96,60% do conteúdo de umidade volumétrica retida a este potencial.

4.2 Cenários simulados

Os cenários de ocupação da bacia hidrográfica foram projetados considerando as tendências atuais da agricultura na região estudada, procurando tratar usos/ocupações característicos da paisagem na região estudada. Os resultados

das simulações destes cenários foram comparados ao cenário atual, o que possibilitou verificar os efeitos de diferentes atividades agrícolas nas variáveis hidrológicas do escoamento superficial direto.

Por ser uma bacia hidrográfica relativamente pequena, do ponto de vista agrícola, optou-se por considerá-la 100% vegetada com cada um dos cenários propostos, os quais estão descritos a seguir:

4.2.1 Cenário 1: uso atual

O cenário atual corresponde à ocupação da bacia por pastagem (95,84%) e fragmento de mata natural (4,16%), pois, nas datas em que ocorreram os eventos trabalhados, já havia ocorrido a colheita do milho e os 16,69% da bacia ocupados com esta cultura ficavam sob pastejo, até novo plantio, em outubro. Assim, os parâmetros utilizados de entrada referentes à vegetação foram: mata; índice de área foliar (IAF): $2,80 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Xavier, 2000) e 0,95 para a FSCV (Takken et al., 1999) e pastagem; IAF de $2,63 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Caruzzo & Rocha, 2000) e 0,70 para a FSCV (Takken et al., 1999). Os parâmetros de solo em função da ocupação foram: mata; coeficiente de atrito superficial (n) 0,30 e rugosidade superficial do solo de 1,36 cm; pastagem; coeficiente de atrito superficial (n) igual a 0,227 e rugosidade superficial do solo de 0,70 cm, conforme Takken et al. (1999).

4.2.2 Cenário 2: pastagem

A expectativa é a de que este cenário produza resultados semelhantes ao cenário atual, pois 95,84% da área já estavam sendo ocupados com este cultivo. Os parâmetros de entrada para este cenário foram: IAF de $2,63 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, conforme Caruzzo & Rocha (2000), 0,70 para a FSCV; 0,227 para o coeficiente de atrito superficial (n) e 0,70 para a rugosidade superficial do solo (Takken et al., 1999).

4.2.3 Cenário 3: mata natural

Os fragmentos de mata natural ocupam somente 19,83 ha da área total da bacia hidrográfica, o que corresponde a um percentual de apenas 4,16% (Gomes et al., 2007a). Espera-se que este cenário produza resultados bem diferentes do atual, pois há relatos, na literatura, de que bacias hidrográficas vegetadas com florestas têm suas vazões máximas atenuadas e o tempo de pico retardado, o que, conseqüentemente, altera o escoamento superficial direto e o índice C. Os parâmetros de entrada para este cenário foram: índice e área foliar de 2,80 m² m⁻² conforme Xavier (2000); 0,95 para a FSCV; 0,30 para o coeficiente de atrito superficial (n) e 1,36 cm para a rugosidade superficial do solo (Takken et al., 1999).

4.2.4 Cenário 4: eucalipto

Atualmente, percebe-se crescimento acentuado do cultivo de eucalipto na região Alto Rio Grande, especialmente para a produção de carvão vegetal, madeira para móvel e produção de papel e celulose, com grande adesão dos produtores rurais ou por meio do arrendamento de terras (Viola, 2008). Números da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (Abrasflor) mostram crescimento de cerca de 20% na área plantada no Brasil, em 2005, em relação a 2004. Em relação a 2002, por exemplo, o aumento chega a 70%. Hoje, no Brasil, são 5,2 milhões de hectares plantados com eucalipto e pinus (SEBRAE, 2007). Este fato é facilmente confirmado na região, pela presença de vasto plantio de eucalipto, próximo às cidades de Andrelândia, Madre de Deus e São Vicente de Minas, em áreas que até há pouco tempo eram exploradas com culturas anuais de subsistência e pastagens. Nas proximidades da bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, na Fazenda Paiolinho, também se registra vasta área ocupada com esta cultura. O índice de área foliar para este cenário, considerando um eucalipto aos 7 anos de idade, espécie *Eucalyptus grandis*, a

mais plantada no Brasil, foi de $3,30 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ conforme Xavier et al. (2002). A FSCV foi considerada a mesma da mata natural, ou seja, 0,95. O valor de 0,30 foi utilizado para o coeficiente de atrito superficial (n) e 1,36 cm para a rugosidade superficial do solo (Takken et al., 1999).

4.2.5 Cenário 5: milho aos 15 dias após semeadura

O milho é o segundo cultivo mais expressivo da bacia hidrográfica após a pastagem, ocupando área de 79,73 ha (16,69% da bacia hidrográfica) segundo Gomes et al. (2007b). Atrelado a isso, a região na qual o estudo foi desenvolvido é um dos principais pólos produtores deste grão no estado. Para este cenário, início de desenvolvimento da cultura, situação que oferece pouca proteção ao solo contra a ação erosiva das chuvas, foram considerados os seguintes valores: índice de área foliar igual a $2,283 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$; 0,30 para a FSCV; 0,08 para o coeficiente de atrito superficial (n) e 1,14 cm para a rugosidade superficial do solo, conforme Takken et al. (1999).

4.2.6 Cenário 6: milho aos 75 dias após semeadura

Aos 75 dias após a semeadura (DAS), a cultura do milho se encontra em pleno desenvolvimento vegetativo, tendo alcançado a sua altura máxima (1,50 m) e, também, o maior índice de área foliar ($6,01 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), oferecendo o máximo de proteção ao solo. Os parâmetros relativos à cultura do milho, aos 15 e 75 DAS, foram adotados, segundo Manfron et al. (2003), para o híbrido P - 4071, cultivado no espaçamento de 0,9 m entre linhas e com população de 50.000 plantas ha^{-1} . O coeficiente de atrito superficial (n) foi de 0,08 e a rugosidade superficial do solo de 1,14 cm, conforme Takken et al. (1999). A expectativa é a de que os resultados deste cenário superem o cenário anterior, aproximando-se dos cenários mata natural e eucalipto, pois seu índice de área foliar é superior aos demais.

4.2.7 Cenário 7: café aos 15 meses após o plantio

A cafeicultura é uma das atividades agrícolas de maior destaque na região Sul de Minas, razão pela qual também se trabalhou com este cenário. Na fase inicial, a lavoura oferece pequena proteção ao solo, pois as plantas estão formando sua estrutura e, ainda, não têm folhas mortas depositadas nas entrelinhas. Também não há formação de “saías”, predispondo o solo à ação erosiva das chuvas e, conseqüentemente, à produção de escoamento superficial direto. Para lavoura aos 15 meses após o plantio, da cultivar Mundo Novo IAC 388-17, enxertada na cultivar Apoatã IAC 2258, plantada em espaçamento de 2,5 x 1,0 m e densidade populacional de 4.000 plantas ha⁻¹, o índice de área foliar adotado foi de 0,24 m² m⁻², de acordo com Favarin et al. (2002) e a FSCV foi igual a 0,20. Os demais parâmetros, coeficiente de atrito superficial (n), de 0,3 e a rugosidade superficial do solo de, 0,73 cm, são aqueles recomendados para pomares, conforme Takken et al. (1999). Esta adaptação se fez necessária, pois não foi encontrado, na literatura, registro destas variáveis para a cultura do café.

4.2.8 Cenário 8: café aos 35 meses após o plantio

Aos 35 meses, a lavoura já está praticamente formada, com ramos plagiotrópicos entrelaçadas e deposição de folhas mortas nas entrelinhas, o que por sua vez, oferece proteção ao solo contra os impactos advindos das precipitações, reduzindo a ocorrência do escoamento superficial direto. De acordo com Favarin et al. (2002), uma lavoura da cultivar Mundo Novo IAC 388-17, enxertada na cultivar Apoatã IAC 2258, plantada em espaçamento de 2,5 x 1,0 m e densidade populacional de 4.000 plantas ha⁻¹, aos 35 meses, tem índice de área foliar de 3,17 m² m⁻² e FSCV igual a 0,62, considerando comprimento de ramos plagiotrópicos de 0,70 m. Os demais parâmetros (coeficiente de atrito

superficial (n) e a rugosidade superficial do solo) foram os mesmos adotados para uma lavoura aos 15 meses após o plantio.

Os dados de todos estes cenários foram organizados em estrutura semelhante à descrita no capítulo 2, conforme recomendações apresentadas por Jetten & Jong (2006) e Jetten (2002), o que possibilitou as compilações do aplicativo PCRaster NutShell.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise global dos efeitos hidrológicos

As diferentes parcelas em que as precipitações totais se transformaram para os sete cenários estudados podem ser observadas nas Figuras 1.

Visualiza-se, nas Figuras 1, que a lâmina infiltrada é a maior entre as cinco parcelas estudadas, com valor médio de 21,75 mm (91,55%), com desvio padrão de $\pm 2,77$ mm e coeficiente de variação 3,03%. O cenário café aos 15 meses, apresentou o maior percentual de infiltração (95,48%), enquanto o cenário milho, aos 75 dias, registrou os menores percentuais para esta parcela (86,34%). A variação da infiltração para estes cenários, provavelmente, está associada à variação da interceptação, pois, percebe-se que para o cenário milho aos 75 dias (menor lâmina infiltrada), registram-se os maiores percentuais interceptados (12,33%), enquanto que, para o cenário café aos 15 meses (maior lâmina infiltrada), obtiveram-se os menores percentuais interceptados (0,49%), respectivamente.

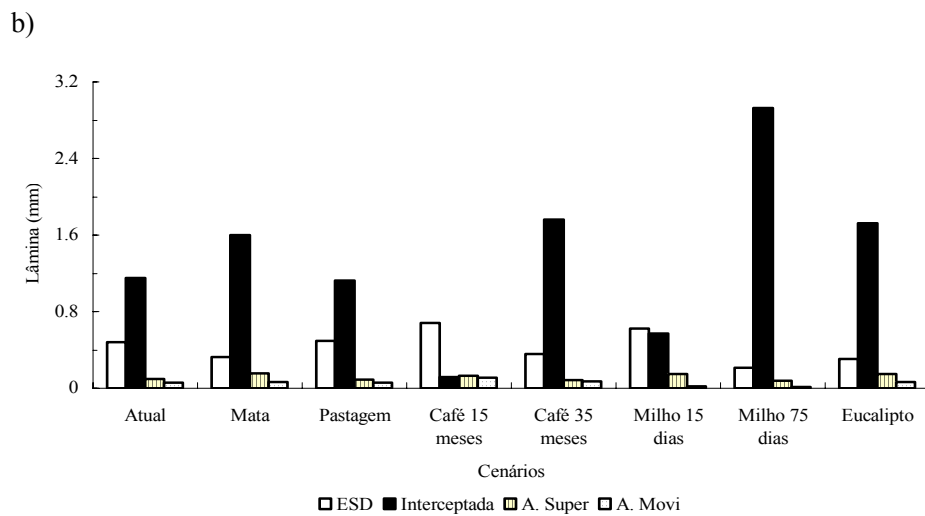
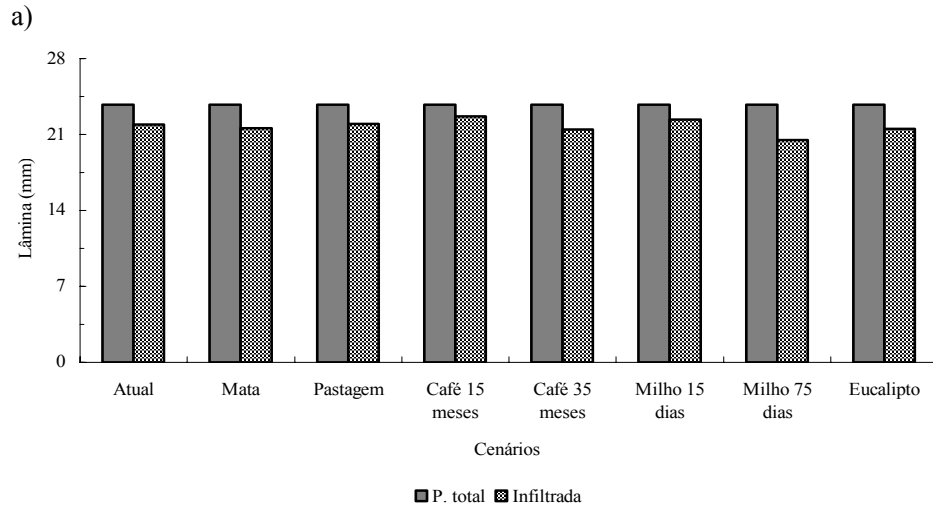


FIGURA 1 Distribuição da precipitação total em diferentes parcelas do ciclo hidrológico: a) precipitação total e lâmina infiltrada; b) escoamento superficial direto, interceptação, armazenamento em microdepressões superficiais e que ainda estava em movimento ao término das simulações.

A perda de água pela interceptação se dá pela evaporação direta que ocorre ainda durante a chuva mais a evaporação da água que fica retida temporariamente na copa, após o término do evento de precipitação. De acordo com Lima (1996), em florestas temperadas, em condições climáticas caracterizadas pela ocorrência de chuvas leves, porém, prolongadas, estes dois componentes são os principais responsáveis pela perda total por interceptação, mais ou menos em proporções idênticas.

Em regiões caracterizadas por chuvas intensas de curta duração, como nas regiões tropicais, é de se esperar que as perdas que ocorrem durante a ocorrência da chuva sejam menores, comparativamente àquelas que ocorrem após o término das precipitações. Ainda de acordo com Lima (1996), a capacidade de armazenamento de água nas folhas é de 0,2 a 0,5, mm para eucalipto; 0,8 mm, para Floresta Amazônica; 0,2 mm a 2,0 mm, para floresta temperada e 2,2 mm a 8,3 mm, para florestas tropicais.

Os resultados anteriormente apresentados são semelhantes aos encontrados por Ferreira et al. (2005), em estudos de precipitação interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme, realizados na Estação Experimental de Manejo Florestal do INPA, Norte de Manaus. Segundo estes autores, em parcela cuja interceptação foi de apenas 12,9%, registrou-se o valor mais elevado de precipitação interna (87,1%) e o valor mais baixo de precipitação interna (74,2%) foi registrado na parcela em que ocorreu a maior taxa de interceptação pelo dossel, sendo esta última igual a 25,8 %.

Verifica-se, ainda na Figura 1, que a parcela média interceptada é de 5,78 mm \pm 3,58 mm, com elevado coeficiente de variação (62,03%), sendo esta, a parcela de maior taxa de variação, entre as cinco estudadas, em ambos os cenários. A variação da interceptação, por sua vez, pode ser atribuída aos diferentes valores do índice de área foliar fornecidos ao LISEM para os cenários estudados. Segundo Tucci (2004), a interceptação da chuva pelo dossel depende

de vários fatores, tais como características da precipitação e condições climáticas, tipo e densidade da vegetação e época do ano, o que torna normal a variação da interceptação apresentada.

De acordo com Ferreira et al. (2005), a interceptação em floresta tropical varia consideravelmente, entre 4,5% a 45% do total precipitado. O fator que mais contribui para esta variação é a heterogeneidade da estrutura da vegetação. Os percentuais médios interceptados para o cenário mata natural (6,73%), estão bem abaixo daqueles apresentados por Arcova et al. (2003), para floresta Latifoliada Perenifolia, na Mata Atlântica, SP, obtidos diretamente de pluviômetros instalados em clarreira e sob o dossel da mata, com interceptação média de 15% no período chuvoso e 28% no período de pouca chuva. A diferença entre os percentuais apresentados por Arcova et al. (2003) e os obtidos pelo modelo LISEM para o cenário mata natural pode ser atribuída às características da vegetação. O índice de área foliar para a mata natural utilizado neste trabalho é de uma floresta semidecidual (subcaducifólia) com altura média das árvores de 10,0 m, com queda de folhas para parte das espécies durante um período do ano, ocasionando, conseqüentemente, variações significativas no seu IAF. Já o trabalho de Arcova et al. (2003) foi desenvolvido em floresta perenifólia e com dossel a 20,0 m de altura, o que lhe conferia maior poder de interceptação, quando comparada às condições adotadas neste trabalho.

O percentual de interceptação para o cenário café aos 35 meses (7,41%) é bem inferiores aos 19% encontrados por Miranda et al. (2004), para cafezais adensados na região Serrana, município de Duas Barra, RJ, com uma população de 5.000 plantas ha⁻¹, cultivar Mundo Novo, com oito anos de idade. O primeiro fator que condiciona esta diferença entre os percentuais interceptados é a densidade populacional de plantas, que é de 1.000 plantas a mais por há, para as condições do experimento de Miranda et al. (2004). Outro fato que pode ter contribuído para esta diferença é a idade das plantas, uma aos 35 meses (menor

IAF), outra aos 8 anos (maior IAF), com maior altura e estrutura das plantas, o que lhes confere maior poder de interceptação da precipitação.

Ainda reportando-se à Figuras 1 e fazendo-se uma comparação entre a interceptação dos cenários propostos com o atual, verifica-se que em três situações, ou seja, cenários pastagem, milho aos 15 dias e café aos 15 meses, a interceptação foi menor que o cenário atual em -2,76%, -50,23% e -89,96%, respectivamente. Para os demais cenários, mata natural, eucalipto, café aos 35 meses e milho aos 75 dias, a interceptação foi maior que o cenário atual, em 38,52%, 49,13%, 52,55% e 153,71%, respectivamente. Estes resultados mostram que pequenas alterações na vegetação, como a remoção de 4,16% de mata natural, promoveram redução da interceptação em mais de 2%, percentual este que contribuirá para aumentar as vazões máximas da bacia, potencializando os impactos ambientais. Por outro lado, nota-se também que a cultura do milho, no auge do seu desenvolvimento vegetativo, foi a que proporcionou maior taxa de interceptação, minimizando os efeitos hidrológicos sobre a bacia. É importante ressaltar que não foram avaliados os efeitos de práticas conservacionistas, como terraceamento e plantio em nível, para o cenário milho, o que, certamente, atenuaria parte dos impactos causados pela não interceptação das precipitações na fase crítica desta cultura, no que tange à proteção ao solo pela cobertura vegetal.

A terceira maior parcela da precipitação total apresentada na Figuras 1, é aquela que se converteu em escoamento superficial direto, com percentual médio de 1,83%; máximo de 2,87%; mínimo igual a 0,91% e com desvio padrão de $\pm 0,16$ mm, apresentando também, coeficiente de variação de 37,38%, respectivamente. Os percentuais máximos de escoamento superficial direto foram registrados para os cenários milho aos 15 dias (2,63%) e café aos 15 meses (2,87%), superiores ao cenário atual, que registrou escoamento superficial direto de 2,03%. Quando feita comparação da lâmina convertida em escoamento

superficial direto do cenário atual com os cenários propostos, constata-se que esta foi maior para os cenários pastagem, café aos 15 meses e milho aos 15 dias.

Estes resultados estão em conformidade com os comentários anteriores, pois estas são as situações que oferecem menor proteção ao solo, somando-se a isto, intensidade de precipitação de $48,0 \text{ mm h}^{-1}$. Para as situações de mata natural, milho aos 75 dias, café aos 35 meses e eucalipto, o escoamento superficial direto simulado foi menor que o observado em 33,03%, 55,44%, 25,66% e 36,45%, respectivamente, provavelmente, em função da maior proteção oferecida aos solos e da maior taxa de interceptação destes.

As lâminas armazenadas na superfície e que ainda estavam em movimento ao término das simulações não chegam a representar 1% do total precipitado, não apresentando, portanto, importância hidrológica, razão pela qual não serão aqui comentadas.

5.2 Efeito dos cenários nas variáveis associadas ao escoamento superficial direto

5.2.1 Tempo de pico, formato das hidrógrafas e vazão de pico

O efeito que a mudança de cenários provocou no tempo de pico da bacia hidrográfica do ribeirão Marcela pode ser observado na Figura 2.

Nesta Figura observa-se, claramente, que os cenários milho aos 15 dias e aos 75 dias após plantio promoveram considerável antecipação no tempo de pico 210 para 165 minutos, o que corresponde a antecipações 21,43%, quando comparados ao cenário atual.

A magnitude desta antecipação pode ser atribuída ao coeficiente de atrito superficial (n) utilizado para estes cenários (0,08). O coeficiente de atrito superficial (n) está no denominador da equação utilizada para o cálculo da velocidade do fluxo de água sobre a superfície da bacia e também nos canais. Assim, há uma relação inversamente proporcional deste coeficiente com a

velocidade do fluxo, ou seja, quanto menor for o coeficiente utilizado, maior será a velocidade de deslocamento da água sobre as vertentes da bacia hidrográfica. Tal relação explica a redução do tempo de pico para os cenários com a cultura do milho, pois, das sete situações simuladas, estas foram as que utilizaram o menor valor para o coeficiente superficial (n).

Porém, cabe ressaltar que o erro apresentado para a variável tempo de pico na etapa de calibração no capítulo 2, não foi satisfatório, com elevada magnitude, o que remete à necessidade de se fazer comparações com o tempo de pico real, observado para o evento de 21/03/05, o qual foi 315 minutos. Desta comparação, depreende-se que, o tempo de pico foi r antecipado em 47,62%. Pode-se inferir que a calibração do tempo de pico no LISEM não depende somente deste coeficiente, mas também responde à intensidade das precipitações, o que vai ao encontro de relatos anteriores, como os de Bertoni & Tucci (2004).

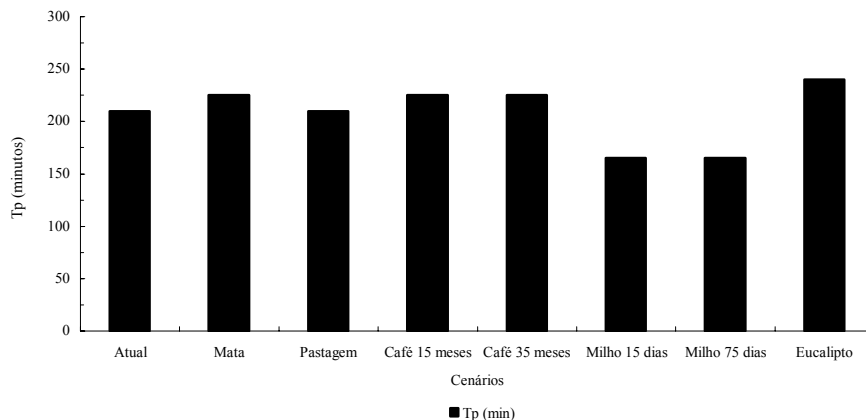


FIGURA 2 Influência dos cenários de ocupação do solo da bacia hidrográfica na variável tempo de pico da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela para os sete cenários simulados.

As mudanças que ocorrem nas condições físicas superficiais do solo entre um evento e outro de precipitação também são responsáveis por variações no tempo de pico. Nesse sentido, Castro et al. (2006) relatam que a chuva pode modificar as condições físicas da superfície do solo, graças à desagregação de suas partículas pela ação das gotas, combinada com sua enxurrada, reduzindo sua rugosidade superficial. Isso porque as partículas que vão se despreendendo, são depositadas primeiro nas microdepressões e também promovem o selamento superficial, diminuindo, assim, a rugosidade do solo. Este efeito é mais pronunciado para chuvas mais intensas, o que, em parte, explica a antecipação do tempo de pico de alguns cenários.

Para os demais cenários, o tempo de pico foi da mesma ordem de grandeza do cenário atual, registrando-se erros de retardamento de 7,14% para os cenários mata natural, café aos 15 e 35 meses e de 14,29% para o cenário eucalipto, sendo o tempo de pico do cenário pastagem igual ao cenário atual. Não foram registrados erros de antecipação no tempo de pico.

Pela Figura 3 é possível observar o comportamento das hidrógrafas dos cenários simulados, da hidrógrafa calibrada e da hidrógrafa observada. Detecta-se, na referida Figura, que as alterações nas hidrógrafas dos cenários ocorreram, principalmente, nos valores das vazões de pico, o que é confirmado também pela Figura 4. A vazão de pico observada foi de $154,29 \text{ L s}^{-1}$; sendo o valor calibrado (cenário atual) iguais a $146,17 \text{ L s}^{-1}$, respectivamente. O cenário pastagem produziu vazões máximas de $150,37 \text{ L s}^{-1}$, bem próxima ao valor observado e calibrado para o cenário atual, respectivamente.

Observando-se a Figura 4, percebe-se que a variação na vazão de pico entre o cenário atual e milho aos 15 dias após o plantio foi de 64,78%. Esta variação está de acordo com relatos de Marsik & Waylen (2006), que relataram que a vazão de pico é mais influenciada pela distribuição espacial das precipitações na bacia hidrográfica e pelo conteúdo de umidade do solo.

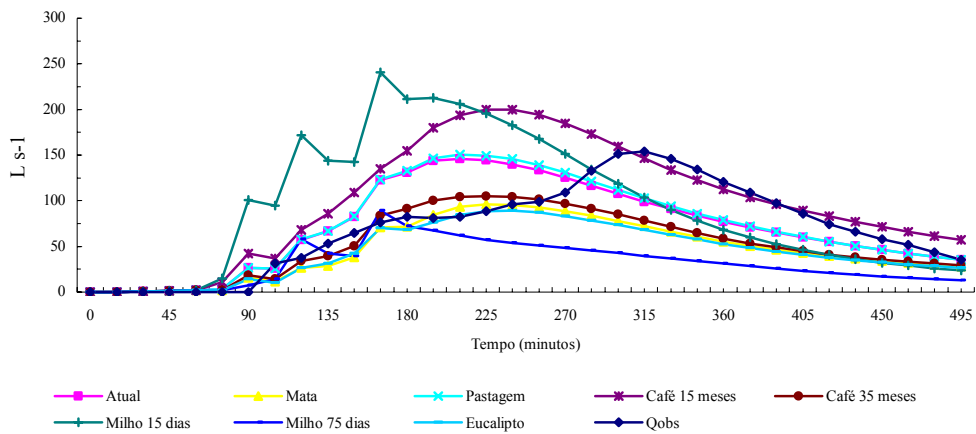


FIGURA 3 Influência dos cenários de ocupação do solo da bacia hidrográfica no formato das hidrógrafas para os cenários simulados.

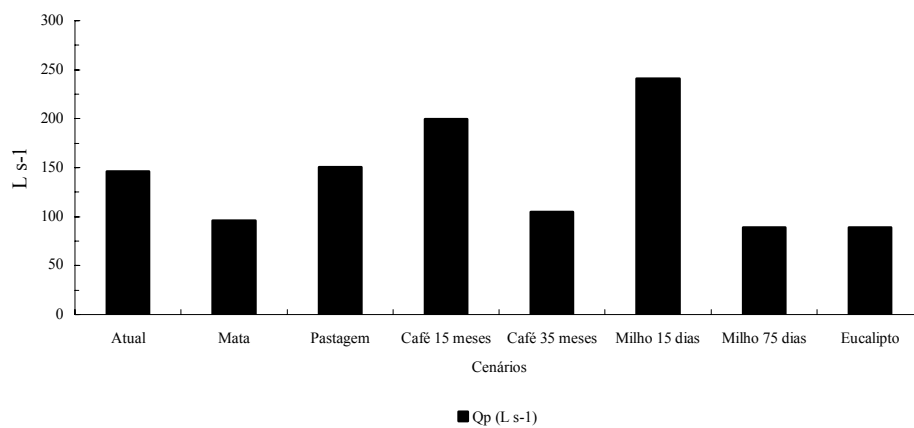


FIGURA 4 Influência dos cenários de ocupação do solo da bacia hidrográfica na vazão de pico para os cenários simulados.

O evento de 21/03/05 foi calibrado utilizando-se 96,60% de $0,4052 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, retidos a 10 kPa. Assim, percebe-se que, mesmo sendo um evento de maior intensidade, ele teve maior percentual da lâmina precipitada retida na forma de armazenamento de água no solo, em função do maior déficit de armazenamento, apresentando assim, menor variação para a variável hidrológica vazão de pico.

Para os cenários mata natural e eucalipto, as vazões máximas foram de $96,25 \text{ L s}^{-1}$ e $89,22 \text{ L s}^{-1}$, o que corresponde ao amortecimento destas vazões em 37,62% e 42,17%, respectivamente, quando comparadas aos valores observados.

Estes resultados correspondem às expectativas, pois a substituição da pastagem por vegetação de maior porte e também de maior índice de área foliar aumenta a parcela interceptada da precipitação pela vegetação, reduzindo a lâmina que chega ao solo e, conseqüentemente, amortizando as vazões máximas.

Resultados semelhantes foram encontrados por Mello et al. (2007) que também relatam atenuação da vazão de pico em 29% quando 80% da área de uma bacia hidrográfica de fluxo efêmero foi progressivamente substituída por eucalipto. Schuler (2003) avaliou fluxos hidrológicos em sub-bacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental (Paragominas, Pará) e registrou redução da vazão em até 7,29 vezes para a bacia florestada em relação à bacia ocupada por pastagem, para o ano de 2000. Para os anos de 2001, 2002 e 2003, esta relação foi um pouco menor, 5,34; 5,19 e 4,64, respectivamente, mas, ainda assim, sempre com a bacia pastejada produzindo maiores vazões máximas.

Marsik & Waylen (2006) aplicaram o modelo hidrológico distribuído CASC2D a montante de uma bacia hidrográfica tropical de $2,5 \text{ km}^2$, Costa Rica, nas proximidades da cidade de San Ramón, para avaliar a influência da mudança da cobertura vegetal em variáveis hidrológicas, como a vazão de pico e deflúvio. Estes autores concluíram que a substituição da vegetação por área residencial e a expansão das estradas na bacia são os principais responsáveis pelas vazões máximas e deflúvios de elevada magnitude, que têm causado inundações na

referida cidade. Segundo estes autores, a vegetação atuava não só na interceptação das precipitações, mas também, conferia ao solo maior coeficiente de atrito superficial (n), que atuava reduzindo a velocidade do fluxo de água sobre as vertentes da bacia hidrográfica bacia, oportunizando maiores taxas de infiltração. Viola (2008) relata que a substituição da cobertura atual de pastagem presente na bacia do Rio Grande por eucalipto tende a produzir aumento na taxa de evapotranspiração e interceptação, resultando em redução no escoamento. Isto se deve ao fato, segundo este autor, de plantas de eucalipto possuírem sistema radicular mais profundo, explorando maior faixa de solo, disponibilizando maior volume de água à transpiração e à permanência dos valores de índice de área foliar desta cultura ao longo do ano, especialmente durante o período seco. Para a pastagem, durante o período de estiagem, a restrição estomática reduz substancialmente o processo de transpiração, o que, aliado à redução no índice de área foliar, resulta em redução na taxa de evapotranspiração. De acordo ainda com Viola (2008), a simulação da introdução da cultura do eucalipto, em substituição a 100% da cobertura atual de pastagem presente na bacia, resultou em redução no deflúvio que, ao final de 2 anos de simulação diária, totalizou 211,89 mm, representando redução média anual de 17,29%. No ano de 2002, que cuja precipitação média na bacia foi de 1.445,4 mm e o deflúvio simulado para o cenário atual de 564,9 mm, foi estimada redução de 17,89%, comparado com 16,78% em 2003, quando houve 1.515,9 mm de precipitação e 660,74 mm de escoamento simulado para o cenário atual.

De acordo com Schuler (2003), o efeito da substituição da floresta por pastagem vai além da redução dos percentuais interceptados. Na pastagem, tem-se a formação de sulcos preferenciais de escoamento compactados, que funcionam como drenos coletores da água, diminuindo o tempo que esta leva para alcançar a rede de drenagem, reduzindo o tempo de concentração e, conseqüentemente, o tempo de pico, além de potencializar as vazões máximas.

Outro efeito são as alterações nas propriedades físico-hídricas do solo, pois, devido à compactação, principalmente nos primeiros centímetros da camada superficial do solo, reduzindo a porosidade e aumentando, significativamente, as restrições ao fluxo de água no solo. Assim, os hidrogramas apresentam respostas rápidas aos eventos e decaimento logo após um curto intervalo de tempo com o fim dos eventos chuvosos, caracterizando o escoamento superficial direto sobre suas vertentes. Na bacia florestada, os hidrogramas apresentaram certa continuidade entre eventos chuvosos, indicativos da presença de um fluxo mais lento, devido às melhores condições das propriedades físico-hídricas do solo, que propiciaram a ocorrência de saturação na camada de até um metro de espessura, a qual é drenada lentamente, garantindo a permanência do hidrograma. Conforme Figura 4, não foi possível identificar maior ou menor velocidade de decaimento para as hidrógrafas dos diversos cenários, contudo, as alterações foram identificadas no tempo de pico (Figura 3) e na vazão de pico (Figura 4).

O cenário café aos 35 meses, proporcionou atenuação da vazão máxima, em 28,04%, ao passo que este mesmo cenário, aos 15 meses, potencializou a vazão máxima, com elevação desta em 36,73%. Estes resultados são importantes, do ponto de vista do manejo, que se deve empregar na lavoura cafeeira no Sul de Minas. Na fase inicial de formação dos cafezais, período em que a lavoura oferece pouca proteção ao solo, é de suma importância que se adote práticas conservacionistas, o que atenuará os efeitos hidrológicos advindos de eventos intensos de precipitação. Em fases mais avançadas da lavoura cafeeira, tais práticas continuam sendo indispensáveis, contudo, a lavoura, em função do desenvolvimento de sua estrutura e da deposição de folhas nas entrelinhas de plantio, já é capaz de oferecer maior proteção ao solo e aos recursos hídricos. Os mesmos comentários são aplicados ao cenário milho, pois, para este, aos 15 dias após o plantio, as vazões máximas foram superiores às observadas em 64,78%, respectivamente.

5.2.2 Escoamento superficial direto e índice C

O escoamento superficial direto e o índice C são diretamente influenciados pelo formato da hidrógrafa (Figura 4) e pelas condições de umidade antecedente do solo. Reportando-se à Tabela 5, capítulo 2, percebe-se que a precipitação acumulada de cinco dias anteriores era 30,0 mm para o dia 21/03/05. Lâmina superior à capacidade de armazenamento de água para os primeiros 150 mm daqueles solos que segundo Gomes (2005), encontra-se entre 22,0 mm a 28,0 mm. Assim, pode-se pressupor que o solo tinha menor déficit hídrico de armazenamento, somando-se à elevada intensidade de precipitação, proporcionando que parcela da lâmina precipitada se convertesse em escoamento superficial direto. Obtêm-se assim, maiores valores para o índice C, conforme se constata nas Figuras 5 e 6, que trazem informações a respeito dessas duas variáveis hidrológicas.

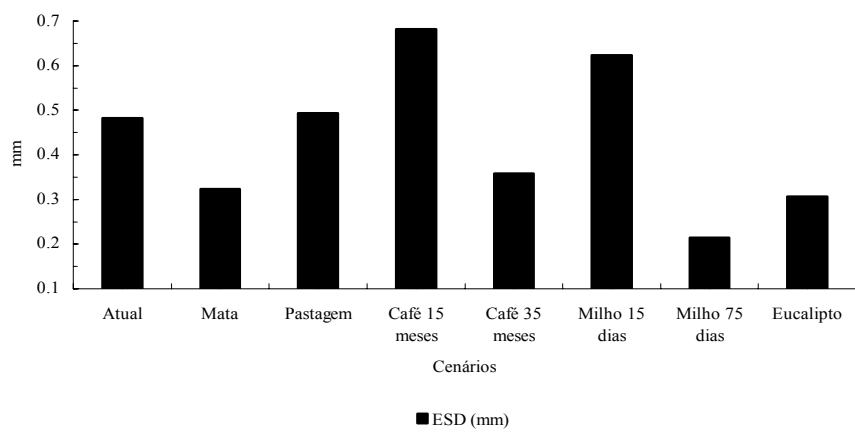


FIGURA 5 Influência dos cenários de ocupação do solo da bacia hidrográfica na variável escoamento superficial direto.

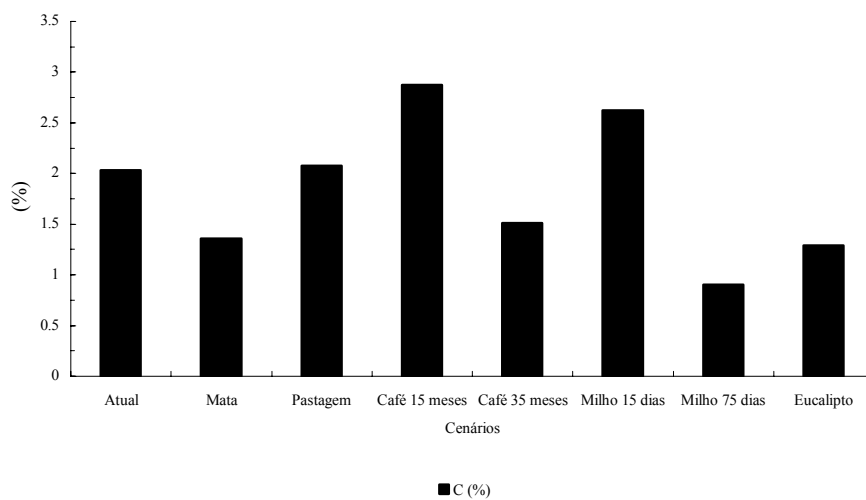


FIGURA 6 Influência dos cenários de ocupação do solo da bacia hidrográfica no índice C.

Observando-se, ainda, as tais Figuras 5 e 6, nota-se que as pressuposições anteriores podem ser confirmadas pelas escalas verticais dos gráficos, pois, ao se confrontar os mesmos cenários para os diferentes eventos, têm-se as seguintes lâminas convertidas em escoamento superficial direto: 0,32 mm para o cenário mata natural; 0,31 mm, para o cenário eucalipto; 0,49 mm, para o cenário pastagem; 0,62 mm, para o cenário milho aos 15 dias após plantio; 0,22 mm, para o cenário milho aos 75 dias após plantio; 0,68 mm, para o cenário café aos 15 meses de idade e, 0,36 mm, para o cenário café aos 35 meses de idade, respectivamente.

Marsik & Waylen (2006) comentam a influência da interação de múltiplos parâmetros no comportamento de variáveis hidrológicas, pois o escoamento superficial direto é regido pela interação de vários fatores. Segundo estes autores, a vazão de pico, em ordem descendente de importância, é influenciada pela distribuição espacial da precipitação, pelo conteúdo inicial de umidade do solo, pela condutividade hidráulica saturada, pelo potencial matricial do solo e por último, pelo coeficiente de atrito superficial (n); enquanto o deflúvio é mais afetado pelo potencial matricial do solo, condutividade hidráulica saturada, conteúdo de umidade inicial do solo, distribuição espacial das precipitações e pelo coeficiente de atrito superficial (n). Conforme estes autores, a condutividade hidráulica saturada é o segundo fator mais importante a influenciar o escoamento superficial direto, justificando a menor variação deste, quando comparada à vazão de pico. Como o fluxo de água no solo foi considerado igual à k_0 durante toda a simulação, menor lâmina se converte em escoamento superficial direto, razão pela qual apresenta menor variação, quando comparada à vazão de pico, que é mais influenciada por outros fatores, como a distribuição espacial das precipitações na bacia hidrográfica.

A importância da umidade antecedente do solo na simulação hidrológica de cenários em bacias hidrográficas é relatada por Mello et al. (2007) e Mello

(2003). Segundo estes autores, o escoamento superficial direto é bastante sensível à umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação, devendo ser incorporadas à modelagem hidrológica para a previsão de impactos de mudanças no uso de solo em microbacias hidrográficas.

De acordo com Castillo et al. (2003), a exclusão da umidade inicial do solo para modelagem do escoamento superficial pode resultar em erros significativos de suas predições para eventos de diferentes intensidades de precipitação. Bacia hidrográfica com resposta hidrológica mais uniforme é menos sensível às condições de umidade antecedente do solo aos eventos de precipitação. Assim, o papel da umidade antecedente é mais importante em bacias hidrográficas nas quais a presença da cobertura vegetal e as características do solo possuem maior variabilidade espacial, como as tropicais, pois tem-se o início do escoamento superficial direto (ESD) regido, principalmente, pelas condições de umidade antecedente.

Por outro lado, a sensibilidade de resposta do escoamento superficial para determinada umidade antecedente depende dos mecanismos predominantes para que este ocorra. Quando o escoamento superficial direto ocorre devido a altas intensidades de precipitação ou por menor capacidade de infiltração de água no solo, a resposta do escoamento superficial direto é mais uniforme e depende menos da umidade antecedente. O escoamento superficial direto de eventos de menor intensidade de precipitação e de solos mais permeáveis é mais controlado pelo conteúdo inicial de umidade do solo, principalmente de suas camadas superficiais.

Considerando os comentários anteriores de Castillo et al. (2003) e os estudos de caracterização físico-hídrica do solo para a bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, conduzidos por Gomes et al. (2007a e 2007b) e Gomes (2005), pode-se dizer que a umidade antecedente do solo rege o escoamento superficial para eventos de menor intensidade de precipitação, pois os solos da bacia foram

classificados, por estes autores, conforme critérios apresentados por Libardi (2005) e Bernardo (2002), como solos de alta permeabilidade ($0,36 \text{ m d}^{-1} < k_0 < 0,72 \text{ m d}^{-1}$).

Uma vez mais se pôde confirmar o efeito da vegetação sobre as variáveis do escoamento superficial direto. Visualiza-se, facilmente, pelas Figuras 1, 2, 3, 4, 5 e 6, que o cenário milho aos 15 dias após o plantio, com altura de plantas de 0,30m e índice de área foliar de $2,283 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, apresentou maior vazão de pico, maior lâmina convertida em escoamento superficial direto, menor tempo de pico e maior índice C de escoamento superficial, em detrimento dos demais cenários, principalmente mata natural e eucalipto. Estes resultados estão em conformidade com Chaplot et al. (2005) que calibraram o modelo LISEM para uma bacia hidrográfica de $0,62 \text{ km}^2$, com declividade média de 28%, altitude variando de 425 m a 718 m e gradientes de declividade oscilando entre 3% a mais que 350%, ao norte de Laos, França, ocupada com culturas anuais (9,1%), pastagem (52,7%), pomar (12,2%) e floresta (26%) e também simularam cenários da seguinte forma: (i) aumento da área com cultivos anuais de 9,1% para 65% e 100%; (ii) diminuição da área com cultivos anuais, para 0% e cobertura de 100% com floresta. Para o cenário de uso atual, foram registradas velocidades de fluxo nos canais na ordem de $0,037 \text{ m s}^{-1}$ à $0,062 \text{ m s}^{-1}$, com valores máximos próximos a $0,186 \text{ m s}^{-1}$ nos locais de maior declividade. Aumentando a área com cultivos anuais, de 9,1% para 65% da superfície da bacia, registraram-se velocidades de fluxo ligeiramente superiores ($0,062 \text{ m s}^{-1}$ a $0,112 \text{ m s}^{-1}$) e com ocupação de 100% da bacia hidrográfica com culturas anuais, a velocidade máxima do fluxo foi muito alta ($0,298 \text{ m s}^{-1}$ a $0,336 \text{ m s}^{-1}$), especialmente, ao longo dos caminhos preferenciais do fluxo, definidos pelas condições topográficas. Quando o uso do solo foi apenas a floresta, a velocidade de fluxo foi reduzida significativamente, não alcançando $0,0625 \text{ m s}^{-1}$. No que tange aos sulcos de erosão, o aumento da extensão da área com cultivos anuais de 9,1%

para 65% incrementou o comprimento linear destes de 1.100 m para 2.860 m, com um valor máximo de 7.700 m registrado quando a cobertura da bacia com culturas anuais alcançou os 100%. Isso correspondeu a um aumento de comprimento dos sulcos em 600%; já para a ocupação florestal, não foi observado o desenvolvimento de sulcos lineares de erosão. Evidencia-se assim, segundo estes autores, a proteção que a ocupação florestal oferece aos recursos naturais solo e água.

Sabe-se que a dinâmica no contexto de uso do solo em bacias hidrográficas é muito grande, motivada, principalmente, pela oscilação de preços ou da demanda concentrada de certos produtos. Neste contexto, a simulação hidrológica ocupa um lugar de destaque, pois, se aplicada, permite conhecer o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas a eventos extremos, possibilitando que se tomem medidas de planejamento e gestão, evitando-se danos como inundações, ruptura de barragens, dentre outros. Pode-se recomendar também atenção especial na fase de implantação das culturas, sejam elas 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.

6 CONCLUSÕES

- a) As variáveis hidrológicas tempo de pico, vazão de pico, deflúvio e o índice C apresentaram respostas distintas em função dos cenários de uso dos solos da bacia hidrográfica do ribeirão Marcela.
- b) Os cenários mata natural, eucalipto e café aos 35 meses após o plantio apresentaram atenuação das vazões máximas em 37,62%, 42,17% e 28,04%, quando comparado aos valores observados para o cenário atual.
- c) O cenário milho aos 15 dias após o plantio, na fase inicial de desenvolvimento da cultura, produziu a maior vazão máxima, sendo esta superior à observada em 64,78%, indicando ser este o uso do solo, entre as alternativas avaliadas, o que mais predispõem a bacia hidrográfica ao impacto das cheias.
- d) A infiltração de água no solo e a interceptação da precipitação pelo dossel predominaram em relação às parcelas convertidas em deflúvio, armazenada nas microdepressões e que ainda está em movimento ao término das simulações.
- e) O modelo LISEM apresentou resultados coerentes para a simulação hidrológica dos diferentes cenários trabalhados, mostrando que pode ser utilizado para a previsão do comportamento hidrológicos de bacias hidrográficas, desde que previamente calibrado e mantidas as condições iniciais de umidade do solo.

7 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros com o modelo LISEM, recomendam-se:

- 1) fazer medições, diretamente no campo, do índice de área foliar para as culturas e ou vegetação presentes na área de estudo;
- 2) utilizar rugosímetro, como o da Figura 7 para medir a rugosidade superficial dos solos na área em estudo;

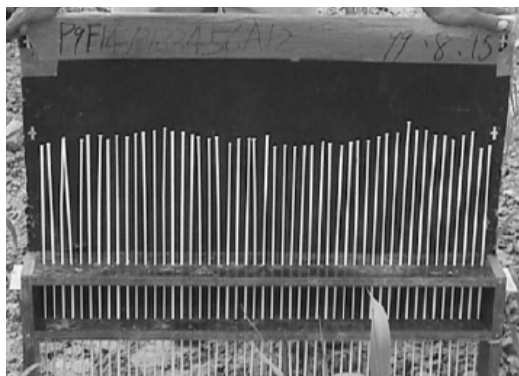


FIGURA 7 Rugosímetro de agulhas utilizado para medir a rugosidade superficial dos solos.

- 3) avaliar a possibilidade de utilizar equações ou critério prático para cálculo do coeficiente de atrito superficial de (n) , para os solos da bacia hidrográfica trabalhada;
- 4) determinar o coeficiente de rugosidade dos canais da bacia hidrográfica, empregando-se o raio hidráulico da seção, a perda de carga unitária e a velocidade média do fluxo em seções representativas dos canais de drenagem presentes na bacia hidrográfica;

5) utilizar as outras opções de modelos de infiltração de água no solo para descrever este processo nas simulações;

6) monitorar periodicamente a umidade do solo na bacia hidrográfica, para que a mesma sirva de referência ou mesmo adotada para a calibração do LISEM.

7) Fazer a simulação dos cenários considerando múltiplos usos, uma vez que o modelo é distribuído.

Estas medidas podem tornar mais trabalhosa a aplicação do LISEM, no entanto, podem descrever mais fielmente a realidade do ambiente estudado, quando comparado aos coeficiente tomados na literatura, melhorando, assim, a precisão dos resultados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCOVA, F.C.S.; CICCIO, V. de.; ROCHA, P.A.B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de mata atlântica em uma microbacia experimental em cunha - São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 257-262, 2003.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa, MG: UFV, 2002. 656 p.

CASTILLO, V.M.; GÓMEZ-PLAZA, A.; MARTÍNEZ-MENA, M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 284, p. 114-130, 2003.

CASTRO, L.G.; COGO, N.P.; VOLK, B.da.S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 339-352, 2006.

CARUZZO, A.R.; ROCHA, H.R. da. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) em regiões de pastagem e floresta com um método indireto (gap fraction) durante o Experimento AMC/LBA-1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira e Meteorologia. 2000. p. 2478-2485.

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**, Amsterdam, v. 63, n. 2, p. 318-328. 2005.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 194p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, RS.

FAVARIN, J.L.; DOURADO NETO, D.; GARCÍA, A.G.; NOVA, N.A.V.; FAVARIN, M. da. G.G.V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 769-773, jun. 2002.

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 Amazônica**, Manaus, v. 35, n. 1, p. 55–62, 2005.

GOMES, N.M. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do ribeirão Marcela na região do Alto Rio Grande, MG**. 2005. 124p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

GOMES, N.M.; FARIA, M.A. de.; SILVA, A.M. da.; MELLO, C.R. de.; VIOLA, M.R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 427-435, 2007a.

GOMES, N.M.; MELLO, C.R. de.; FARIA, M.A. de.; SILVA, A.M. da.; OLIVEIRA, M.S. de. Ajuste de variogramas no estudo da continuidade espacial de atributos físicos do solo. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 1, p. 92-107, 2007b.

JETTEN, V. **LISEM user manual, version 2.x. Draft version January 2002**. The Netherlands: Utrecht University: Utrecht Centre for Environmental and Landscape Dynamics, 2002. p. 48.

JETTEN, V. **LISEM user manual, version 2.x. Draft version January 2002**. The Netherlands: Utrecht University: Utrecht Centre for Environmental and Landscape Dynamics, 2002. 148p.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba, SP: EDUSP, 2005. 335p.

LIMA, W. de. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2.ed. São Paulo: Edusp, 1996. 301p.

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. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 333-342, 2003.

MARSIK, M.; WAYLEN, P. An application of the distributed hydrologic model CASC2D to a tropical montane watershed. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.330, p.481-495, 2006.

MELLO, C.R. **Estudo hidrológico em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero**. 2003. 133 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

MELLO, C.R. de.; LIMA, J.M.; SILVA, A.M. da. Simulação do deflúvio e vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 410-419, 2007.

MIRANDA, R.A.C. de.; PEREIRA, F.R.; MONAT, A.S. Interceptação de chuva em cafezais adensados da Região Serrana Centro-Norte Fluminense. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 283-288, 2004.

RANZINI, M. LIMA, W. de. P. Comportamento hidrológico, balanço de nutrientes e perdas de solo em duas microbacias reflorestadas com *Eucalyptus*, no Vale do Paraíba, SP. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 61, p.144-159, 2002.

SCHULER, A.E. **Fluxos hidrológicos em microbacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental, Paragominas, Pará**. 2003. 118p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, SP.

SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Crescimento nos setores moveleiro e florestal reflete na indústria de máquinas para madeira**. Disponível em: <http://www.sebrae-rs.com.br/_default.asp?Secao=Abrir&SubSecao=SetoresConteudo&idRegistro=14926&numInclude=2&idRegistroMI=15196&idSuperior=425&mes=4&ano=2007>. Acesso em: 17 jul. 2007.

SILVA, P.M. de.O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG**. 2006. 155p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

TAKKEN, I.; BEUSELINCK, L.; NACHTERGAELE, J.; GOVERS, G.; POESEN, J.; DEGRAER, G. Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). **Catena**, Amsterdam, v. 37, p. 431-447, 1999.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3.ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2004. 943p.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2005. 678p.

VIOLA, M.R. **Simulação hidrológica nas bacias de drenagem para o reservatório da UHE de Camargos/CEMIG**. 2008. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

XAVIER, A.C. **Estimativa da dinâmica do índice de área foliar em uma microbacia hidrográfica por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 2000. 111p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiros”, Piracicaba, SP.

XAVIER, A.C.; SOARES, J.V.; ALMEIDA, A. C. de. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 421-427, 2002.

9 ANEXOS

ANEXO A		Página
TABELA 1A.	Índice de área foliar da vegetação presente na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG, fornecido ao modelo LISEM, para calibração dos eventos de precipitação de diferentes intensidades	152
TABELA 2A.	Parâmetros de solo, em função do uso, fornecidos ao modelo LISEM, para calibração de eventos de precipitação de diferentes intensidades, registrados na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG	153
ANEXO B		
FIGURA 1B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 08/02/04, registrado às 10h54	154
FIGURA 2B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 11/02/06, registrado às 08h45	154
FIGURA 3B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 11/02/06, registrado às 20h45	155
FIGURA 4B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 23/02/04, registrado às 19h24	155
FIGURA 5B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 15/12/06, registrado às 21h02	156
FIGURA 6B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 21/02/04, registrado às 09h54	156
FIGURA 7B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 28/02/06, registrado às 20h12	157
FIGURA 8B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 14/02/04, registrado às 19h55	157
FIGURA 9B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 18/03/05, registrado às 12h00	158
FIGURA 10B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 08/03/05, registrado às 20h15	158
FIGURA 11B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 07/04/04, registrado às 00h52	159
FIGURA 12B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 12/04/04, registrado às 00h52	159
FIGURA 13B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 05/04/04, registrado às 22h52	160

FIGURA 14B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 19/03/2004, registrado às 22h08	160
FIGURA 15B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 09/12/04, registrado às 23h52	161
FIGURA 16B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 21/03/05, registrado às 16h45	161
FIGURA 17B.	Hietograma e hidrógrafa do evento de 11/03/06, registrado às 00h27	162
FIGURA 18B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 04/04/04, registrado às 16h23	162
FIGURA 19B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 31/05/04, registrado às 23h24	163
FIGURA 20B	Hietograma e hidrógrafa do evento de 24/02/04, registrado às 21h54	163
ANEXO C		
FIGURA 1C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 08/02/04	164
FIGURA 2C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 11/02/06	164
FIGURA 3C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 23/02/04	164
FIGURA 4C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 15/12/06	165
FIGURA 5C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 21/02/04	165
FIGURA 6C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 28/02/06	165

FIGURA 7C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 14/02/04	166
FIGURA 8C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 18/03/05	166
FIGURA 9C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 08/03/05	166
FIGURA 10C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000, mm para o evento do dia 05/04/04	167
FIGURA 11C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 19/03/04	167
FIGURA 12C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 09/12/04	167
FIGURA 13C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 04/04/04	168
FIGURA 14C	Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 24/02/04	168
ANEXO E		
FIGURA 1E	Hidrógrafa observada e hidrógrafa validada pelo LISEM, na espessura de 150 mm, para o evento do dia 11/02/06 20h45	169
FIGURA 2E	Hidrógrafa observada e hidrógrafa validada pelo LISEM na espessura de 150 mm, para o evento do dia 12/04/04	169

FIGURA 3E	Hidrógrafa observada e hidrógrafa validada pelo LISEM na espessura de 150 mm, para o evento do dia 11/03/06	169
FIGURA 4E	Hidrógrafa observada e hidrógrafa validada pelo LISEM na espessura de 150 mm, para o evento do dia 31/05/04	170
ANEXO F		
FIGURA 1F	Interface de comunicação do modelo LISEM com o usuário	171
FIGURA 2F	Resumo de simulação/calibração em arquivo formato txt fornecido pelo modelo LISEM ao término da compilação	171
FIGURA 3F	Resumo de simulação/calibração em arquivo de Figura, na extensão JPEG, fornecido pelo LISEM, ao término da compilação	172
ANEXO G		
FIGURA 1G	Mapa de condutividade hidráulica saturada bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela	173
FIGURA 2G	Mapa de umidade volumétrica de saturação (tensão de 0 kPa) da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela	173
FIGURA 3G	Mapa de umidade volumétrica da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, na tensão de 2 kPa	173
FIGURA 4G	Mapa de umidade volumétrica da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, na tensão de 6 kPa	174
FIGURA 5G	Mapa de umidade volumétrica da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, na tensão de 10 kPa	174
FIGURA G6	Mapa de umidade volumétrica da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, na tensão de 33 kPa	174
ANEXO H		
TABELA 1H	Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial direto tempo de pico e vazão de pico, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 300 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG	175
TABELA 2H	Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial escoamento superficial direto e índice C de escoamento superficial, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 300 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG	177

TABELA 3H	Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial direto tempo de pico e vazão de pico, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 450 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG	179
TABELA 4H	Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial escoamento superficial direto e índice C, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 450 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG	181
TABELA 5H	Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial direto tempo de pico e vazão de pico, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 600 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG	183
TABELA 6H	Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial escoamento superficial direto e índice C, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 600 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG	185
TABELA 7H	Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial direto tempo de pico e vazão de pico, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 1.000 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG	187
TABELA 8H	Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial escoamento superficial direto e índice C, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 1000 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG	189

TABELA 1A Índice de área foliar da vegetação presente na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG, fornecido ao modelo LISEM, para calibração dos eventos de precipitação de diferentes intensidades.

Eventos	Vegetação					
	Mata		Milho		Pastagem	
	FSCV	IAF	FSCV	IAF	FSCV	IAF
08/02/04	0,95	3,20	0,85	4,38	0,70	2,63
11/02/06	0,95	3,20	0,85	3,26	0,70	2,63
11/02/06	0,95	3,20	0,85	3,26	0,70	2,63
21/02/04	0,95	3,20	0,85	1,99	0,70	2,63
23/02/04	0,95	3,20	0,85	1,70	0,70	2,63
15/12/06	0,95	3,20	0,90	5,89	0,70	2,63
14/02/04	0,95	3,20	0,85	2,90	0,70	2,63
18/03/05	0,95	2,80		-	0,70	2,63
28/02/06	0,95	3,20	0,85	0,95	0,70	2,63
05/04/04	0,95	2,50		-	0,70	2,63
07/04/04	0,95	2,50		-	0,70	2,63
12/04/04	0,95	2,50		-	0,70	2,63
08/03/05	0,95	2,80		-	0,70	2,63
19/03/04	0,95	2,80		-	0,70	2,63
09/12/04	0,95	3,10	0,90	5,73	0,70	2,63
21/03/05	0,95	2,80		-	0,70	2,63
11/03/06	0,95	2,80		-	0,70	2,63
04/04/04	0,95	2,50		-	0,70	2,63
24/04/04	0,95	2,50		-	0,70	2,63
31/05/04	0,95	2,40		-	0,70	2,63

TABELA 2A Parâmetros de solo, em função do uso, fornecidos ao modelo LISEM, para calibração de eventos de precipitação de diferentes intensidades, registrados na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Eventos	Mata		Milho		Pastagem	
	(n)	Rug.	(n)	Rug.	(n)	Rug.
08/02/04	0,30	1,36	0,08	1,14	0,227	0,70
11/02/06	0,30	1,36	0,08	1,14	0,227	0,70
11/02/06	0,30	1,36	0,08	1,14	0,227	0,70
21/02/04	0,30	1,36	0,08	1,14	0,227	0,70
23/02/04	0,30	1,36	0,08	1,14	0,227	0,70
15/12/06	0,30	1,36	0,08	1,14	0,227	0,70
14/02/04	0,30	1,36	0,08	1,14	0,227	0,70
18/03/05	0,30	1,36	-	-	0,227	0,70
28/02/06	0,30	1,36	0,08	1,14	0,227	0,70
05/04/04	0,30	1,36	-	-	0,227	0,70
07/04/04	0,30	1,36	-	-	0,227	0,70
12/04/04	0,30	1,36	-	-	0,227	0,70
08/03/05	0,30	1,36	-	-	0,227	0,70
19/03/04	0,30	1,36	-	-	0,227	0,70
21/03/04	0,30	1,36	-	-	0,227	0,70
09/12/04	0,30	1,36	0,08	1,14	0,227	0,70
11/03/05	0,30	1,36	-	-	0,227	0,70
04/04/04	0,30	1,36	-	-	0,227	0,70
24/04/04	0,30	1,36	-	-	0,227	0,70
31/05/04	0,30	1,36	-	-	0,227	0,70

(n): coeficiente de rugosidade superficial do solo em função do cultivo; Rug.: rugosidade superficial do solo (cm).

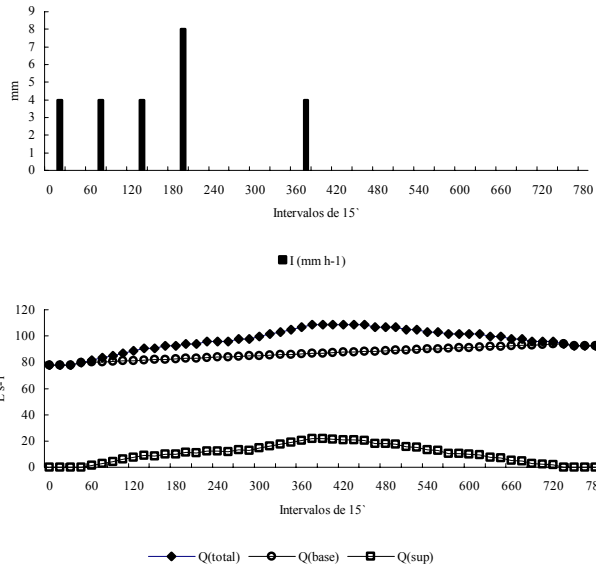


FIGURA 1B Hietograma e hidrógrafa do evento de 08/02/04, registrado às 10h54

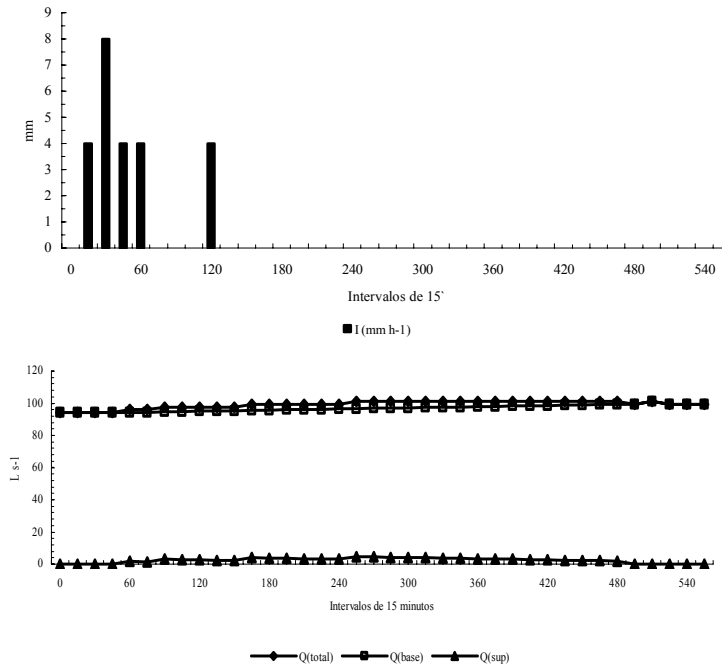


FIGURA 2B Hietograma e hidrógrafa do evento de 11/02/06, registrado às 08h45

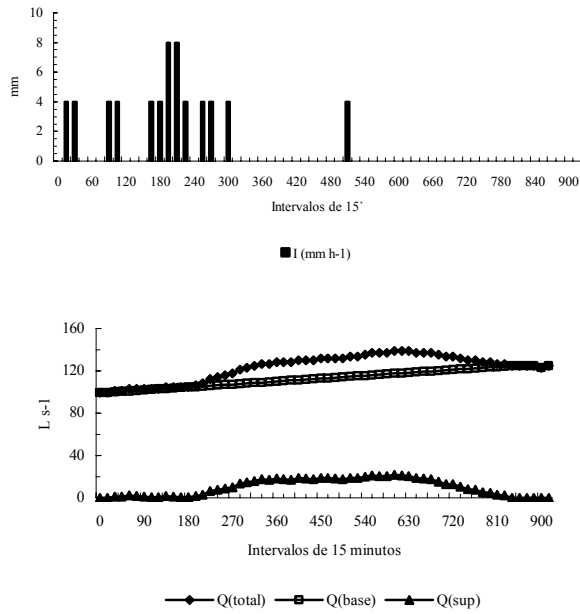


FIGURA 3B Hietograma e hidrógrafa do evento de 11/02/06, registrado às 20h45

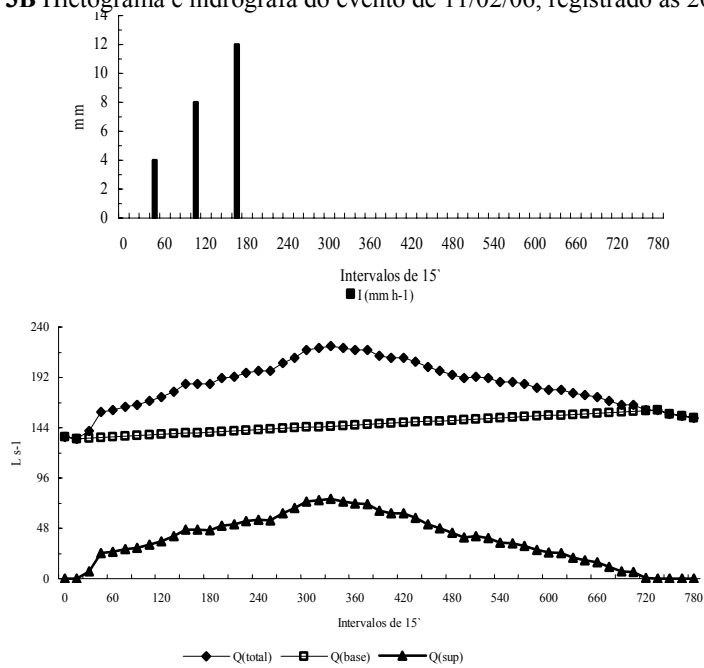


FIGURA 4B Hietograma e hidrógrafa do evento de 23/02/04, registrado às 19h24

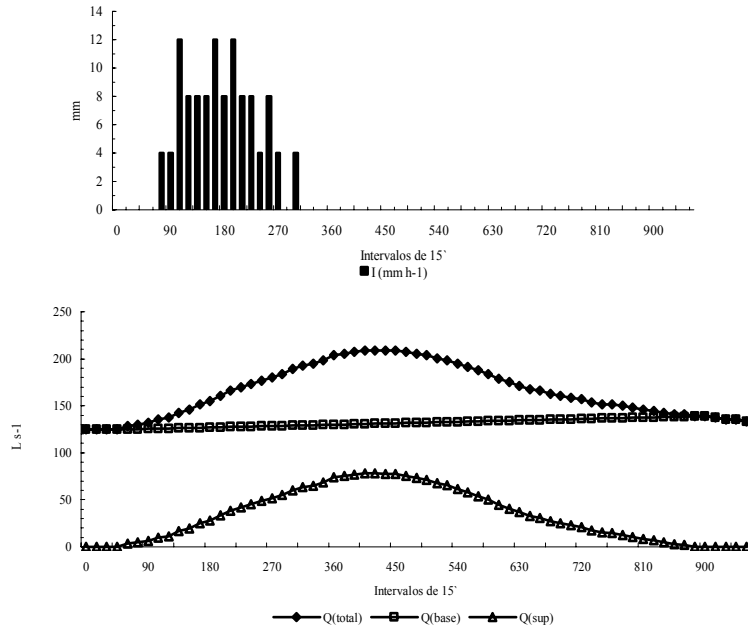


FIGURA 5B Hietograma e hidrógrafa do evento de 15/12/06, registrado às 21h02

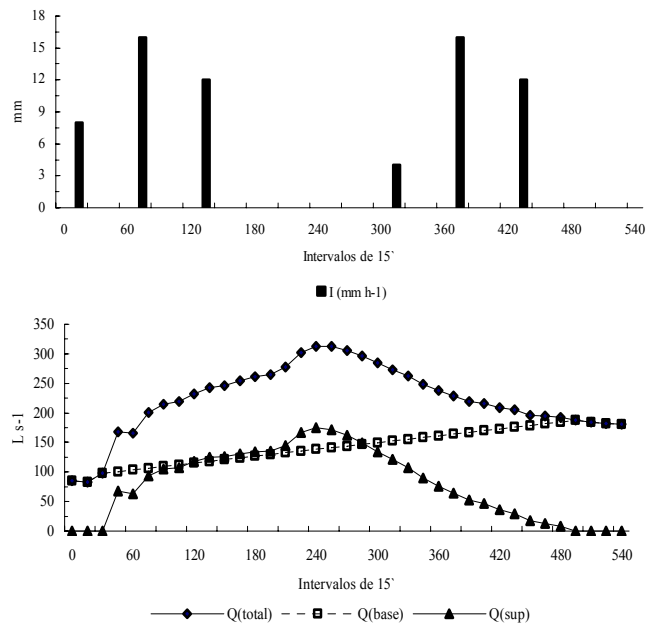


FIGURA 6B Hietograma e hidrógrafa do evento de 21/02/04, registrado às 09h54

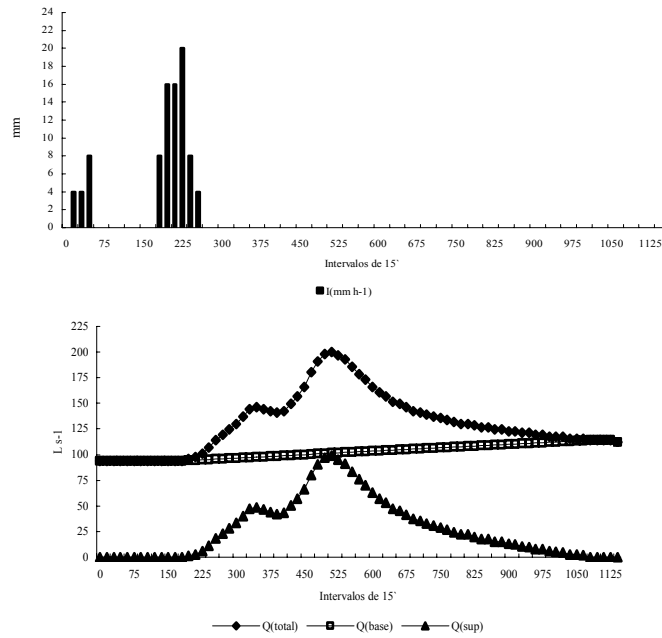


FIGURA 7B Hietograma e hidrógrafa do evento de 28/02/06, registrado às 20h12

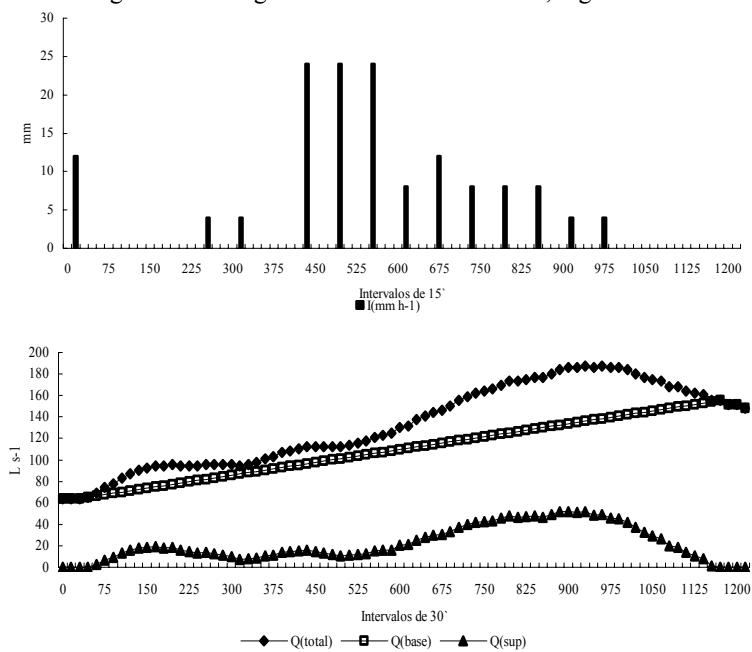


FIGURA 8B Hietograma e hidrógrafa do evento de 14/02/04, registrado às 19h55

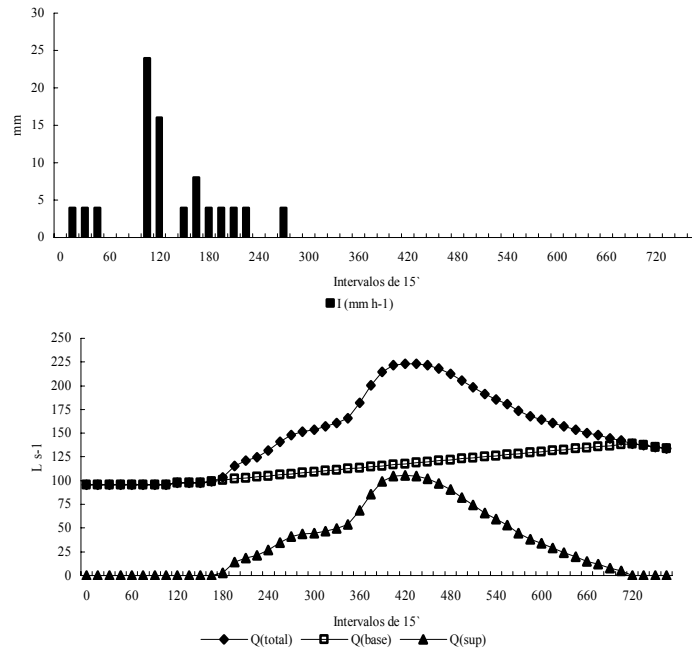


FIGURA 9B Hietograma e hidrógrafa do evento de 18/03/05, registrado às 12h00

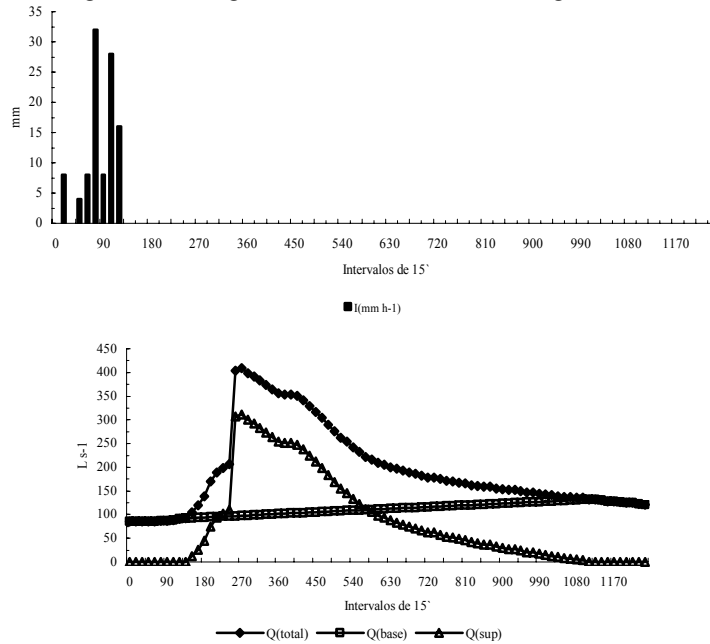


FIGURA 10B Hietograma e hidrógrafa do evento de 08/03/05, registrado às 20h15

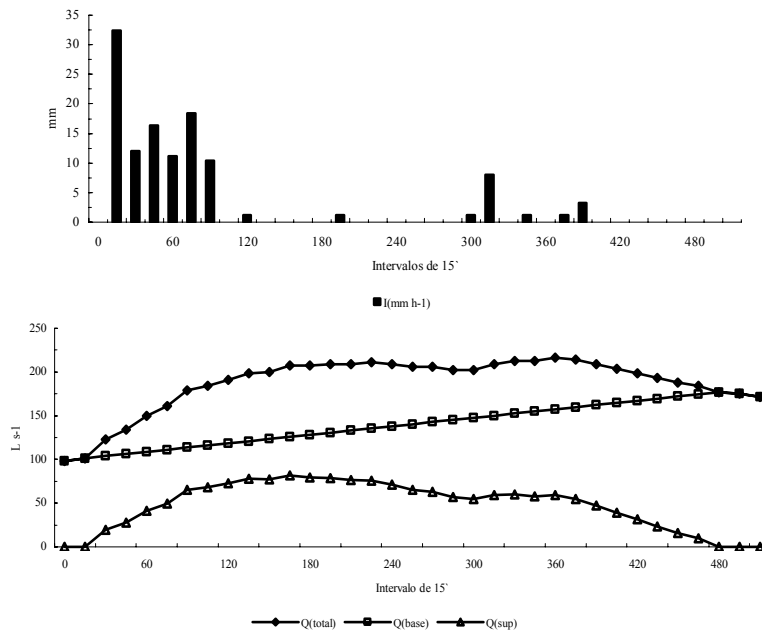


FIGURA 11B Hietograma e hidrógrafa do evento de 07/04/04, registrado às 00h52

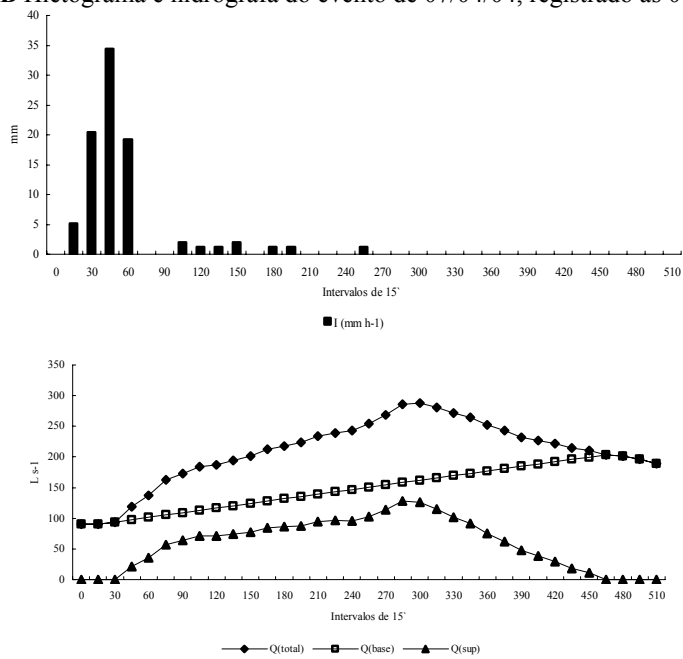


FIGURA 12B Hietograma e hidrógrafa do evento de 12/04/04, registrado às 00h52

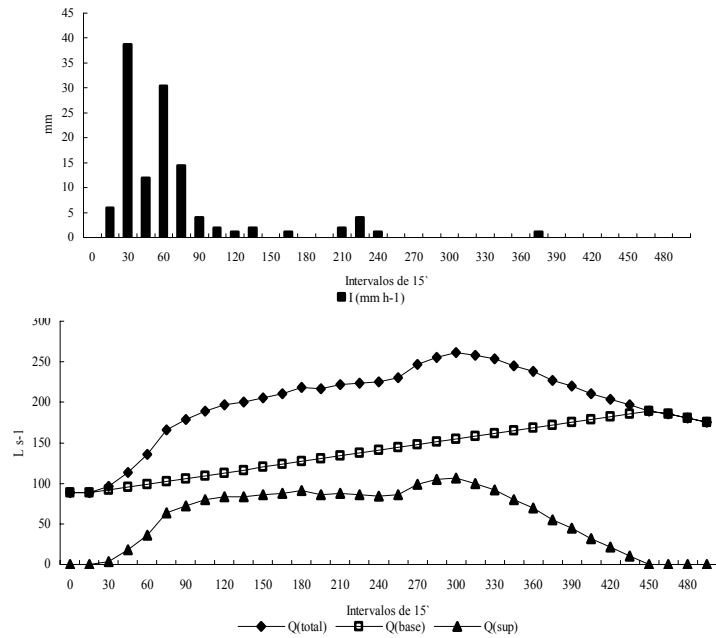


FIGURA 13B Hietograma e hidrógrafa do evento de 05/04/04, registrado às 22h52

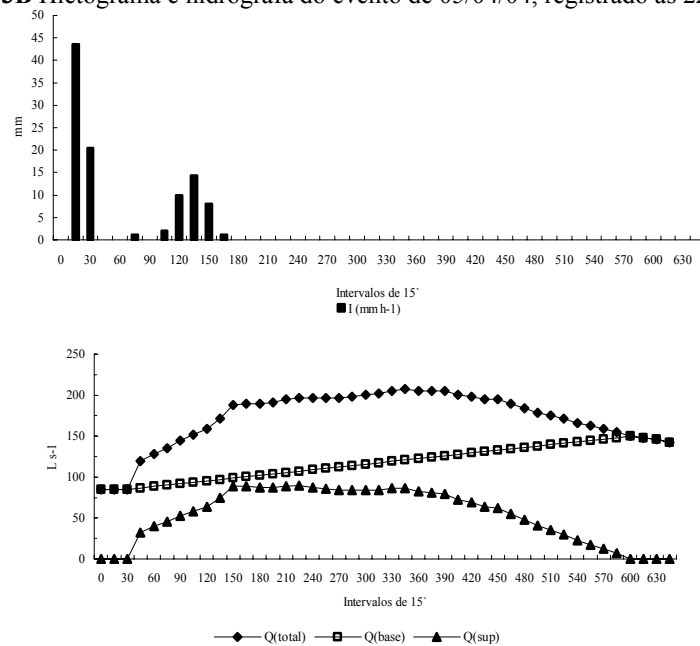


FIGURA 14B Hietograma e hidrógrafa do evento de 19/03/2004, registrado às 22h08

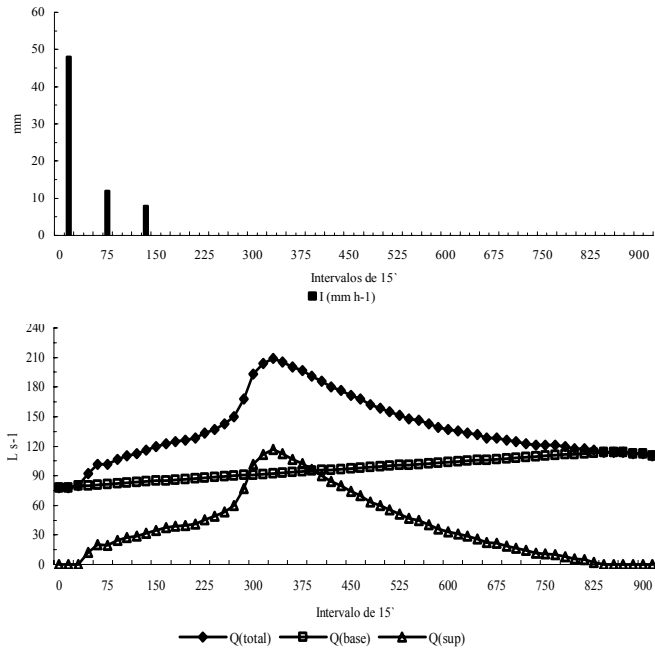


FIGURA 15B Hietograma e hidrógrafa do evento de 09/12/04, registrado às 23h52

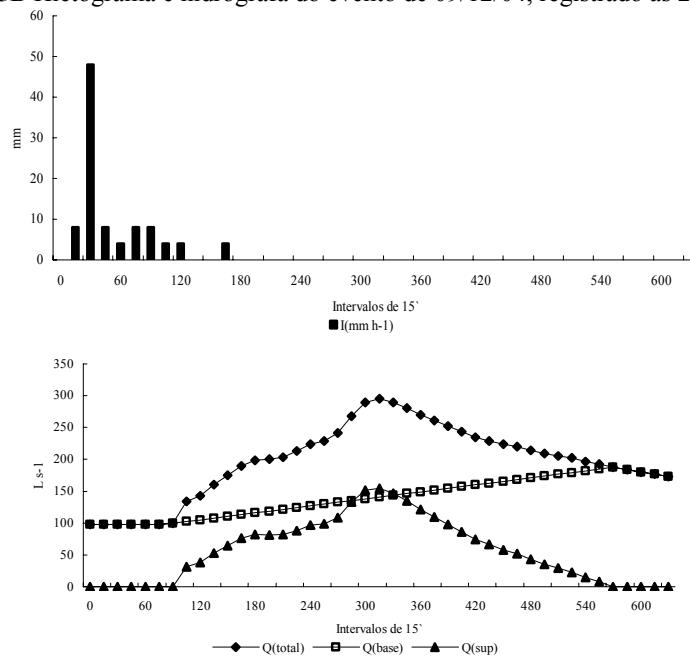


FIGURA 16B Hietograma e hidrógrafa do evento de 21/03/05, registrado às 16h45

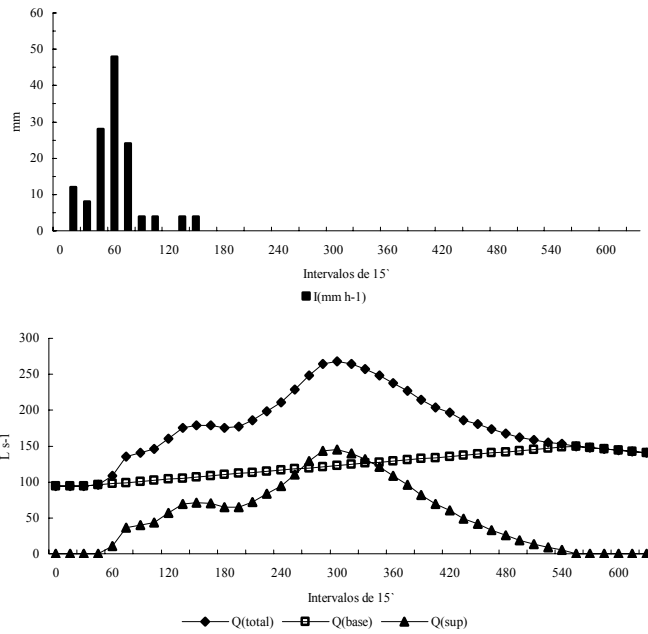


FIGURA 17B Hietograma e hidrógrafa do evento de 11/03/06, registrado às 00h27

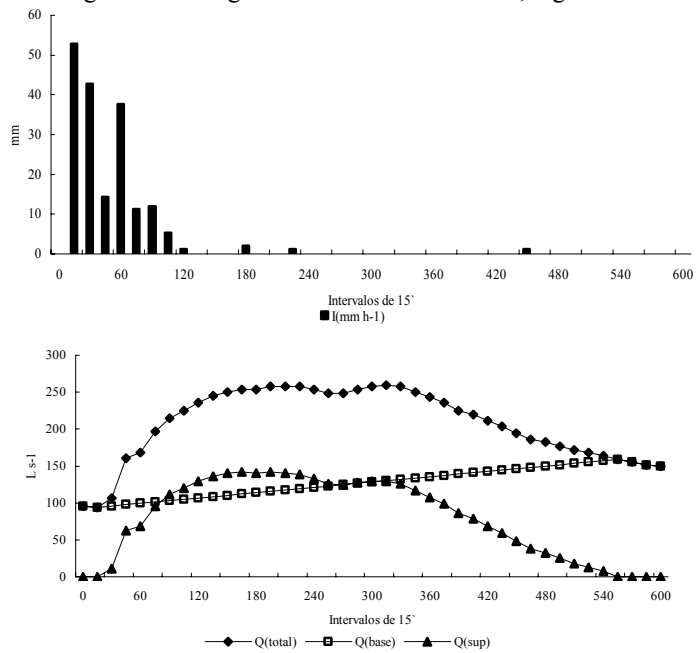


FIGURA 18B Hietograma e hidrógrafa do evento de 04/04/04, registrado às 16h23

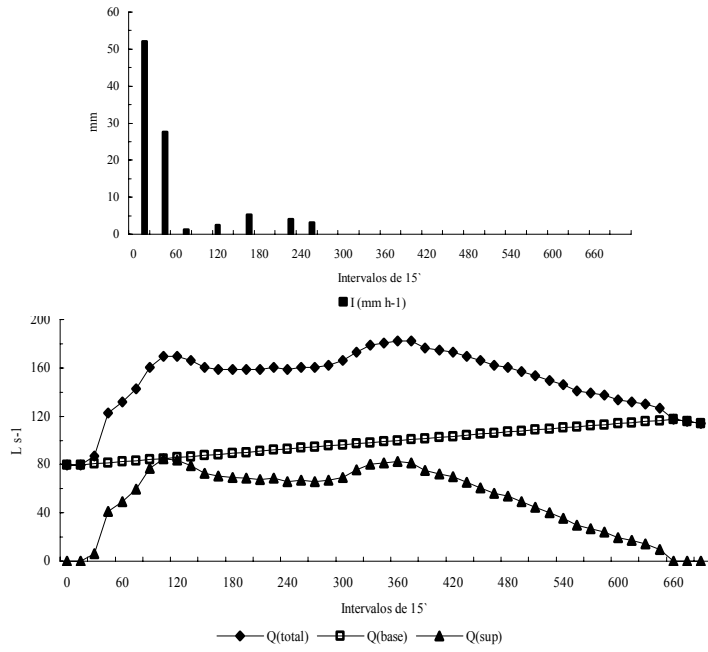


FIGURA 19B Hietograma e hidrógrafa do evento de 31/05/04, registrado às 23h24

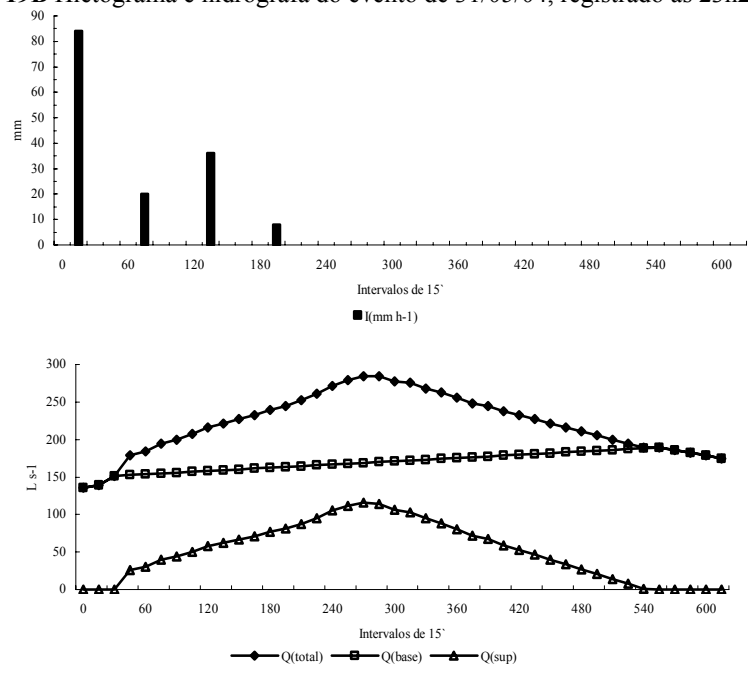


FIGURA 20B Hietograma e hidrógrafa do evento de 24/02/04, registrado às 21h54

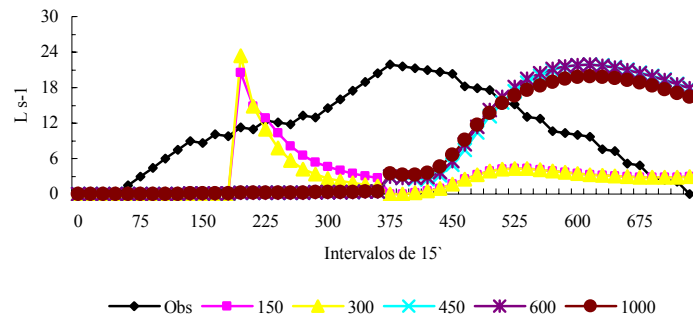


FIGURA 1C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 08/02/04.

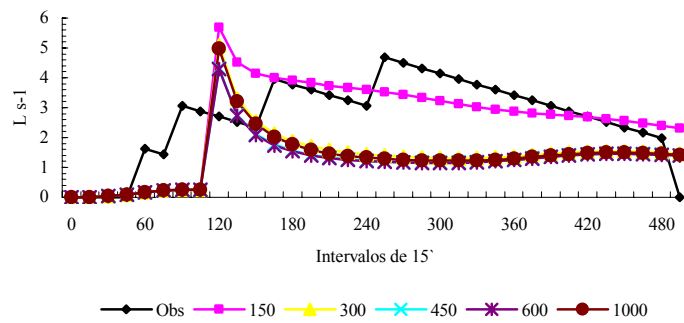


FIGURA 2C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 11/02/06.

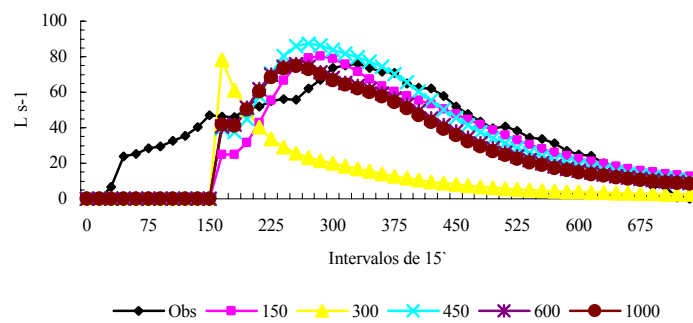


FIGURA 3C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 23/02/04.

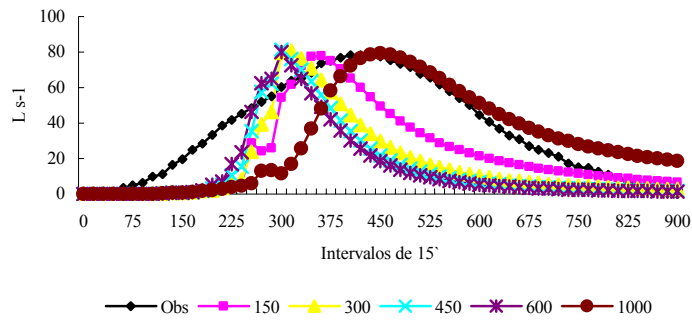


FIGURA 4C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 15/12/06.

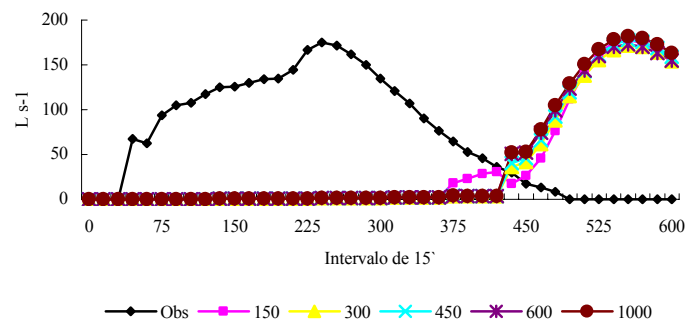


FIGURA 5C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 21/02/04.

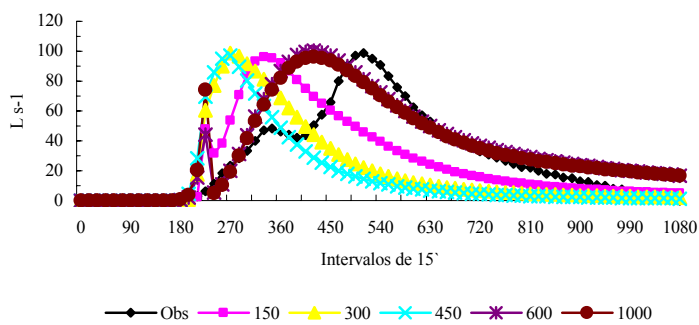


FIGURA 6C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 28/02/06.

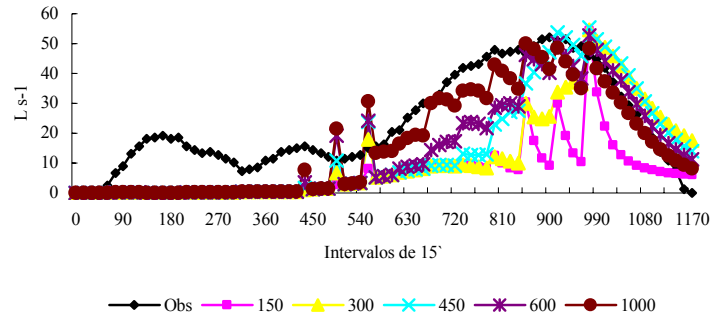


FIGURA 7C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 14/02/04.

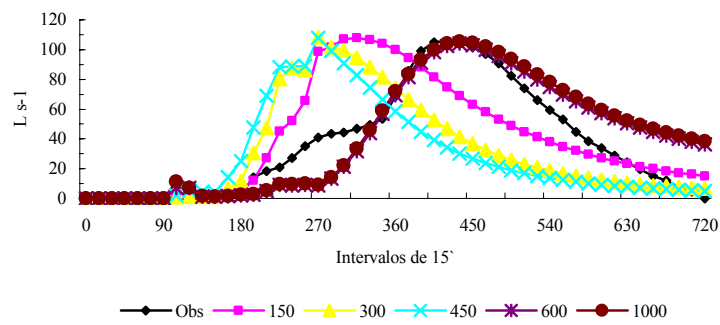


FIGURA 8C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 18/03/05.

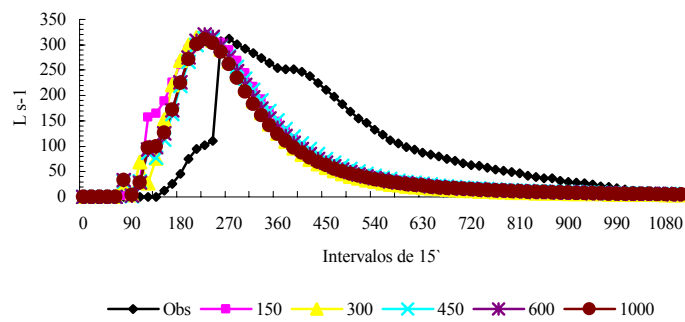


FIGURA 9C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 08/03/05.

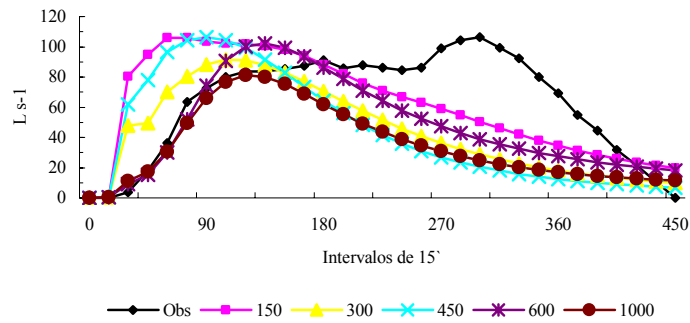


FIGURA 10C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000, mm para o evento do dia 05/04/04.

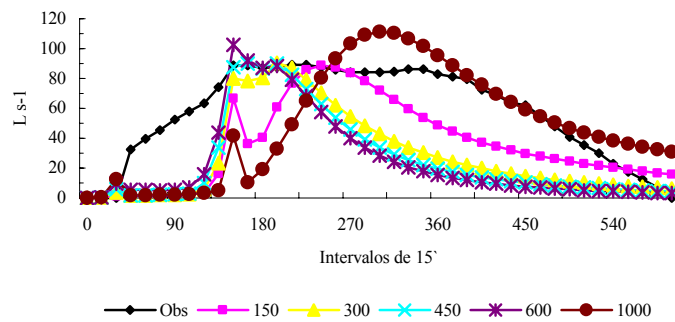


FIGURA 11C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 19/03/04.

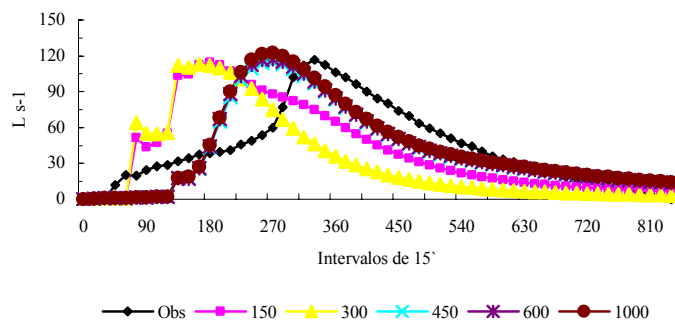


FIGURA 12C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 09/12/04.

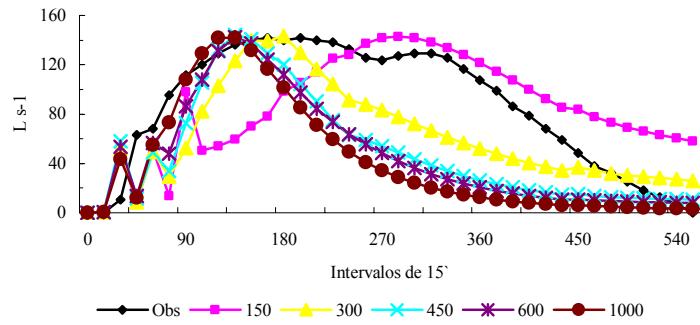


FIGURA 13C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 04/04/04.

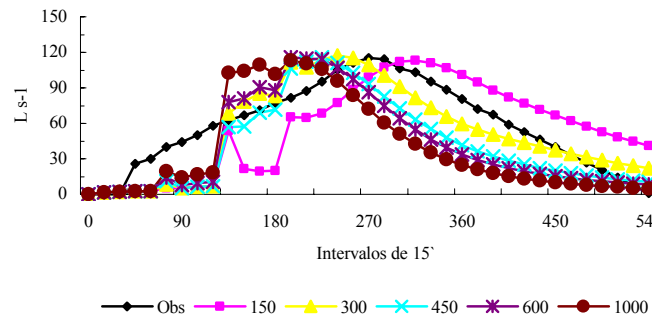


FIGURA 14C Hidrógrafas observadas e obtidas por calibração do LISEM, para as espessuras de 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm e 1.000 mm, para o evento do dia 24/02/04.

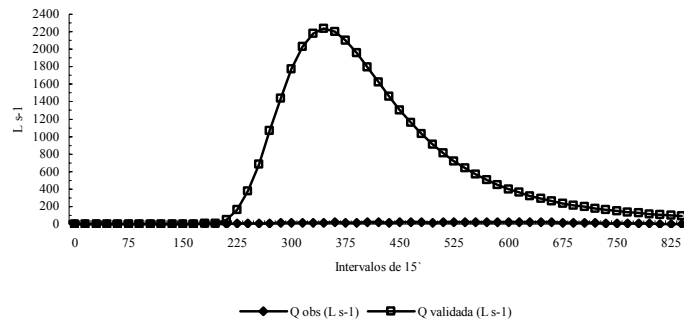


FIGURA 1E Hidrógrafa observada e hidrógrafa validada pelo LISEM, na espessura de 150 mm, para o evento do dia 11/02/06 20h45

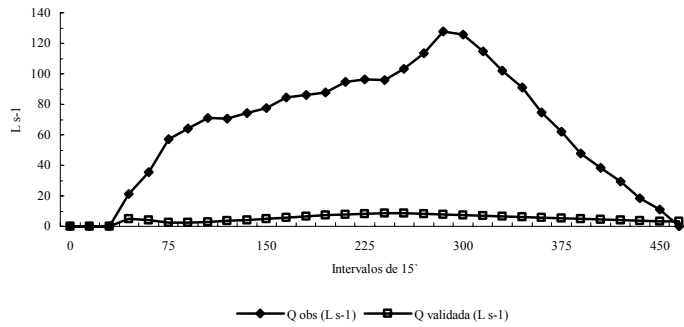


FIGURA 2E Hidrógrafa observada e hidrógrafa validada pelo LISEM na espessura de 150 mm, para o evento do dia 12/04/04.

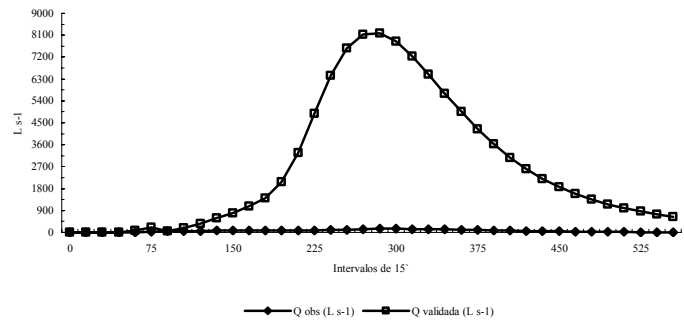


FIGURA 3E Hidrógrafa observada e hidrógrafa validada pelo LISEM na espessura de 150 mm, para o evento do dia 11/03/06.

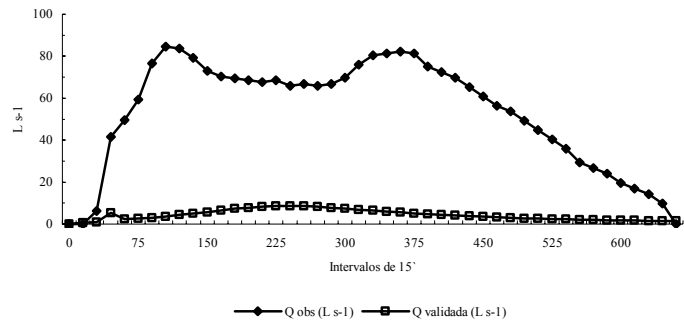


FIGURA 4E Hidrógrafa observada e hidrógrafa validada pelo LISEM na espessura de 150 mm, para o evento do dia 31/05/04.

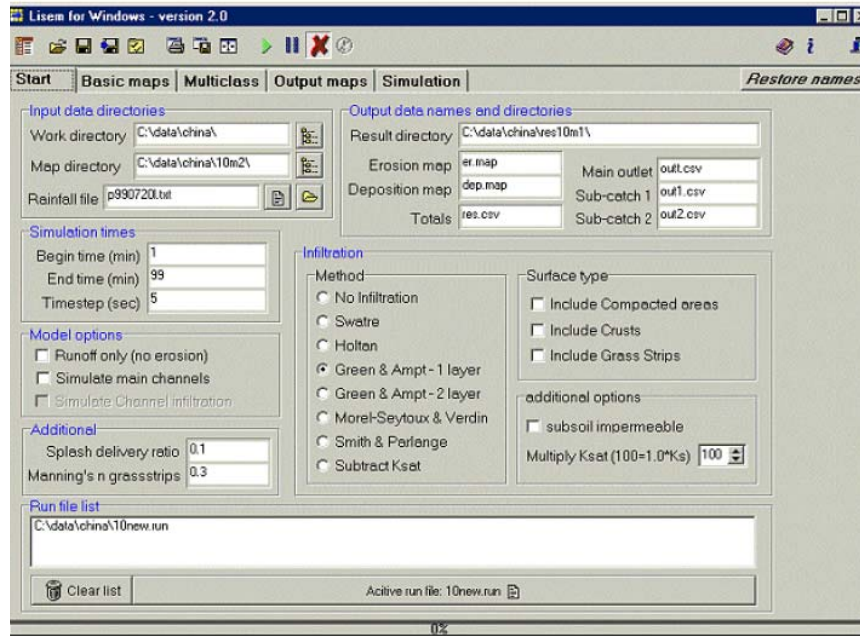


FIGURA 1F Interface de comunicação do modelo LISEM com o usuário.

LISEM run with: C:\Modelo PCRaster\Mapas\Marcela\Resultados\c3\mata\230204 0154\simulacao.run
 LISEM results at time (min): 495.000

```

-----
Catchment area      (ha); 464.893600
Total rainfall      (mm); 15.83173
Total discharge     (mm); 0.57950
Total interception  (mm); 0.04818
Total infiltration  (mm); 14.78231
Average surface storage (mm); 0.16054
Water in runoff     (mm); 0.19383
Mass balance error (water)(%); 0.02381
Total discharge     (m3); 2694.05713
Peak discharge      (l/s); 197.21169
Peak time          (min); 300.00000
Discharge/Rainfall (%); 3.660
Splash detachment  (ton); 41.75312
Flow detachment (land) (ton); 94.95441
Deposition (land) (ton); -134.14381
Erosion channel/wheeltr. (ton); 118.91405
Deposition channel/whlt (ton); -99.80119
Suspended Sediment (ton); 0.00047
Susp. Sediment chan/whlt (ton); 0.00201
Total soil loss    (ton); 19.46488
Average soil loss  (kg/ha); 41.86954
  
```

FIGURA 2F Resumo de simulação/calibração em arquivo formato txt fornecido pelo modelo LISEM ao término da compilação.

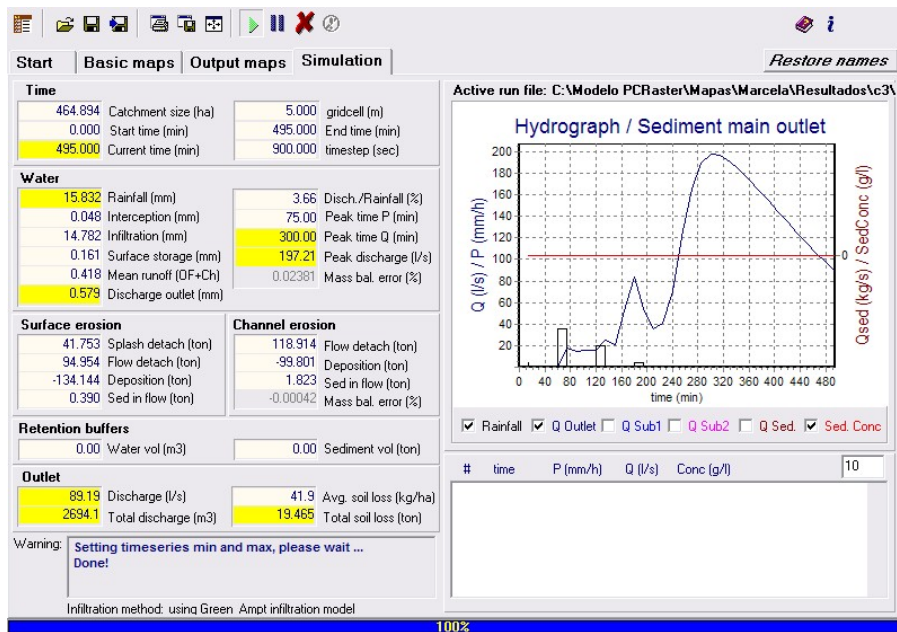


FIGURA 3F Resumo de simulação/calibração em arquivo de Figura, na extensão JPEG, fornecido pelo LISEM, ao término da compilação.

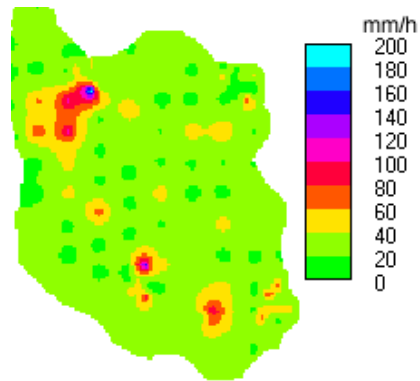


FIGURA 1G Mapa de condutividade hidráulica saturada bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela.

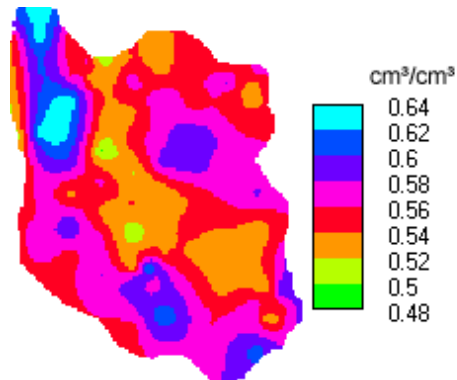


FIGURA 2G Mapa de umidade volumétrica de saturação (tensão de 0 kPa) da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela.

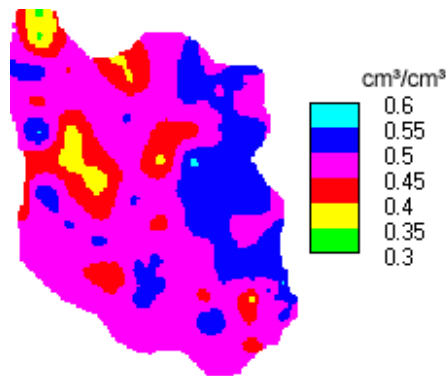


FIGURA 3G Mapa de umidade volumétrica da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, na tensão de 2 kPa.

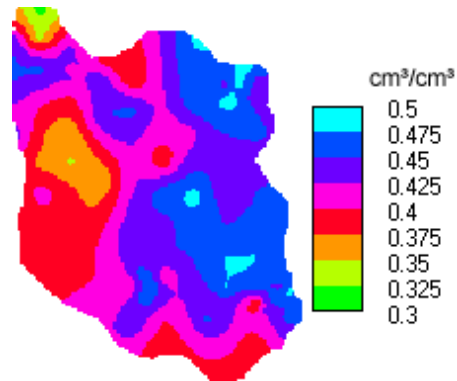


FIGURA 4G Mapa de umidade volumétrica da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, na tensão de 6 kPa.

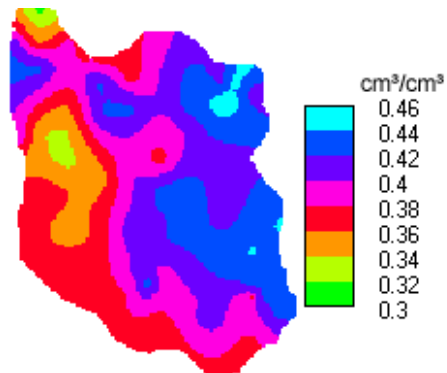


FIGURA 5G Mapa de umidade volumétrica da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, na tensão de 10 kPa.

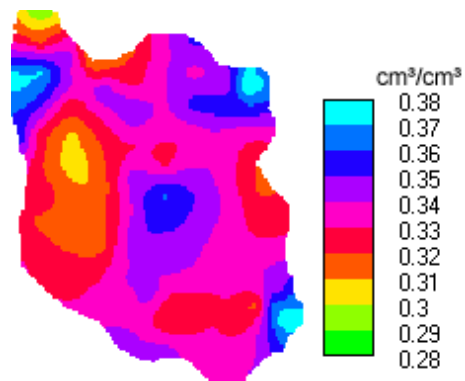


FIGURA G6 Mapa de umidade volumétrica da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, na tensão de 33 kPa.

TABELA 1H Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial direto tempo de pico e vazão de pico, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 300 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Ψ_m (kPa)	θ (cm ³ cm ⁻³)	% de θ	Variáveis do escoamento superficial direto							
				Tempo de pico (minutos)			Qp (L s ⁻¹)				
				Obs	Cal	Δ (%)	Obs	Cal	Δ (%)		
08/02/04	0	0,5601	98,10		52		40,00		4,35		-80,15
			98,25	375	19		-48,00		23,40		6,76
			98,30		30		-20,00	21,92	37,23		69,88
			98,50		73		96,00		231,46		956,12
11/02/06	0	0,5601	97,05		12		-63,64		3,45		-26,30
			97,07	330	12		-63,64		5,08		8,58
			97,30		33		0,00	4,68	36,04		670,15
			97,50		34		4,55		62,65		1238,7
23/02/04	0	0,5601	98,25		16		-35,29		46,69		-38,70
			98,27	255	16		-35,29		78,33		2,85
			98,60		28		11,76	76,16	614,48		706,86
			99,00		28		11,76		631,37		729,04
15/12/06	2	0,4829	90,50		33		-18,52		66,30		-15,36
			90,80	405	31		-22,22		80,64		2,95
			91,00		33		-18,52	78,33	85,88		9,63
			91,50		30		-25,93		110,54		41,12
21/02/04	0	0,5601	92,05		55		131,25		165,61		-5,20
			92,06	240	55		131,25		171,70		-1,71
			92,07		55		131,25	174,6	184,35		5,53
			92,10		55		131,25	9	209,56		19,96
28/02/06	2	0,4829	95,00		28		-26,92		48,28		-51,11
			96,00		28		-26,92		81,95		-17,01
			96,40	390	27		-30,77		98,75		0,01
			97,00		30		-23,08	98,74	112,17		13,60
14/02/04	10	0,4052	97,00		93		3,33		1160,1		2126,4
			99,00		97		8,33		37,10		-28,80
			99,80	900	97		8,33		54,51		4,61
			100,00		97		8,33	52,11	58,75		12,74

TABELA 1H, “Cont.”

			96,10		270	-35,71		108,12	2,25
18/03/05	2	0,4829	96,30	420	270	-35,71	105,73	125,04	18,26
			96,50		270	-35,71		129,00	22,01
			97,20		345	-17,86		132,98	25,77
			95,50		210	-22,22		237,97	-23,67
08/03/05	2	0,4829	96,20	270	225	-16,67	311,76	299,69	-3,87
			96,40		225	-16,67		317,12	1,72
			97,00		210	-22,22		404,51	29,75
			95,00		420	154,55		31,37	-61,57
07/04/04	6	0,4348	98,00	165	405	145,45	81,63	79,81	-2,22
			98,10		405	145,45		81,88	0,31
			100,00		450	172,73		133,02	62,96
			96,00		105	-65,00		91,69	2,71
05/04/04	2	0,4829	96,60	300	120	-60,00	89,27	108,44	21,48
			96,68		120	-60,00		114,91	28,72
			97,00		120	-60,00		122,54	37,27
			93,00		195	-13,33		77,96	-12,67
19/03/04	2	0,4829	93,30	225	195	-13,33	89,27	90,60	1,49
			93,50		210	-6,67		92,90	4,07
			95,00		240	6,67		161,77	81,22
			99,50		135	-62,50		109,61	-6,08
09/12/04	2	0,4829	99,60	360	165	-54,17	116,71	113,04	-3,15
			99,70		195	-45,83		121,80	4,37
			100,00		210	-41,67		134,01	14,83
			95,00		135	-57,14		124,13	-15,59
21/03/05	2	0,4829	95,50	315	225	-28,57	147,06	142,79	-2,90
			96,00		225	-28,57		192,42	30,85
			98,00		210	-33,33		436,48	196,81
			94,50		180	9,09		132,80	-6,35
04/04/04	10	0,4052	94,70	165	180	9,09	141,80	139,35	-1,73
			94,80		180	9,09		143,25	1,02
			95,00		180	9,09		526,39	271,22
			94,00		255	-5,56		107,22	-7,13
24/02/04	6	0,4348	94,30	270	240	-11,11	115,45	117,37	1,67
			94,50		240	-11,11		122,05	5,71
			95,00		195	-27,78		141,50	22,56

TABELA 2H Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial escoamento superficial direto e índice C de escoamento superficial, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 300 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Ψ_m (kPa)	θ (cm ³ cm ⁻³)	% de θ	Variáveis do escoamento superficial direto					
				ESD (m ³)			Índice C		
				Obs	Cal	Δ (%)	Obs	Cal	Δ (%)
08/02/04	0	0,5601	98,10		61,11	-87,47		0,22	-87,54
			98,25	487,78	133,12	-72,71	1,75	0,47	-72,90
			98,30		382,24	-21,64		1,36	-22,13
			98,50		2.602,90	433,62		9,28	430,42
11/02/06	0	0,5601	97,05		32,60	-60,16		0,12	-59,86
			97,07	81,82	41,66	-49,09	0,29	0,15	-48,79
			97,30		513,35	527,41		1,83	533,22
			97,50		899,60	999,48		3,21	1009,34
23/02/04	0	0,5601	98,25		201,35	-88,61		0,72	-88,68
			98,27	1.768,32	528,98	-70,09	6,34	1,89	-70,27
			98,60		9.079,39	413,45		32,36	410,35
			99,00		9.378,37	430,35		33,42	427,16
15/12/06	2	0,4829	90,50		802,29	-59,31		0,61	-59,54
			90,80	1.971,79	926,84	-52,99	1,52	0,71	-53,14
			91,00		1.042,72	-47,12		0,80	-47,46
			91,50		1.351,63	-31,45		1,03	-31,88
21/02/04	0	0,5601	92,05		1.321,05	-50,57		1,66	-50,83
			92,06	2.672,83	1.347,31	-49,59	3,38	1,70	-49,85
			92,07		1.431,44	-46,44		1,80	-46,75
			92,10		1.556,97	-41,75		1,96	-42,07
28/02/06	2	0,4829	95,00		625,79	-67,37		0,64	-66,12
			96,00		1.106,90	-42,29		1,13	-40,05
			96,40	1.918,04	1.341,06	-30,08	1,88	1,37	-27,34
			97,00		1.702,84	-11,22		1,73	-7,77
14/02/04	10	0,4052	97,00		25.125,70	1.428,32		14,92	1422,45
			99,00		615,12	-62,58		0,37	-62,76
			99,80	1.644,01	843,78	-48,68	0,98	0,50	-48,88
			100,00		909,83	-44,66		0,54	-44,90

TABELA 2H, “Cont.”

			96,10		1.425,46	-12,96		1,45	-13,53
18/03/05	2	0,4829	96,30	1.637,72	1.583,23	-3,33	1,68	1,61	-3,93
			96,50		1.750,38	6,88		1,78	6,20
			97,20		2.374,59	44,99		2,42	44,10
			95,50		3.114,44	-50,24		2,56	-50,54
08/03/05	2	0,4829	96,20	6.259,20	4.042,24	-35,42	5,18	3,32	-35,81
			96,40		4.354,67	-30,43		3,58	-30,84
			97,00		5.443,77	-13,03		4,48	-13,54
			95,00		495,54	-66,75		0,36	-66,97
07/04/04	6	0,4348	98,00	1.490,27	1.424,40	-4,42	1,09	1,03	-5,06
			98,10		1.469,86	-1,37		1,07	-2,02
			100,00		2.647,90	77,68		1,92	76,54
			96,00		1.222,05	-30,37		1,16	-7,12
05/04/04	2	0,4829	96,60	1.755,04	1.533,07	-12,65	1,25	1,46	16,56
			96,68		1.652,24	-5,86		1,57	25,60
			97,00		1.787,22	1,83		1,70	35,84
			93,00		895,63	-57,82		0,76	-58,01
19/03/04	2	0,4829	93,30	2.123,24	1.039,76	-51,03	1,81	0,88	-51,27
			93,50		1.113,91	-47,54		0,95	-47,79
			95,00		2.290,49	7,88		1,94	7,40
			99,50		1.622,05	-26,43		2,04	-26,88
09/12/04	2	0,4829	99,60	2.204,82	1.702,60	-22,78	2,79	2,14	-23,26
			99,70		1.779,20	-19,30		2,24	-19,78
			100,00		2.032,25	-7,83		2,56	-8,39
			95,00		2.011,46	-8,27		1,79	-9,04
21/03/05	2	0,4829	95,50	2.192,90	2.541,12	15,88	1,97	2,26	14,92
			96,00		3.137,53	43,08		2,80	41,88
			98,00		6.505,87	196,68		5,80	194,21
			94,50		1.946,50	-33,80		0,92	-34,03
04/04/04	10	0,4052	94,70	2.940,40	2.067,49	-29,69	1,39	0,97	-29,93
			94,80		2.133,04	-27,46		1,01	-27,70
			95,00		7.531,46	156,14		3,55	155,18
			94,00		1.609,32	-16,84		0,93	-17,33
24/0204	6	0,4348	94,30	1.935,31	1.762,62	-8,92	1,13	1,02	-9,42
			94,50		1.863,89	-3,69		1,08	-4,27
			95,00		2.126,63	9,89		1,23	9,24

TABELA 3H Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial direto tempo de pico e vazão de pico, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 450 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	ψ_m (kPa)	θ (cm ³ cm ⁻³)	% de θ	Variáveis do escoamento superficial direto					
				Tempo de pico			Qp (L s ⁻¹)		
				Obs	Cal	Δ (%)	Obs	Cal	Δ (%)
08/02/04	0	0,5601	98,10		585	56,00		7,60	-65,33
			98,16	375	615	64,00		21,92	-0,23
			98,17		615	64,00		26,19	19,49
			98,30		600	60,00		60,31	175,18
11/02/06	0	0,5601	98,04		120	-63,64		4,31	-7,83
			98,07	330	120	-63,64	4,68	8,09	72,88
			98,30		345	4,55		60,73	1197,57
			98,50		300	-9,09		104,79	2139,00
23/02/04	0	0,5601	98,86		255	0,00		54,29	-28,71
			98,87	255	270	5,88	76,16	80,14	5,23
			98,90		285	11,76		211,31	177,47
			99,00		285	11,76		572,19	651,34
15/12/06	2	0,4829	95,50		300	-25,93		70,28	-10,28
			95,60	405	300	-25,93	78,33	75,15	-4,05
			95,70		300	-25,93		81,31	3,81
			100,00		360	-11,11		490,27	525,90
21/02/04	0	0,5601	94,70		555	131,25		157,02	-10,11
			94,72	240	555	131,25	174,69	177,45	1,58
			94,75		555	131,25		220,64	26,30
			94,80		555	131,25		296,23	69,58
28/02/06	2	0,4829	99,30		270	-30,77		89,14	-9,73
			99,40	390	270	-30,77	98,74	93,76	-5,05
			99,50		270	-30,77		96,96	-1,80
			99,60		270	-30,77		101,59	2,88
14/02/04	6	0,4348	99,40		975	8,33		55,52	6,54
			99,50	900	975	8,33	52,11	58,75	12,75
			99,70		975	8,33		63,91	22,66
			99,80		975	8,33		66,36	27,35

TABELA 3H, “Cont.”

			97,00		300	-28,57		22,51	-78,71
18/03/05	2	0,4829	98,00	420	270	-35,71	105,73	45,01	-57,43
			99,50		270	-35,71		107,75	1,91
			100,00		105	-75,00		128,39	21,43
			91,56		225	-16,67		313,04	0,41
08/03/05	0	0,5601	91,57	270	225	-16,67	311,76	326,28	4,66
			91,60		225	-16,67		363,33	16,54
			91,70		240	-11,11		476,24	52,76
			95,00		390	136,36		49,42	-39,46
07/04/04	2	0,4829	96,00	165	420	154,55	81,63	75,30	-7,75
			96,20		405	145,45		84,04	2,95
			96,50		390	136,36		101,50	24,34
			97,50		105	-65,00		59,30	-44,27
05/04/04	2	0,4829	98,20	300	105	-65,00	106,41	76,72	-27,90
			98,70		90	-70,00		89,63	-15,77
			99,10		90	-70,00		106,27	-0,13
			94,00		240	6,67		12,32	-86,20
19/03/04	2	0,4829	97,00	225	150	-33,33	89,27	69,63	-22,00
			97,50		195	-13,33		90,09	0,91
			98,00		195	-13,33		119,12	33,44
			94,30		270	-25,00		72,85	-37,58
09/12/04	0	0,5601	94,38	360	270	-25,00	116,71	114,98	-1,48
			94,50		270	-25,00		181,68	55,67
			95,50		240	-33,33		585,54	401,71
			97,50		165	-47,62		72,04	-51,01
21/03/05	2	0,4829	98,80	315	165	-47,62	147,06	136,11	-7,44
			98,90		165	-47,62		142,50	-3,10
			99,00		165	-47,62		161,65	9,92
			95,00		135	-18,18		125,48	-11,50
04/04/04	6	0,4348	95,40	165	135	-18,18	141,80	144,61	1,98
			95,50		135	-18,18		149,88	5,70
			96,00		150	-9,09		163,13	15,04
			92,50		225	-16,67		94,79	-17,90
24/02/04	2	0,4829	93,00	270	225	-16,67	115,45	115,54	0,07
			93,50		225	-16,67		131,71	14,08
			95,00		270	0,00		172,17	49,13

TABELA 4H Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial escoamento superficial direto e índice C, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 450 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Ψ_m (kPa)	θ (cm ³ cm ⁻³)	% de θ	Variáveis do escoamento superficial direto					
				ESD (m ³)			Índice C		
				Obs	Cal	Δ (%)	Obs	Cal	Δ (%)
08/02/04	0	0,5601	98,10	487,78	137,42	-71,83	1,75	0,49	-71,98
			98,16		335,13	-31,30		1,19	-31,73
			98,17		383,28	-21,42		1,37	-21,90
			98,30		835,77	71,34		2,98	70,33
11/02/06	0	0,5601	98,04	81,82	36,86	-54,96	0,29	0,13	-54,67
			98,07		86,85	6,14		0,31	7,27
			98,30		872,69	966,59		3,11	976,12
			98,50		1598,67	1853,88		5,70	1871,63
23/02/04	0	0,5601	98,86	1.768,32	990,04	-44,01	6,34	3,53	-44,35
			98,87		1.452,62	-17,85		5,18	-18,34
			98,90		3.186,82	80,22		11,36	79,13
			99,00		8.271,31	367,75		29,48	364,94
15/12/06	2	0,4829	95,50	1.971,79	732,47	-62,85	1,52	0,56	-63,10
			95,60		778,93	-60,50		0,60	-60,73
			95,70		830,61	-57,88		0,63	-58,15
			100,00		7.156,48	262,94		5,47	260,73
21/02/04	0	0,5601	94,70	2.672,83	1.297,87	-51,44	3,38	1,63	-51,72
			94,72		1.400,54	-47,60		1,76	-47,87
			94,75		1.647,15	-38,37		2,07	-38,70
			94,80		2.035,18	-23,86		2,56	-24,26
28/02/06	2	0,4829	99,30	1.918,04	984,70	-48,66	1,88	1,00	-46,65
			99,40		1.036,48	-45,96		1,06	-43,88
			99,50		1.095,28	-42,90		1,12	-40,69
			99,60		1.159,07	-39,57		1,18	-37,23
14/02/04	6	0,4348	99,40	1.644,01	1.018,98	-38,02	0,98	0,61	-38,27
			99,50		1.062,79	-35,35		0,63	-35,61
			99,70		1.148,32	-30,15		0,68	-30,41
			99,80		1.194,84	-27,32		0,71	-27,55

TABELA 4H, "Cont."

			97,00		316,70	-80,66		0,32	-80,93
			98,00		509,20	-68,91		0,52	-69,01
18/03/05	2	0,4829	99,50	1.637,72	1.304,54	-20,34	1,68	1,33	-20,86
			100,00		1.758,50	7,37		1,79	6,67
			91,56		4.686,81	186,18		3,86	-25,55
08/03/05	0	0,5601	91,57	6.259,20	4.830,60	-22,82	5,18	3,97	-23,27
			91,60		5.256,01	-16,03		4,32	-16,51
			91,70		6.688,89	6,86		5,50	6,24
			95,00		747,49	-49,84		0,54	-50,14
07/04/04	2	0,4829	96,00	1.490,27	1.322,39	-11,26	1,09	0,96	-11,87
			96,20		1.466,87	-1,57		1,06	-2,21
			96,50		1.750,62	17,47		1,27	16,74
			97,50		688,46	-60,77		0,65	-47,68
05/04/04	2	0,4829	98,20	1.755,04	869,51	-50,46	1,25	0,83	-33,92
			98,70		1.024,87	-41,60		0,97	-22,08
			99,10		1.223,36	-30,29		1,16	-6,96
			94,00		209,70	-90,12		0,18	-90,17
19/03/04	2	0,4829	97,00	2.123,24	710,60	-66,53	1,81	0,60	-66,69
			97,50		942,25	-55,62		0,80	-55,80
			98,00		1.264,53	-40,44		1,07	-40,72
			94,30		1.544,97	-29,93		1,94	-30,36
09/12/04	0	0,5601	94,38	2.204,82	2.102,85	-4,63	2,79	2,65	-5,20
			94,50		3.000,63	36,09		3,77	35,27
			95,50		9.949,65	351,27		12,51	348,49
			97,50		854,50	-61,03		0,76	-61,37
21/03/05	2	0,4829	98,80	2192,90	1801,75	-17,84	1,97	1,61	-18,53
			98,90		1897,30	-13,48		1,69	-14,21
			99,00		1995,07	-9,02		1,78	-9,80
			95,00		1.491,31	-49,28		0,70	-49,50
04/04/04	6	0,4348	95,40	2.940,40	1.671,50	-43,15	1,39	0,79	-43,38
			95,50		1.713,10	-41,74		0,81	-41,94
			96,00		1.937,15	-34,12		0,91	-34,39
			92,50		1.139,18	-41,14		0,66	-41,51
24/02/04	2	0,4829	93,00	1.935,31	1.398,98	-27,71	1,13	0,81	-28,09
			93,50		1.678,21	-13,28		0,97	-13,78
			95,00		2.889,45	49,30		1,67	48,44

TABELA 5H Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial direto tempo de pico e vazão de pico, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 600 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Ψ_m (kPa)	θ (cm ³ cm ⁻³)	% de θ	Variáveis do escoamento superficial direto					
				Tempo de pico			Qp (L s ⁻¹)		
				Obs	Cal	Δ (%)	Obs	Cal	Δ (%)
08/02/04	0	0,5601	98,30		585	56,00		1,12	-94,91
			98,62	375	615	64,00		21,84	-0,33
			98,65		585	56,00	21,92	35,43	61,65
			98,70		600	60,00		57,75	163,48
11/02/06	0	0,5601	98,53		120	-63,64		4,30	-8,11
			98,55	330	120	-63,64	4,68	7,34	56,87
			98,57		345	4,55		8,50	81,58
			98,60		360	9,09		14,59	211,67
23/02/04	0	0,5601	99,10		165	-35,29		2,31	-96,96
			99,15	255	255	0,00		75,82	-0,44
			99,25		285	11,76	76,16	573,62	653,21
			99,50		285	11,76		631,37	729,04
15/12/06	2	0,4829	97,50		300	-25,93		52,57	-32,89
			98,07	405	300	-25,93		79,98	2,10
			98,30		300	-25,93	78,33	90,86	15,99
			98,50		300	-25,93		100,41	28,19
21/02/04	0	0,5601	96,00		540	125,00		131,06	-24,98
			96,04	240	555	131,25		172,89	-1,03
			96,50		555	131,25	174,69	639,82	266,26
			97,00		555	131,25		635,22	263,63
28/02/06	0	0,5601	94,00		210	-46,15		14,12	-85,70
			94,70	390	420	7,69	98,74	93,01	-5,80
			94,72		420	7,69		100,27	1,55
			94,80		390	0,00		155,21	57,18
14/02/04	2	0,4829	95,00		975	8,33		27,03	-48,12
			96,00	900	975	8,33		52,79	1,30
			97,00		855	-5,00	52,11	92,56	77,62
			100,00		975	8,33		317,18	508,69

TABELA 5H, “Cont.”

			94,30		435	3,57		28,94	-72,63
18/03/05	0	0,5601	94,51	420	435	3,57	105,73	103,92	-1,71
			94,56		435	3,57		134,80	27,49
			95,10		375	-10,71		622,10	488,37
			93,60		225	-16,67		217,76	-30,15
08/03/05	0	0,5601	93,67	270	225	-16,67	311,76	320,65	2,85
			93,70		225	-16,67		370,38	18,80
			94,50		240	-11,11		1058,09	239,40
			98,50		390	136,36		68,62	-15,94
07/04/04	2	0,4829	98,70	165	390	136,36	81,63	78,91	-3,32
			98,80		390	136,36		80,28	-1,65
			99,00		390	136,36		90,62	11,02
			94,00		135	-55,00		102,34	14,64
05/04/04	0	0,5601	94,02	300	135	-55,00	89,27	105,53	18,22
			94,05		135	-55,00		109,02	22,13
			95,50		165	-45,00		686,98	669,58
			98,00		180	-20,00		38,49	-63,83
19/03/04	2	0,4829	99,00	225	180	-20,00	106,41	71,36	-32,93
			99,30		165	-26,67		87,95	-17,35
			99,50		150	-33,33		102,40	-3,76
			95,50		135	-62,50		19,83	-83,01
09/12/04	0	0,5601	95,70	360	255	-29,17	116,71	63,54	-45,55
			95,79		270	-25,00		117,42	0,61
			96,00		270	-25,00		270,38	131,67
			93,60		315	0,00		95,27	-35,22
21/03/05	0	0,5601	93,69	315	300	-4,76	147,06	146,07	-0,67
			93,70		300	-4,76		152,26	3,54
			94,00		285	-9,52		376,32	155,90
			99,00		150	-9,09		120,69	-14,89
04/04/04	6	0,4348	99,40	165	135	-18,18	141,80	142,37	0,41
			99,50		135	-18,18		148,32	4,60
			100,00		135	-18,18		170,41	20,18
			96,00		195	-27,78		111,57	-3,36
24/02/04	2	0,4829	96,20	270	195	-27,78	115,45	115,89	0,38
			97,00		210	-22,22		153,78	33,20
			98,50		165	-38,89		245,61	112,74

TABELA 6H Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial escoamento superficial direto e índice C, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 600 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Ψ_m (kPa)	θ (cm ³ cm ⁻³)	% de θ	Variáveis do escoamento superficial direto					
				ESD (m ³)			Índice C		
				Obs	Cal	Δ (%)	Obs	Cal	Δ (%)
08/02/04	0	0,5601	98,30	487,78	23,82	-95,12	1,75	1,12	-36,17
			98,62		341,33	-30,03		1,22	-30,42
			98,65		492,82	1,03		1,76	0,40
			98,70		787,29	61,40		2,81	60,43
11/02/06	0	0,5601	98,53	81,82	36,58	-55,30	0,29	0,13	-55,02
			98,55		77,40	-5,40		0,28	-4,50
			98,57		153,83	88,01		0,55	89,62
			98,60		249,34	204,75		0,89	207,61
23/02/04	0	0,5601	99,10	1.768,32	32,69	-98,15	6,34	0,12	-98,15
			99,15		1.351,84	-23,55		4,82	-24,01
			99,25		8.270,22	367,69		29,47	364,87
			99,50		9.378,37	430,35		33,42	427,16
15/12/06	2	0,4829	97,50	1.971,79	575,62	-70,81	1,52	0,44	-70,96
			98,07		789,18	-59,98		0,60	-60,20
			98,30		902,90	-54,21		0,69	-54,46
			98,50		1.023,14	-48,11		0,78	-48,45
21/02/04	0	0,5601	96,00	2.672,83	1.154,79	-56,80	3,38	1,45	-57,01
			96,04		1.411,22	-47,20		1,78	-47,49
			96,50		4.475,38	67,44		5,63	66,54
			97,00		4.415,19	65,19		5,55	64,32
28/02/06	0	0,5601	94,00	1.918,04	205,02	-89,31	1,88	0,21	-88,88
			94,70		2.295,30	19,67		2,34	24,31
			94,72		2.463,49	28,44		2,51	33,46
			94,80		3.382,80	76,37		3,45	83,24
14/02/04	2	0,4829	95,00	1.644,01	624,30	-62,03	0,98	0,37	-62,14
			96,00		1.038,33	-36,84		0,62	-37,04
			97,00		1.848,30	12,43		1,10	12,04
			100,00		7.620,33	363,52		4,53	361,84

TABELA 6H, “Cont.”

			94,30		649,42	-60,35		0,66	-60,61
18/03/05	0	0,5601	94,51	1.637,72	1.813,90	10,76	1,68	1,85	10,07
			94,56		2.255,00	37,69		2,30	36,83
			95,10		8.999,43	449,51		9,16	446,13
			93,60		3.272,98	-47,71		2,69	-48,01
08/03/05	0	0,5601	93,67	6.259,20	4.536,30	-27,53	5,18	3,73	-27,95
			93,70		5.140,85	-17,87		4,23	-18,35
			94,50		1.6149,84	158,02		13,28	156,51
			98,50		1.279,89	-14,12		0,93	-14,63
07/04/04	2	0,4829	98,70	1.490,27	1.455,65	-2,32	1,09	1,06	-2,94
			98,80		1.541,98	3,47		1,12	2,85
			99,00		1.728,71	16,00		1,25	15,27
			94,00		1.314,72	-25,09		1,25	0,0
05/04/04	0	0,5601	94,02	1.755,04	1.363,72	-22,30	1,25	1,30	3,68
			94,05		1.434,46	-18,27		1,36	9,04
			95,50		9.474,07	439,82		9,00	620,24
			98,00		411,32	-80,63		0,35	-80,72
19/03/04	2	0,4829	99,00	2.123,24	671,59	-68,37	1,81	0,57	-68,51
			99,30		814,97	-61,62		0,69	-61,77
			99,50		908,76	-57,20		0,77	-57,40
			95,50		173,23	-92,14		0,22	-92,19
09/12/04	0	0,5601	95,70	2.204,82	1.316,91	-40,27	2,79	1,66	-40,65
			95,79		2.140,30	-2,93		2,69	-3,51
			96,00		4.409,95	100,01		5,55	98,78
			93,60		1.778,13	-18,91		1,58	-19,59
21/03/05	0	0,5601	93,69	2.192,90	2.451,33	11,78	1,97	2,18	10,86
			93,70		2.537,50	15,71		2,26	14,77
			94,00		5.577,19	154,33		4,97	152,23
			99,00		1.415,57	-51,86		0,67	-52,01
04/04/04	6	0,4348	99,40	2.940,40	1.583,22	-46,16	1,39	0,75	-46,33
			99,50		1.629,38	-44,59		0,77	-44,82
			100,00		1.851,90	-37,02		0,87	-37,27
			96,00		1.254,55	-35,18		0,73	-35,56
24/0204	2	0,4829	96,20	1.935,31	1.382,93	-28,54	1,13	0,80	-28,98
			97,00		1.951,37	0,83		1,13	0,27
			98,50		3.716,61	92,04		2,15	90,93

TABELA 7H Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial direto tempo de pico e vazão de pico, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 1.000 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	ψ_m (kPa)	θ (cm ³ cm ⁻³)	% de θ	Variáveis do escoamento superficial direto					
				Tempo de pico (minutos)			Qp (L s ⁻¹)		
				Obs	Cal	Δ (%)	Obs	Cal	Δ (%)
08/02/04	0	0,5601	99,10		585	56,00		35,43	61,65
			99,17	375	615	64,00		19,87	-9,35
			99,20		600	60,00	21,92	30,90	41,00
			99,90		600	60,00		66,19	202,00
11/02/06	0	0,5601	99,12		120	-63,64		4,98	6,47
			99,13	330	120	-63,64	4,68	7,43	58,84
			99,15		345	4,55		10,13	116,50
			99,20		330	0,00		45,44	870,99
23/02/04	0	0,5601	99,47		165	-35,29		23,44	-69,22
			99,49	255	255	0,00	76,16	74,56	-2,09
			99,50		285	11,76		148,42	94,89
			99,80		285	11,76		631,37	729,04
15/12/06	0	0,5601	91,50		360	-11,11		11,38	-85,47
			95,42	405	450	11,11	78,33	61,17	-21,90
			95,46		450	11,11		79,18	1,08
			95,50		450	11,11		102,39	30,72
21/02/04	0	0,5601	97,00		465	93,75		3,88	-97,78
			97,61	240	540	125,00	174,69	143,48	-17,86
			97,63		555	131,25		182,13	4,26
			98,00		555	131,25		665,55	280,99
28/02/06	0	0,5601	96,80		435	11,54		81,17	-17,80
			96,83	390	420	7,69	98,74	96,35	-2,43
			96,85		405	3,85		115,09	16,56
			97,00		360	-7,69		347,88	252,31
14/02/04	2	0,4829	99,50		855	-5,00		40,39	-22,49
			99,80	900	855	-5,00	52,11	47,97	-7,93
			99,90		855	-5,00		50,10	-3,85
			100,00		855	-5,00		54,68	4,94

TABELA 7H, "Cont."

			96,70		435	3,57		93,42	-11,64
18/03/05	0	0,5601	96,71	420	435	3,57	105,73	105,35	-0,36
			96,74		435	3,57		133,26	26,03
			97,50		345	-17,86		1262,98	1094,49
			95,50		75	-72,22		32,80	-89,48
08/03/05	0	0,5601	96,20	270	225	-16,67	311,76	310,24	-0,49
			96,24		225	-16,67		413,28	32,57
			96,50		240	-11,11		940,34	201,63
			95,00		570	245,45		36,92	-54,77
07/04/04	0	0,5601	95,10	165	555	236,36	81,63	85,09	4,24
			95,50		510	209,09		386,48	373,47
			96,00		465	181,82		975,94	1095,60
			96,00		120	-60,00		81,20	-9,04
05/04/04	0	0,5601	96,40	300	135	-55,00	89,27	110,10	23,34
			96,50		135	-55,00		131,64	47,47
			97,00		165	-45,00		514,86	476,76
			96,00		300	33,33		64,60	-39,29
19/03/04	0	0,5601	96,03	225	300	33,33	106,41	93,30	-12,32
			96,05		300	33,33		111,45	4,73
			96,50		285	26,67		449,16	322,12
			97,00		270	-25,00		5,59	-95,21
09/12/04	0	0,5601	97,46	360	270	-25,00	116,71	92,13	-21,06
			97,48		270	-25,00		122,22	4,72
			97,50		270	-25,00		152,84	30,96
			96,20		300	-4,76		138,31	-5,95
21/03/05	0	0,5601	96,21	315	300	-4,76	147,06	146,26	-0,54
			96,30		285	-9,52		236,32	60,70
			96,40		270	-14,29		363,20	146,98
			95,50		120	-27,27		133,39	-5,93
04/04/04	2	0,4829	95,70	165	120	-27,27	141,80	139,80	-1,41
			95,80		120	-27,27		141,70	-0,07
			100,00		135	-18,18		389,22	174,49
			98,50		195	-27,78		119,73	3,71
24/02/04	2	0,4829	99,50	270	165	-38,89	115,45	99,13	-14,13
			99,80		195	-27,78		113,24	-1,91
			99,90		195	-27,78		119,73	3,71

TABELA 8H Sensibilidade das variáveis do escoamento superficial escoamento superficial direto e índice C, em função da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação para a camada de 1000 mm de espessura, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região Alto Rio Grande, MG.

Evento	Ψ_m (kPa)	θ (cm ³ cm ⁻³)	% de θ	Variáveis do escoamento superficial direto					
				ESD (m ³)			Índice C		
				Obs	Cal	Δ (%)	Obs	Cal	Δ (%)
08/02/04	0	0,5601	99,10		492,82	1,03		1,76	0,40
			99,17	487,78	320,80	-34,23	1,75	1,14	-34,65
			99,20		438,36	-10,13		1,56	-10,69
			99,90		910,25	86,61		3,24	85,48
11/02/06	0	0,5601	99,12		39,84	-51,31		0,14	-50,87
			99,13	81,82	76,61	-6,37	0,29	0,27	-5,54
			99,15		181,10	121,34		0,65	123,18
			99,20		646,45	690,08		2,30	697,23
23/02/04	0	0,5601	99,47		86,09	-95,13		0,31	-95,16
			99,49	1.768,32	1.307,46	-26,06	6,34	4,66	-26,51
			99,50		2.538,41	43,55		9,05	42,68
			99,80		9.378,37	430,35		33,42	427,16
15/12/06	0	0,5601	91,50		217,53	-88,97		0,17	-89,04
			95,42	1.971,79	1.371,55	-30,44	1,52	1,05	-30,89
			95,46		1.685,59	-14,51		1,29	-15,05
			95,50		2.009,13	1,89		1,53	1,25
21/02/04	0	0,5601	97,00		71,02	-97,34		0,09	-97,37
			97,61	2.672,83	1.254,16	-53,08	3,38	1,58	-53,31
			97,63		1.480,77	-44,60		1,86	-44,88
			98,00		4.653,82	74,12		5,85	73,20
28/02/06	0	0,5601	96,80		2.002,30	4,39		2,04	8,46
			96,83	1.918,04	2.404,28	25,35	1,88	2,45	30,21
			96,85		2.762,26	44,02		2,81	49,63
			97,00		5.957,61	210,61		6,07	222,71
14/02/04	2	0,4829	99,50		931,40	-43,35		0,55	-43,88
			99,80	1.644,01	1.105,35	-32,77	0,98	0,66	-33,06
			99,90		1.163,75	-29,21		0,69	-29,49
			100,00		1.231,35	-25,10		0,73	-25,41

TABELA 8H, “Cont.”

			96,70		1.716,59	4,82		1,75	4,17
18/03/05	0	0,5601	96,71	1.637,72	1.878,07	14,68	1,68	1,91	13,95
			96,74		2.285,73	39,57		2,33	38,68
			97,50		18.193,09	1.010,88		18,53	1003,99
			95,50		448,78	-92,83		0,37	-92,87
08/03/05	0	0,5601	96,20	6.259,20	4.335,71	-30,73	5,18	3,57	-31,13
			96,24		5.634,44	-9,98		4,63	-10,51
			96,50		13.552,46	116,52		11,15	115,26
			95,00		547,15	-63,29		0,40	-63,48
07/04/04	0	0,5601	95,10	1.490,27	900,09	-39,60	1,09	0,65	-40,02
			95,50		4.449,89	198,60		3,23	196,69
			96,00		12.612,27	746,31		9,14	741,03
			96,00		974,02	-44,50		0,93	-25,92
05/04/04	0	0,5601	96,40	1.755,04	1.404,49	-19,97	1,25	1,34	6,80
			96,50		1.787,49	1,85		1,70	35,92
			97,00		7.192,57	309,82		6,84	446,80
			96,00		1.208,31	-43,09		1,03	-43,37
19/03/04	0	0,5601	96,03	2.123,24	1.581,17	-25,53	1,81	1,34	-25,86
			96,05		1.808,40	-14,83		1,54	-15,19
			96,50		6.484,48	205,40		5,50	203,98
			97,00		125,36	-94,31		0,16	-94,34
09/12/04	0	0,5601	97,46	2.204,82	1.912,74	-13,25	2,79	2,41	-13,76
			97,48		2.215,66	0,49		2,79	-0,11
			97,50		2.545,22	15,44		3,20	14,73
			96,20		2.506,36	14,29		2,23	13,35
21/03/05	0	0,5601	96,21	2.192,90	2.617,62	19,37	1,97	2,33	18,38
			96,30		3.926,96	79,08		3,50	77,61
			96,40		5.655,61	157,91		5,04	155,79
			95,50		1.365,79	-53,55		0,64	-53,74
04/04/04	2	0,4829	95,70	2.940,40	1.410,48	-52,03	1,39	0,66	-52,23
			95,80		1.430,46	-51,35		0,67	-51,51
			100,00		4.144,66	40,96		1,95	40,43
			98,50		1.365,90	-29,42		0,79	-29,87
24/0204	2	0,4829	99,50	1.935,31	1.163,00	-39,91	1,13	0,67	-40,27
			99,80		1.308,90	-32,37		0,76	-32,80
			99,90		1.365,90	-29,42		0,79	-29,87