

MATEUS DA MOTA SALVADOR

IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO PIRANGA

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, para obtenção do  
título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T  
S182i  
2014  
Salvador, Mateus da Mota, 1989-  
Identificação e avaliação de eventos extremos na bacia  
hidrográfica do Rio Piranga / Mateus da Mota Salvador. –  
Viçosa, MG, 2014.  
xiii, 60 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Maria Lúcia Calijuri.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Deslizamentos (Geologia). 2. Inundações. 3. Avaliação  
de riscos (Geologia). 4. Análise multivariada. 5. Cobertura dos  
solos. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.151363

MATEUS DA MOTA SALVADOR

IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO PIRANGA

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, para obtenção do  
título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 20 de fevereiro de 2014.

---

Dario Cardoso de Lima

---

Maria do Carmo Calijuri

---

Leonardo Campos de Assis

---

Maria Lúcia Calijuri  
(Orientadora)

*Aos meus pais, a quem devo a vida  
e todas as conquistas e realizações.*

*“A ditadura perfeita terá as aparências da democracia, uma prisão sem muros na qual os prisioneiros não sonharão sequer com a fuga. Um sistema de escravatura onde, graças ao consumo e ao divertimento, os escravos terão amor à sua escravidão”.*

Aldous Huxley

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Evandro e Francisca, e aos meus irmãos, Marília e Ricardo, por toda dedicação, apoio e confiança depositada. Fizeram e continuarão fazendo a diferença em todas as minhas conquistas e realizações.

À Universidade Federal de Viçosa e à cidade de Viçosa, por me proporcionarem formação acadêmica de alta qualidade e crescimento pessoal.

À professora Maria Lúcia Calijuri, pela confiança, parceria e pelas importantes orientações, sem as quais a realização deste trabalho não seria possível.

À Thamires, pelo carinho, compreensão, companheirismo e apoio incondicional.

Aos companheiros de laboratório nPA: Léo, Aníbal, Eduardo, Paula, Mariana, Rodrigo, Everton, Isabella, Marcos, Marcus, Luna, Mauro, Gabriel, Lucas, Ivan, Chico e Teruo. Pelo apoio e companheirismo durante os trabalhos e pelos tantos momentos agradáveis proporcionados.

Aos meus amigos da Eng. Ambiental 07 e a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Muito obrigado!

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                            |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>LISTA DE SIGLAS .....</b>                                                                                                                               | <b>vii</b>  |
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>                                                                                                                              | <b>ix</b>   |
| <b>LISTA DE TABELAS.....</b>                                                                                                                               | <b>xi</b>   |
| <b>RESUMO .....</b>                                                                                                                                        | <b>xii</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                                                                                                      | <b>xiii</b> |
| <b>Introdução Geral .....</b>                                                                                                                              | <b>1</b>    |
| <b>Artigo 1. Identificação de áreas suscetíveis a deslizamentos de terra utilizando experimentos de campo e análise multicritério em ambiente SIG.....</b> | <b>2</b>    |
| Resumo .....                                                                                                                                               | 2           |
| 1 Introdução .....                                                                                                                                         | 2           |
| 2 Metodologia.....                                                                                                                                         | 4           |
| 2.1 Área de estudo .....                                                                                                                                   | 4           |
| 2.2 Dados .....                                                                                                                                            | 6           |
| 2.3 Experimento de campo.....                                                                                                                              | 10          |
| 2.3.1 Parcelas experimentais .....                                                                                                                         | 10          |
| 2.3.2 Quantificação do escoamento superficial.....                                                                                                         | 13          |
| 2.3.3 Modelagem do escoamento superficial .....                                                                                                            | 13          |
| 2.4 Definição da zona de análise.....                                                                                                                      | 16          |
| 2.5 Representação esquemática dos processos .....                                                                                                          | 16          |
| 2.6 Análise MultiCritérios .....                                                                                                                           | 17          |
| 3 Resultados e discussões.....                                                                                                                             | 21          |
| 4 Conclusões .....                                                                                                                                         | 23          |
| Referências Bibliográficas .....                                                                                                                           | 25          |
| Material Suplementar A .....                                                                                                                               | 28          |

|                                                                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Artigo 2. Avaliação do efeito das mudanças de cobertura do solo no comportamento hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga. ....</b> | <b>30</b> |
| Resumo .....                                                                                                                                   | 30        |
| 1 Introdução .....                                                                                                                             | 30        |
| 2 Metodologia.....                                                                                                                             | 32        |
| 2.1 Área de estudo .....                                                                                                                       | 32        |
| 2.2 Dados .....                                                                                                                                | 33        |
| 2.3 Eventos de Precipitação .....                                                                                                              | 37        |
| 2.4 Cobertura do solo .....                                                                                                                    | 37        |
| 2.5 Simulação Hidrológica – Modelo HEC-HMS.....                                                                                                | 38        |
| 2.5.1 Sub-bacias de contribuição .....                                                                                                         | 39        |
| 2.5.2 Representação dos processos hidrológicos.....                                                                                            | 40        |
| 2.5.3 Precipitação .....                                                                                                                       | 43        |
| 2.5.4 Calibração e validação .....                                                                                                             | 43        |
| 2.5.5 Simulação de cenários .....                                                                                                              | 44        |
| 3 Resultados e discussões.....                                                                                                                 | 45        |
| 3.1 Mapas de cobertura do solo .....                                                                                                           | 45        |
| 3.2 Simulação Hidrológica - Modelo HEC-HMS .....                                                                                               | 48        |
| 3.2.1 Calibração e validação .....                                                                                                             | 48        |
| 3.2.2 Simulação de cenários .....                                                                                                              | 53        |
| 4 Conclusões .....                                                                                                                             | 54        |
| Referências Bibliográficas .....                                                                                                               | 56        |
| <b>Conclusões Gerais .....</b>                                                                                                                 | <b>59</b> |



## LISTA DE SIGLAS

AMC - *Antecedent Moisture Condition*

AHP - *Analytical Hierarchy Process*

ANA - Agência Nacional de Águas

C - Coeficiente de Escoamento Superficial

CN - Número da Curva

CXbd - Cambissolo Háplico Tb distrófico

HEC - *Hydrologic Engineering Center*

HMS - *Hydrologic Modeling System*

Ia - Abstrações Iniciais

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW - *Inverse Distance Weighted*

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LCM - *Land Change Modeler*

LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico

LVd - Latosso Vermelho distrófico

MCE - Avaliação Multicritérios

MDE - Modelo digital de Elevação

MDEHC - Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

NLS - *Nonlinear Least Squares*

NSE - Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe

P - Precipitação

PDI - Processamento Digital de Imagens

PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico

PVd - Argissolo Vermelho distrófico

Q - Vazão

R<sup>2</sup> - Coeficiente de Determinação

REM - Radiação eletromagnética

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

Tc - Tempo de Concentração

TM - *Thematic Mapper*

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Localização das Bacias Hidrográficas do Rio Piranga e do Rio Doce no Estado de Minas Gerais e no Brasil, além dos locais de experimentação. .... | 5  |
| Figura 2. Deslizamentos de terra comuns na região, em propriedade agrícola (a); e próximo a uma rodovia pavimentada (b). ....                              | 6  |
| Figura 3. Modelo Digital de Elevação da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga..                                                                                | 7  |
| Figura 4. Modelo Digital de Declividade da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga. ....                                                                         | 8  |
| Figura 5. Registro fotográfico da estrutura da parcela experimental instalada em campo. ....                                                               | 11 |
| Figura 6. Fluxograma resumo dos processos empregados. ....                                                                                                 | 17 |
| Figura 7. Mapa de cobertura do solo (a); Mapa de suscetibilidade a deslizamentos com base nas classes de cobertura do solo (b). ....                       | 19 |
| Figura 8. Mapa de solos (a); Mapa de suscetibilidade a deslizamentos com base nas categorias de solo (b). ....                                             | 19 |
| Figura 9. Mapa pluviométrico (mm year-1) (a); Mapa de suscetibilidade a deslizamentos com base na pluviometria (b). ....                                   | 20 |
| Figura 10. Modelo digital de escoamento superficial (a); Mapa de suscetibilidade a deslizamentos com base no escoamento superficial (b). ...               | 20 |
| Figura 11. Mapa booleano de restrições e zona de análise. ....                                                                                             | 21 |
| Figura 12. Mapa de suscetibilidade a deslizamentos de terra. ....                                                                                          | 22 |
| Figura 13. Detalhe do mapa de suscetibilidade a deslizamentos de terra. ....                                                                               | 23 |
| Figura 14. Algoritmo em SIG para obtenção de topos de morro a partir do MDE. ....                                                                          | 28 |
| Figura 15. Localização das Bacias Hidrográficas do Rio Piranga e do Rio Doce no Estado de Minas Gerais e no Brasil. ....                                   | 33 |
| Figura 16. MDEHC da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga. ....                                                                                                | 35 |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 17. Mapa de solos da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga.....                                                        | 37 |
| Figura 18. Modelo físico da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga no software HEC-HMS. ....                                   | 40 |
| Figura 19. Mapa de cobertura do solo do ano de 1985. ....                                                                 | 45 |
| Figura 20. Mapa de cobertura do solo do ano de 1996. ....                                                                 | 46 |
| Figura 21. Mapa de cobertura do solo do ano de 2008. ....                                                                 | 46 |
| Figura 22. Ganhos e perdas de área (Km <sup>2</sup> ) para cada classe de cobertura entre 1985 e 1996.....                | 47 |
| Figura 23. Ganhos e perdas de área (Km <sup>2</sup> ) para cada classe de cobertura entre 1996 e 2008.....                | 48 |
| Figura 24. Contribuição de área (Km <sup>2</sup> ) de cada classe de cobertura para a agricultura entre 1996 e 2008. .... | 48 |
| Figura 25. Resultado do processo de calibração do modelo com o evento de chuva de 1985. ....                              | 50 |
| Figura 26. Resultados dos processos de validação do modelo com os eventos de chuva dos anos de 1991 (a) e 2005 (b).....   | 51 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Características das parcelas experimentais. ....                                                      | 15 |
| Tabela 2. Estatística resumo do modelo ajustado. ....                                                           | 15 |
| Tabela 3. Critérios usados na análise, seus respectivos pesos e mapas de suscetibilidade aos deslizamentos..... | 18 |
| Tabela 4. Códigos e nomes das estações pluviométricas e fluviométricas. .                                       | 34 |
| Tabela 5. Parâmetros do Método de Propagação de cheias em canais.....                                           | 42 |
| Tabela 6. Porcentagens referentes aos tipos de cobertura do solo em 1985, 1996 e 2008.....                      | 47 |
| Tabela 7. Áreas de drenagem, CN e parâmetros calibrados referentes às sub-bacias analisadas. ....               | 49 |
| Tabela 8. Vazões e tempos de pico simulados e observados nas etapas de calibração e validação. ....             | 52 |
| Tabela 9. Vazões de pico simuladas e observadas para cada cenário avaliado. ....                                | 53 |

## RESUMO

SALVADOR, Mateus da Mota, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2014. **Identificação e avaliação de eventos extremos na Bacia Hidrográfica do Rio Piranga**. Orientador: Maria Lúcia Calijuri. Coorientadores: Mônica de Abreu Azevedo e Eduardo Antonio Gomes Marques.

Enchentes e deslizamentos de terra estão entre os desastres naturais mais frequentes e que causam mais prejuízos econômicos e sociais no mundo. No Brasil, uma região crítica é a Bacia Hidrográfica do Rio Piranga (BHRP), localizada no Estado de Minas Gerais e que abriga a nascente do Rio Doce. O cenário deve-se principalmente à ocorrência de eventos de precipitação extremos associados à falta de planejamento e manejo no uso do solo e à ocupação acelerada e inadequada. Diante do exposto, é importante a busca por ferramentas que ajudem na interpretação de informações referentes à dinâmica dos recursos ambientais e que possam identificar, compreender e prever o impacto de alterações provocadas ao meio ambiente. Nesse sentido, desenvolveu-se este trabalho na forma de dois estudos envolvendo a ocorrência de eventos extremos na BHRP. No primeiro, apresenta-se metodologia para a identificação de zonas de suscetibilidade a deslizamentos de terra com apoio de experimentos de campo e análise estratégica de decisão por avaliação multicritérios. Já no segundo estudo, o objetivo foi calibrar e validar modelo hidrológico para avaliar o efeito das mudanças de cobertura do solo no comportamento hidrológico da bacia frente a grandes cheias. Conclui-se que a metodologia apresentada permitiu a identificação de áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de terra com boa concordância em relação às condições observadas em campo. O modelo hidrológico foi capaz de representar com boa concordância o comportamento hidrológico da bacia e a simulação de cenários indicou um aumento na tendência de ocorrência de enchentes devido às mudanças na cobertura do solo. Espera-se que os resultados deste estudo permitam aprimorar a compreensão sobre os deslizamentos e enchentes e que possam contribuir como ferramenta para gestão de riscos na BHRP.

## ABSTRACT

SALVADOR, Mateus da Mota, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2014. **Identification and evaluation of extreme events in Piranga River Watershed.** Adviser: Maria Lúcia Calijuri. Co-advisers: Mônica de Abreu Azevedo and Eduardo Antonio Gomes Marques.

Floods and landslides are among the natural disasters most frequent that cause more economic and social losses in the world. In Brazil, a critical place is the Piranga River Watershed (PRW), located in Minas Gerais State and which comprises the Doce River headwaters. The setting is mainly due to the occurrence of extreme rainfall events associated with lack of planning and management of soil and inadequate occupation. Given the above, it is important to look after tools that help in interpreting information regarding the environment dynamics and also, tools that can identify, understand and predict the impact of changes caused to the environment. Therefore, this study was developed in two parts, involving the occurrence of extreme events in the PRW. In the first was presented a methodology for landslide-susceptible areas identification with the support of field experiments and strategic decision analysis based on multi-criteria evaluation. In the second part, the objective was to calibrate and validate a hydrological model in order to assess the effect land cover changes on the watershed hydrology opposite major floods. It can be concluded that the proposed methodology allowed the identification of landslide-susceptible areas in good agreement with the conditions observed in the field. The hydrological model was able to represent with good precision the watershed hydrological behavior and the scenarios simulation indicated an increase trend of floods occurrence due to changes in land cover. It is expected that this study enables the improvement of landslides and floods understanding and also, that it contributes as a tool for risk management in the PRW.

## **Introdução Geral**

É cada vez mais frequente a ocorrência de desastres naturais como enchentes e deslizamentos de terra, que causam inúmeros prejuízos econômicos e sociais. No Brasil, uma região crítica que constantemente sofre com estes problemas é a Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Esta bacia é de grande importância econômica para o país, uma vez que nela estão localizados empreendimentos industriais de grande porte, que desempenham papel significativo nas exportações brasileiras de minério de ferro, aço e celulose. Entretanto, o Rio Doce e seus afluentes sofrem atualmente com uma série de impactos ambientais negativos. A Bacia Hidrográfica do Rio Piranga, que se encontra na zona de cabeceira e abriga a nascente do Rio Doce, é frequentemente prejudicada pelas enchentes, principalmente na região onde se localiza a sua foz, onde a situação é mais grave devido à maior concentração de fluxo. Destaca-se também que os deslizamentos de terra são comuns na maior parte da bacia e inutilizam áreas usadas para atividades produtivas, provocam a interdição de estradas e causam riscos à população. Além disso, a perda de solo geralmente leva ao assoreamento de rios, o que diminui a capacidade de transporte destes e consequentemente aumenta os riscos de enchentes. Neste cenário, ocasionado principalmente por eventos de precipitação extremos associados à falta de planejamento e manejo no uso do solo e à ocupação acelerada e inadequada, é crescente a demanda por instrumentos de suporte à gestão. Diante desse panorama, a modelagem surge como ferramenta para a interpretação de informações referentes à dinâmica dos recursos ambientais, capaz de identificar, compreender e prever o impacto de alterações naturais e antrópicas provocadas ao meio ambiente.



# **Artigo 1. Identificação de áreas suscetíveis a deslizamentos de terra utilizando experimentos de campo e análise multicritério em ambiente SIG**

## **Resumo**

O objetivo deste trabalho foi identificar zonas de suscetibilidade a deslizamentos de terra com apoio de experimentos de campo aliados a análise estratégica de decisão por avaliação multicritérios (MCE) em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica). Devido à forte correlação entre os processos de infiltração da água no solo e movimento de massa e, da relação direta do escoamento superficial com o primeiro, foram conduzidos experimentos de campo para caracterizar o escoamento superficial. Essas informações experimentais foram espacializadas e utilizadas como um dos critérios, dos quais também fizeram parte: cobertura do solo, tipos de solo e pluviometria. O modelo digital resultante apresentou faixas de muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta suscetibilidade a deslizamentos. As áreas críticas (de alta e muito alta suscetibilidade) corresponderam a 26,2% das áreas de encostas analisadas na bacia, evidenciando a relevância do problema na região de cabeceira, notadamente na porção sudoeste. Espera-se que esta metodologia seja utilizada como ferramenta de gestão pública para identificação das zonas de alta suscetibilidade desses eventos, portanto, de grande risco às populações.

## **1 Introdução**

Deslizamentos de terra estão entre os riscos naturais que mais causam danos em regiões montanhosas. O estudo desses fenômenos tem atraído a atenção mundial, principalmente devido aos altos impactos socioeconômicos associados. Os deslizamentos de terra representaram cerca de 56% dos movimentos de massa ocorridos no mundo entre Apr./1903 e Jan./2013 (EM-DAT, 2013). De acordo com Schuster (1996) e Ercanoglu e Gokceoglu

(2004), a tendência é de que o problema aumente no futuro devido ao crescimento não planejado da urbanização, ao desmatamento contínuo e ao aumento da precipitação causado pelas mudanças nos padrões climáticos.

Processos geomorfológicos como erosão e escoamento superficial, que tem influência direta nos deslizamentos, tem-se mostrado cada vez mais relevantes em zonas equatoriais (Pradhan 2010; Lim e Lee 1992). Esses eventos são potencializados pelas altas intensidades das chuvas tropicais dentro de curtos períodos de tempo, o que favorece a desagregação do solo, enfraquecimento de encostas e movimentos de massas (Brunsden e Prior 1984; Lim e Lee 1992). Além disso, o desmatamento em áreas montanhosas, especialmente em declividades superiores a 20°, também pode ser um catalisador de erosão e deslizamentos de terra. (Chan 1998a, b). Diante disso, é crescente a necessidade de métodos que possam orientar gestores na escolha das melhores estratégias para redução dos impactos das atividades de uso da terra na áreas de encostas vulneráveis (Gorsevski et al. 2006). O mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamentos de terra é importante para a tomada de decisão relacionada à gestão territorial.

Como o deslizamento de terra não está condicionado a um único fator que pode caracterizá-lo com precisão, um conjunto de parâmetros deve ser analisada de forma integrada. Para isso, recentemente a informação geográfica com base em sistema de análise de decisão multi-critérios tem sido utilizada (Castellanos Abella e Van Westen 2007; Armas 2011; Akgun 2012; Neuhauser et al. 2012). A Análise multicritério em ambiente SIG pode ser definida como uma ferramenta matemática que permite a comparação de diferentes alternativas ou cenários de acordo com vários critérios, muitas vezes conflitantes, a fim de orientar o tomador de decisão em direção a uma escolha ponderada (Roy, 1996).

Nesse sentido, apresenta-se uma metodologia para identificação de zonas de suscetibilidade a deslizamentos de terra com apoio de experimentos de campo aliados a análise estratégica de decisão por avaliação multicritérios.

## **2 Metodologia**

### **2.1 Área de estudo**

Este estudo foi conduzido na região da nascente do Rio Doce, especificamente na Bacia Hidrográfica do Rio Piranga, que abriga população aproximada de 300000 habitantes e localiza-se no Estado de Minas Gerais, região sudeste do Brasil (Fig. 1). Abrange uma área de cerca de 6.600 km<sup>2</sup> e suas coordenadas geográficas estão entre 20°16' e 21°11' de latitude sul e 42°42' e 43°49' de longitude oeste. O relevo é fortemente ondulado e a altitude varia entre 324 e 1452 m.

De acordo com Camargo (2012) a principal unidade geomorfológica é o planalto campo das vertentes, que é caracterizado pelas colinas convexo-côncavas e representa aproximadamente 75% da bacia. Segundo o IGAM (2007), a maior parte dos solos apresenta baixa fertilidade, o que, associada a declividades acentuadas de encostas, favoreceu o desenvolvimento de atividades econômicas com baixo valor agregado. As principais classes de cobertura do solo são as pastagens, que subsidiam atividade pecuária, e áreas de cultivo agrícola com ocupação por lavouras temporárias e permanentes.

Segundo o Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia (Consórcio ECOPLAN-LUME, 2010), as pastagens apresentam alto nível de degradação devido ao modelo de uso e ocupação da região, onde não é comum a aplicação de tecnologias de conservação do solo.

Também há consideráveis áreas plantadas com eucalipto, as quais, em conjunto com as demais caracterizam exploração antropogênica da área. A cobertura vegetal natural da região é definida por remanescentes florestais. Apesar de haver 28 municípios completamente inseridos na bacia, a população da região é predominantemente rural, sendo que as áreas urbanas representam menos de 1% da área total. O clima, segundo a classificação de Köppen-Geiger, enquadra-se como tropical de altitude com chuvas durante o verão e verões frescos. A temperatura média anual varia em torno de 18°C e a precipitação média anual é de 1.400 mm.

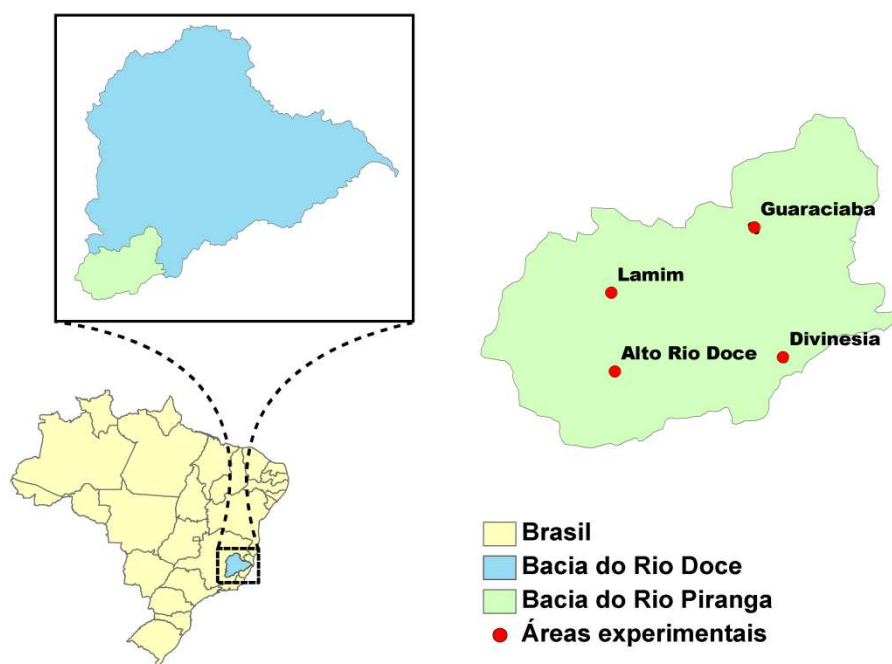


Figura 1. Localização das Bacias Hidrográficas do Rio Piranga e do Rio Doce no Estado de Minas Gerais e no Brasil, além dos locais de experimentação.

Deslizamentos de terra são um problema frequente na bacia. Eles inutilizam áreas usadas para atividades produtivas (agricultura e pecuária), provocam a interdição de estradas, causam perda de solos e assoreamento de rios além de riscos à população. Esses deslizamentos, frequentes na região, ocorrem em condições semelhantes às ilustradas nas Fig. 2a e 2b. Destaca-se a presença de cobertura vegetal densa nos topos de morro, o que favorece a infiltração da água no solo, seguida por encostas altamente declivosas cobertas por pastagens, que na região apresentam grande propensão ao escoamento superficial.



Figura 2. Deslizamentos de terra comuns na região, em propriedade agrícola (a); e próximo a uma rodovia pavimentada (b).

## 2.2 Dados

*Modelo digital de elevação (MDE)*: gerado a partir dos planos de informação referentes à hidrografia e altimetria, esta última discriminada em pontos cotados e curvas de nível, obtidas através das cartas topográficas vetoriais do mapeamento sistemático e disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A escala dos mapas digitais é de 1:50.000 e as curvas de nível apresentam equidistância vertical de 20 m. Foram necessárias 18 cartas para abranger toda a área da bacia. Em seguida realizou-se o pré-processamento dos dados digitais obtidos e verificação da consistência de toda a base de dados. As curvas de nível foram editadas manualmente em conformidade com a hidrografia mapeada. Esta última, por sua vez, foi orientada no sentido da direção de escoamento. Após a etapa de edição, produziu-se o MDE com resolução de 15 m, que pode ser observado na Fig. 3.

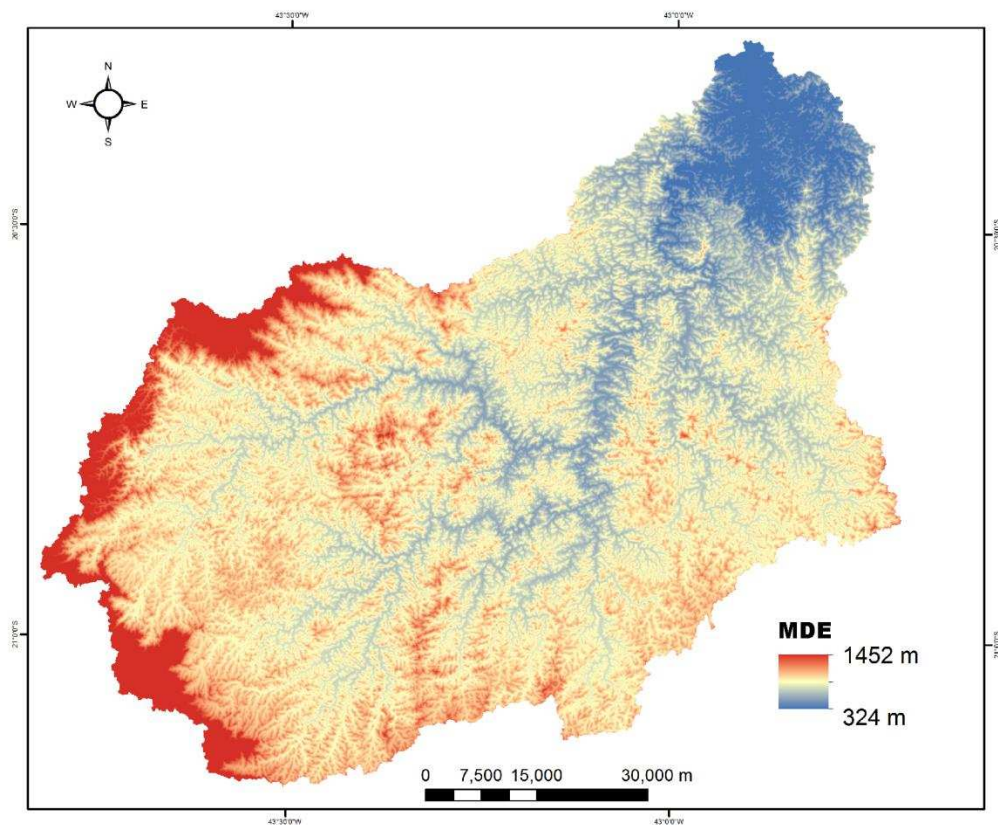


Figura 3. Modelo Digital de Elevação da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga.

*Modelo Digital de Declividade:* a declividade do terreno foi derivada do MDE e seus valores expressos em percentagem. As declividades foram divididas em 6 intervalos (0-3%, 3-8%, 8-13%, 13-20%, 20-45% e >45%), de acordo com critério adotado por Embrapa (1999), conforme pode ser observado na Fig. 4.

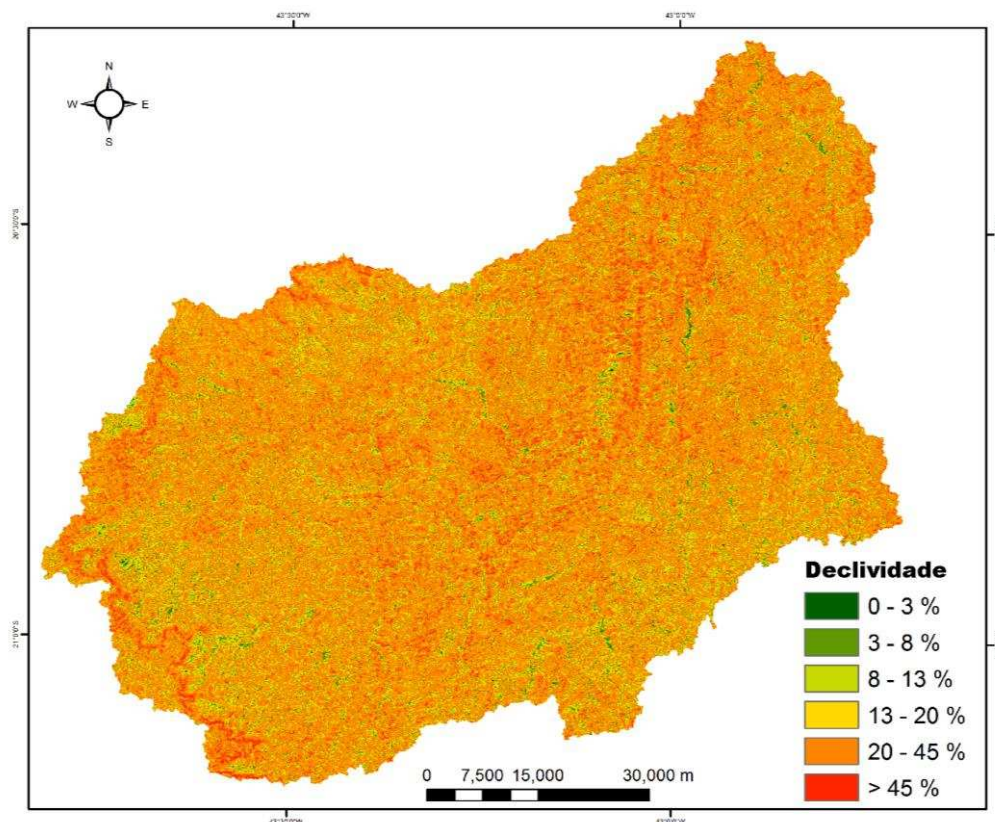


Figura 4. Modelo Digital de Declividade da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga.

*Cobertura do solo:* utilizou-se mapa de cobertura do solo produzido por Assis (2012) na escala aproximada de 1:150.000. O mapa, mostrado na Fig.7a, foi obtido através de processo de classificação automática de uma imagem Landsat 5, sensor Thematic Mapper (TM), de agosto de 2010. Segundo Assis (2012), constatou-se em visitas a campo que a cobertura do solo é predominantemente caracterizada pelas classes: mata secundária, café, eucalipto, pastagem e área agrícola.

*Tipos de solo:* o mapa de solos apresentado na Fig. 8a foi um recorte do original “Levantamento de solos e aptidão agrícola da porção mineira da bacia do rio Doce” publicado por Fernandes Filho et al. (2010) na escala de 1:650.000. Todas as tipologias de solo que ocorrem na região apresentam horizonte A moderado, fase floresta tropical subperenifólia e suas especificidades quanto ao grupo predominante são:

- Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) típico de textura argilosa com relevo forte ondulado (de 35% a 50%) no eixo Nordeste-



Sudoeste (NE-SO) e ondulado/forte ondulado (de 50 a 60%) na região da nascente do alto piranga, Sudoeste (SO), e de textura argilosa/muito argilosa com relevo forte ondulado/montanhoso na porção Sudeste (SE);

- Latosso Vermelho distrófico (LVd) típico de textura muito argilosa com relevo forte ondulado e forte ondulado/montanhoso em cerca de 30% e 35% respectivamente, ambos ocorrem a Noroeste (NO) na região da nascente;
- Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (PVAe) típico, de textura argilosa e relevo ondulado representando 40% e ocorrência bem definida na região do baixo Piranga próximo à sua foz, à Norte/Nordeste (N-NE);
- Argissolo Vermelho distrófico (PVd) típico de textura argilosa e relevo forte ondulado em cerca de 50%, aparece ao Norte (N) da região do alto da bacia hidrográfica;
- Cambissolo Háplico Tb distrófico (CXbd) típico, de textura média e relevo montanhoso (50%), ocorre a extremo Sudoeste na região da nascente.

*Pluviometria regional:* a partir de dados das séries históricas de 15 estações pluviométricas de um período de 35 anos, de 1975 a 2009, localizadas na área de estudo, calculou-se a precipitação pluvial média anual para cada estação. Esses quantitativos foram utilizados para espacialização da chuva através do método de interpolação *Inverse Distance Weighted* (IDW) apresentado na Eq. (1) que produziu um mapa que representa a pluviometria na região.

$$\hat{z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i) \cdot d_{ij}^{-r}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-r}} \quad (1)$$

em que  $x_i$  são os pontos amostrados,  $d$  a distância até o ponto e  $r$  a potência.

A partir do mapa de distribuição espacial da chuva caracterizou-se o regime pluviométrico médio anual na bacia conforme é apresentado na Fig. 9a.



## **2.3 Experimento de campo**

Devido à forte correlação entre os processos de infiltração da água no solo e movimentos de massa e, da relação direta entre o escoamento superficial com o primeiro, foram conduzidos experimentos de campo para caracterizar o escoamento superficial na área de estudo.

Os experimentos foram projetados para operar ininterruptamente em condições naturais de campo, coletando informações que representassem condições reais de escoamento e precipitação.

Para a mensuração do escoamento superficial, foram instaladas 16 parcelas experimentais distribuídas em quatro municípios da bacia hidrográfica: Guaraciaba, Divinésia, Alto Rio Doce e Lamim (Fig. 1). A distribuição das parcelas nesses locais teve o objetivo de abranger os principais tipos de solo, declividades e coberturas do solo observados nessa área.

### **2.3.1 Parcelas experimentais**

As parcelas experimentais foram formadas por um conjunto de estruturas metálicas e equipamentos hidrometeorológicos. As estruturas foram construídas artesanalmente e instaladas em campo, delimitando uma área de aproximadamente 40 m<sup>2</sup>, e com direção predominante do escoamento superficial no sentido do comprimento das mesmas. O conjunto de estruturas metálicas é formado por uma área para captação do escoamento superficial, uma caixa coletora de sedimentos e um vertedor para medição do escoamento. Os equipamentos hidrometeorológicos utilizados foram pluviógrafos e linígrafos. Na Fig. 5 observa-se a configuração de uma parcela experimental montada em campo, com a descrição dos seus elementos.



Figura 5. Registro fotográfico da estrutura da parcela experimental instalada em campo.

As estruturas foram construídas em chapa galvanizada com espessura de 1 mm. A unidade tem comprimento e largura interna de 11 e 3,5 m, respectivamente. Para facilitar o transporte das peças para os locais de instalação em campo, estas foram fabricadas com encaixes para a montagem em campo. O comprimento máximo de cada peça não foi superior a 3,5 m.

A caixa coletora de sedimentos é metálica com medidas de 50 cm x 50 cm x 40 cm. No seu interior, observa-se a existência de um anel metálico com 20 cm de diâmetro, a 20 cm de altura, para a fixação de uma manta geotêxtil. A manta tem a função de reter as partículas de solo transportadas pelo escoamento superficial durante a ocorrência das chuvas. Isso evita a passagem dessas partículas para o vertedor, o que causaria prejuízos à mensuração do escoamento. Na tampa superior há um orifício com 10 cm de diâmetro para a entrada do fluxo de água. Na parte inferior de uma das laterais há também um orifício de 10 cm de diâmetro para a condução do fluxo de água à próxima unidade. A tampa superior é móvel para possibilitar a retirada da manta.

O vertedor é a caixa de saída do volume escoado e consiste em um bloco retangular com abertura na face superior, com comprimento interno de 100

cm e largura de 20 cm. Na seção traseira há um orifício com 10 cm de diâmetro para a entrada do fluxo de água. A seção frontal apresenta abertura triangular com ângulo de abertura de  $30^\circ$ , por onde o volume de água escoar. Nesta unidade a tampa superior também é móvel para permitir a verificação das condições internas.

Foram instalados quatro pluviógrafos próximos às parcelas experimentais, um para cada local de experimentação, para quantificar e caracterizar a precipitação.

Foram instalados linígrafos nos vertedores de saída de cada parcela experimental para quantificar o volume de escoamento superficial. Por meio destes aparelhos obteve-se automaticamente o nível de água em intervalos de tempo pré-estabelecidos. Os dados foram armazenados por um registrador de dados (*data logger*) interno ao linígrafo com capacidade de armazenamento programável pelo usuário.

O linígrafo mede a pressão total ou absoluta, que é a soma da pressão atmosférica e da pressão manométrica. Para transformar os dados medidos de pressão em altura de lâmina d'água na caixa, isolou-se a pressão manométrica da pressão atmosférica local, que varia consideravelmente ao longo do tempo. Isso foi feito através da compensação barométrica. Este procedimento permite compensar as variações naturais da pressão atmosférica e evitar que estas interfiram nos valores de cota d'água na caixa coletora, o que pode comprometer consideravelmente a quantificação do escoamento superficial.

A compensação barométrica foi realizada através da subtração dos valores de pressão atmosférica dos valores de pressão absoluta medidos pelo linígrafo. Para isso, foi necessário ter linígrafos também fora das caixas coletoras com o objetivo de medir exclusivamente a pressão atmosférica. Portanto, esses equipamentos operavam em pares, configurados na mesma unidade e frequência de leitura dos dados.

### 2.3.2 Quantificação do escoamento superficial

O volume total escoado pelas parcelas durante os eventos de precipitação foi calculado pela soma do volume acumulado na caixa de saída, obtido quando se conhece as dimensões da caixa, e o volume escoado pelo vertedor.

Para o cálculo do escoamento através do vertedor relacionou-se o nível d'água, medido na caixa de saída pelo linígrafo, com a vazão. Realizou-se então a calibração para a obtenção da curva Cota x Vazão para o vertedor.

### 2.3.3 Modelagem do escoamento superficial

Através das parcelas experimentais, verificou-se com a análise de dados sobre eventos com diferentes intensidades de precipitação, que o processo de escoamento superficial, nesse estudo representado pelo Coeficiente de Escoamento Superficial (C), foi governado majoritariamente por duas variáveis: declividade do terreno e cobertura do solo.

O coeficiente C foi calculado pela divisão entre o volume total escoado e o precipitado em eventos de precipitação. Para cada parcela foi feita uma média dos C referentes a diversos eventos durante o período chuvoso ocorrido entre os meses de outubro de 2012 e março de 2013. O escoamento superficial não pôde ser monitorado nas parcelas experimentais de eucalipto em Guaraciaba e café em Divinésia devido a uma falha no funcionamento dos linígrafos.

Nesse estudo a cobertura do solo foi representada no espaço contínuo através do vigor vegetativo expresso pelo índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), que é uma variável espectral obtida por operação aritmética de razão entre a diferença e a adição das bandas do infravermelho próximo e vermelho, conforme Eq. (2).

$$NDVI = \frac{\lambda_{IR} - \lambda_R}{\lambda_{IR} + \lambda_R} \quad (2)$$

em que  $\lambda_{IR}$  é a radiação eletromagnética (REM) da banda na região espectral do infravermelho próximo e  $\lambda_R$  na região do vermelho. O NDVI oferece a vantagem de distinção entre superfícies como vegetação, solo e água, além de sofrer menor interferência atmosférica.

Segundo evidência experimental, para determinados valores de declividade, notadamente inferiores, o vigor da cobertura vegetal em suas diferentes apresentações governa majoritariamente o processo de escoamento superficial. Contudo, à medida que a declividade aumenta, a vegetação tem sua influência reduzida, não importa quão vigorosa, enquanto a declividade tem sua influência aumentada. Por esse motivo, foi proposto e ajustado um modelo empírico que associa o coeficiente de escoamento superficial experimental com a declividade do terreno obtida em campo por topografia e o NDVI amostrado na imagem de cobertura do solo, conforme a Eq. (3). Os dados apresentados na Tabela 1 foram empregados no procedimento de ajuste da equação. Utilizou-se a função NLS (*Nonlinear Least Squares*) do R statistical software (R Development Core Team, 2011) para este propósito.

$$\hat{C}_k = \beta_0 + S_k^{\beta_1 * NDVI_{(i,j,k)}^{-1}} \quad (3)$$

em que  $C$  é o coeficiente de escoamento da parcela;  $S$  é a declividade levantada em campo por topografia e expressa em porcentagem;  $\beta_0$  e  $\beta_1$  são coeficientes ajustados do modelo;  $k$  é o identificador numérico individual da parcela experimental;  $i$  e  $j$  são respectivamente os números da linha e coluna que localizam o pixel na imagem NDVI.

Tabela 1. Características das parcelas experimentais.

| Local de experimentação | Solo | Cobertura do solo | Declividade (%) | C    | NDVI |
|-------------------------|------|-------------------|-----------------|------|------|
| Guaraciaba              | PVAe | Mata              | 60.7            | 0,12 | 156  |
|                         |      | Pasto             | 41.8            | 0,21 | 160  |
|                         |      | Eucalipto         | 46.7            | ---- | 153  |
|                         |      | Café              | 29.2            | 0,13 | 194  |
| Alto Rio Doce           | LVAd | Mata              | 39.8            | 0,12 | 194  |
|                         |      | Pasto             | 43.1            | 0,15 | 160  |
|                         |      | Eucalipto         | 41.5            | 0,22 | 205  |
|                         |      | Café              | 39.9            | 0,12 | 187  |
| Lamim                   | LVd  | Mata              | 46.1            | 0,09 | 177  |
|                         |      | Pasto             | 37.5            | 0,27 | 162  |
|                         |      | Eucalipto         | 39.7            | 0,16 | 175  |
|                         |      | Café              | 31.1            | 0,09 | 152  |
| Divinésia               | LVAd | Mata              | 32.3            | 0,03 | 199  |
|                         |      | Pasto             | 38.0            | 0,30 | 141  |
|                         |      | Eucalipto         | 65.3            | 0,13 | 186  |
|                         |      | Café              | 38.4            | ---- | 198  |

Na Tabela 2 apresenta-se o resumo estatístico do modelo ajustado. Os coeficientes foram verificados ao nível de significância de 0.05.

Tabela 2. Estatística resumo do modelo ajustado.

| Coeficiente | Estimativa | Erro padrão | t-valor | Pr(> t )    | RSE     | GL |
|-------------|------------|-------------|---------|-------------|---------|----|
| $\beta_0$   | -1.07028   | 0.09098     | -11.765 | 6.03e-08*** | 0.06374 | 12 |
| $\beta_1$   | 9.26735    | 3.36809     | 2.752   | 0.0176*     |         |    |

Nível de significância: \*0.05; \*\*\*0.001

Para representar o escoamento superficial na forma de uma superfície contínua espacial, aplicou-se o modelo ajustado a partir das informações experimentais pontuais Eq. (3) em notação matricial Eq. (4). Assim, substituiu-se a variável S determinada em campo pelo Modelo Digital de Declividades (Fig. 4) e o valor do pixel de NDVI na parcela experimental pela imagem do NDVI, produzindo-se o Modelo Digital de Escoamento Superficial, exibido na Fig. 10a.

$$C_{(i,j)} = \beta_0 + SDM_{(i,j)}^{\beta_1 * NDVI_{(i,j)}^{-1}} \quad (4)$$

## 2.4 Definição da zona de análise

Na região de estudo os deslizamentos ocorrem principalmente pela combinação de duas situações: i) boa infiltração da água da chuva em topos de morro e; ii) elevado escoamento superficial nas encostas imediatamente adjacentes. Assim, para a identificação de áreas suscetíveis a deslizamentos, buscou-se restringir a zona de análise a locais onde ocorresse associação das duas situações, o que reduziu o esforço computacional e otimizou o processo.

Primeiro conduziu-se análise em SIG para a identificação dos topos de morro na bacia. Feito isso, selecionou-se áreas nesses topos que apresentaram grande potencial de infiltração, ou seja, baixa declividade e boa cobertura vegetal. A zona de análise ficou definida como uma faixa ao redor das áreas de infiltração nos topos de morro identificados, arbitrada em 200 m de extensão. De acordo com as características da região, esta faixa abrange seguramente toda a extensão das encostas da área de estudo.

O algoritmo desenvolvido para obtenção dos topos de morro está disponível no Material Suplementar A, sendo apresentado na Fig. 14.

## 2.5 Representação esquemática dos processos

Na Fig. 6 apresenta-se o fluxograma resumo de processos empregados para identificar áreas suscetíveis ao deslizamento de terra com base em experimentos de campo e análise multicritério em ambiente SIG. Os principais processos estão destacados por cores e agrupados por afinidade. Suas formas geométricas diferenciam: operações, *raster files* e dados de campo, respectivamente representados por losangos, retângulos e círculos. As análises hidrometeorológicas são apresentadas em azul; recursos do sensoriamento remoto orbital e de processamento digital de imagens são exibidos em verde; as etapas dos experimentos de campo para obtenção do coeficiente de escoamento superficial encontram-se em cor vermelho; a padronização (*fuzzification*) dos critérios está apresentada na cor laranja; o

mapa de tipos de solo está em marrom; as zonas de restrições das análises são apresentadas pelos processos em cor cinza; e a análise multicritérios (MCE) e o mapa de suscetibilidade à deslizamentos de terra em roxo.

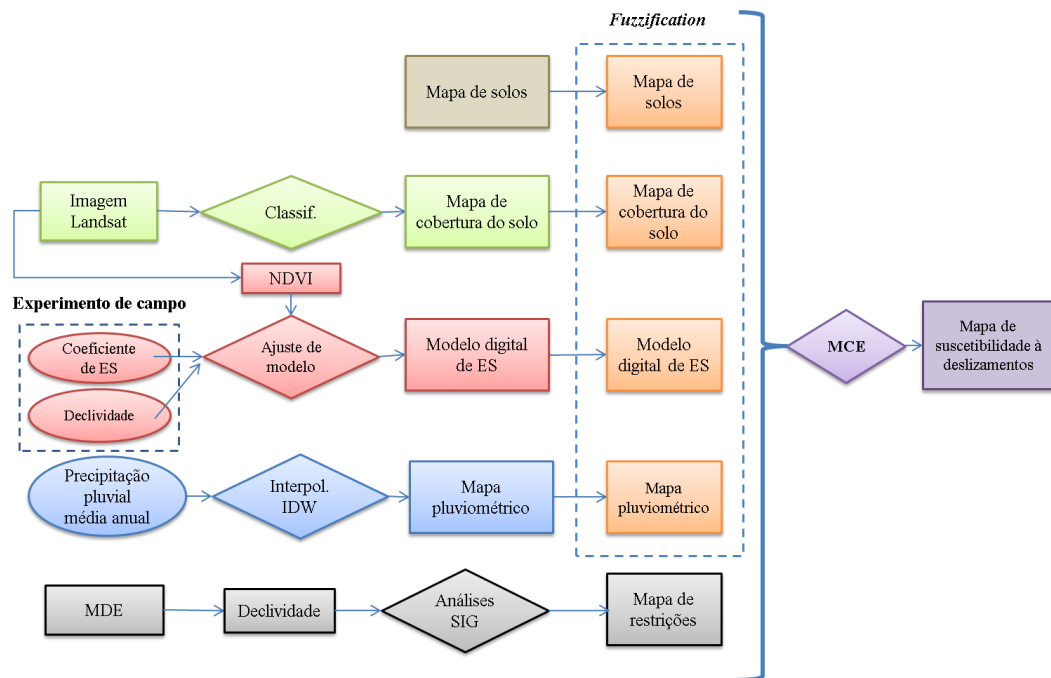


Figura 6. Fluxograma resumo dos processos empregados.

## 2.6 Análise MultiCritérios

Os critérios utilizados na análise foram escalonados em um mesmo intervalo de valores em termos de suscetibilidade relativa à ocorrência de deslizamentos, com exceção das restrições. Esta etapa teve efeito de padronizar diferentes temas expressos em grandezas variadas para posterior comparação. As classes individuais dos critérios categóricos como tipos de solo e cobertura do solo foram reclassificadas hierarquicamente conforme sua suscetibilidade particular ao deslizamento. Por outro lado, os critérios de variação espacial contínua, como pluviometria e mapa de escoamento superficial, foram escalonados por funções de transformação *fuzzy*, crescente ou decrescente conforme sua característica intrínseca.

Durante a ponderação de critérios adotou-se maior importância para o coeficiente de escoamento por ter sido uma variável determinada com base em experimentos de campo. Já os critérios cobertura do solo, tipos de solo e pluviometria foram considerados moderadamente menos importantes do que



o coeficiente de escoamento, contudo, com importância equivalente entre si. A avaliação comparativa sobre a importância relativa entre os critérios foi conduzida através da técnica *Analytical Hierarchy Process* (AHP) proposta por Saaty (1987), amplamente utilizada na ponderação espacial de multicritérios, como em Dawson et al. (2009). A Tabela 3 apresenta os fatores e restrições que compuseram os critérios da análise, bem como os pesos definidos para cada um deles e seus respectivos mapas de suscetibilidade aos deslizamentos. A razão de consistência obtida com essa configuração foi igual a zero.

Tabela 3. Critérios usados na análise, seus respectivos pesos e mapas de suscetibilidade aos deslizamentos.

|                   | <b>Critérios</b>       | <b>Peso</b> | <b>Mapa de suscetibilidade</b> |
|-------------------|------------------------|-------------|--------------------------------|
| <b>Fatores</b>    | Cobertura do solo      | 0,1667      | Fig. 7b                        |
|                   | Tipos de solo          | 0,1667      | Fig. 8b                        |
|                   | Pluviometria           | 0,1667      | Fig. 9b                        |
|                   | Escoamento superficial | 0,5000      | Fig. 10b                       |
| <b>Restrições</b> | Área urbana            | ---         | Fig. 11                        |
|                   | Limite da bacia        | ---         |                                |
|                   | Zona de análise        | ---         |                                |

Os mapas de suscetibilidade relativos a cada critério foram escalonados no intervalo de valores de 0 a 255. Mas para facilidade de interpretação, assim como apresentado nos estudos de Akgun (2012) e Günther et al. (2013), foi realizado procedimento de reclassificação em cinco classes de suscetibilidade aos deslizamentos: muito baixa (0 a 50), baixa (de 51 a 100), moderada (de 101 a 150), alta (de 151 a 200) e muito alta (de 201 a 255).

Na Fig. 7b. observa-se o mapa de suscetibilidade gerado de acordo com a influência de cada categoria de cobertura do solo na ocorrência de deslizamentos. A classe área urbana não foi contemplada na análise MCE, pois a escala não era adequada.

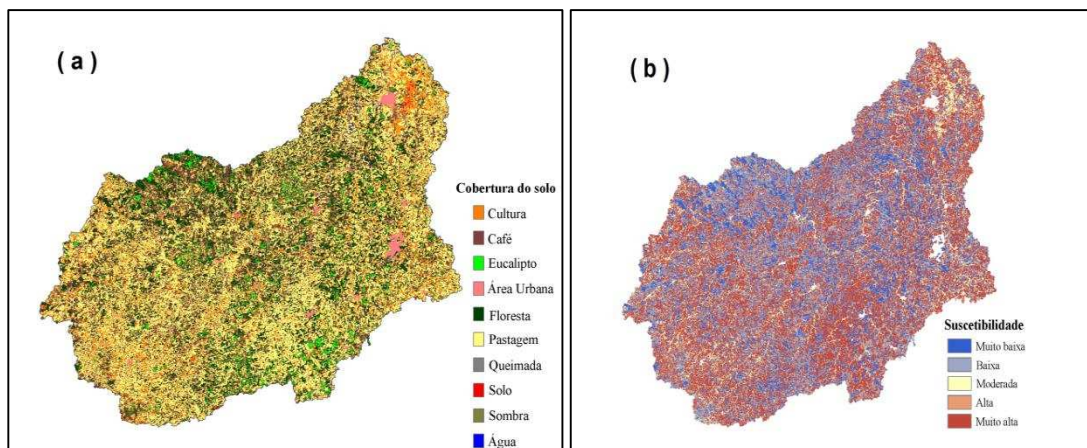


Figura 7. Mapa de cobertura do solo (a); Mapa de suscetibilidade a deslizamentos com base nas classes de cobertura do solo (b).

Na Fig. 8b apresenta-se o mapa de suscetibilidade conforme grau de influência da respectiva classe de solo.

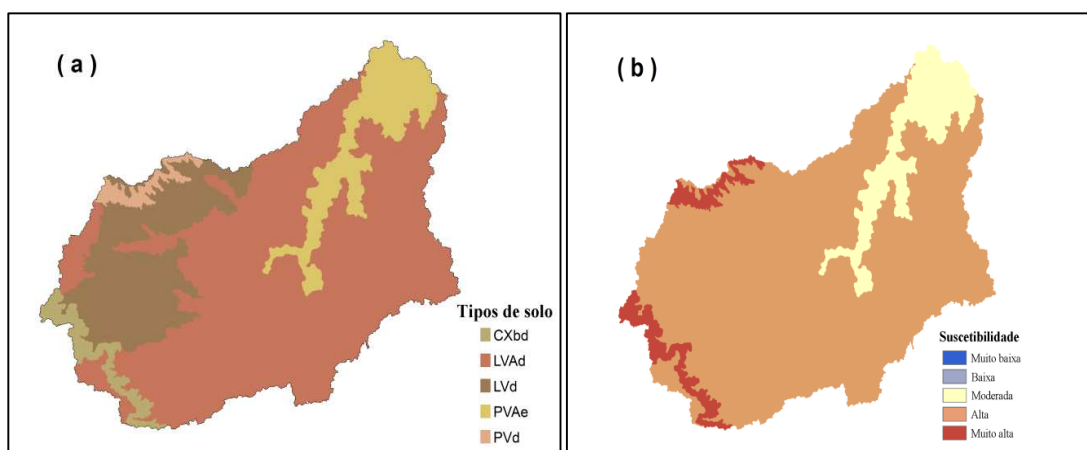


Figura 8. Mapa de solos (a); Mapa de suscetibilidade a deslizamentos com base nas categorias de solo (b).

Na Fig. 9b observa-se o mapa de suscetibilidade obtido por função *fuzzy* sigmoide monotônica crescente, onde as maiores suscetibilidades estão associadas aos maiores índices pluviométricos.

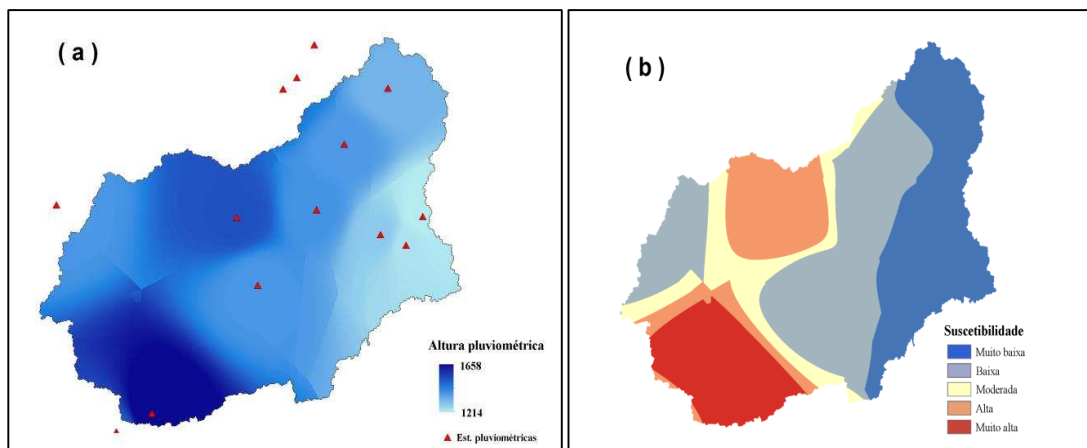


Figura 9. Mapa pluviométrico (mm/ano) (a); Mapa de suscetibilidade a deslizamentos com base na pluviometria (b).

A Fig. 10b apresenta o mapa de suscetibilidade obtido por função de transformação de valores fuzzy sigmoide monotônica crescente, onde os maiores valores de suscetibilidade estão associados aos maiores coeficientes de escoamento superficial.

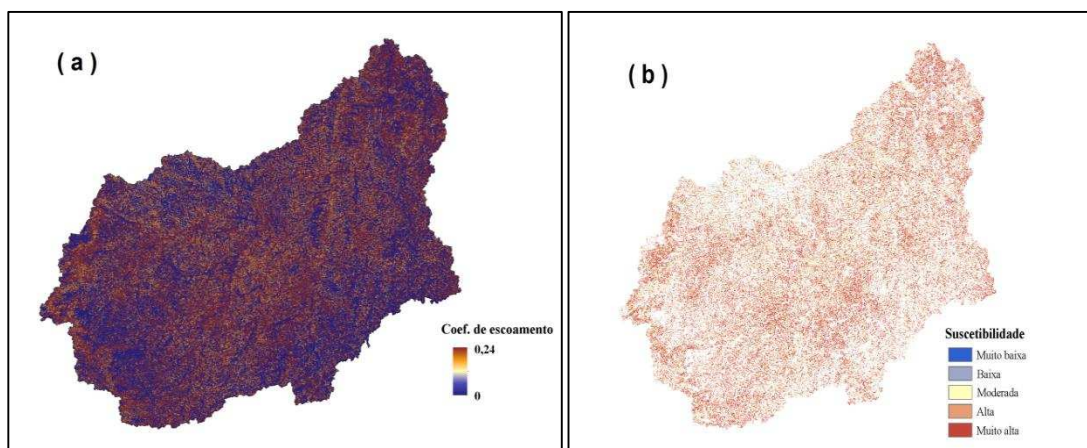


Figura 10. Modelo digital de escoamento superficial (a); Mapa de suscetibilidade a deslizamentos com base no escoamento superficial (b).

Para composição das restrições realizou-se operações de interseção booleana entre os *layers*: área urbana, fora do limite da bacia hidrográfica e fora da zona de análise. Dessa maneira exclui-se da análise áreas de menor relevância com relação ao problema dos deslizamentos. O resultado pode ser verificado na Fig. 11.

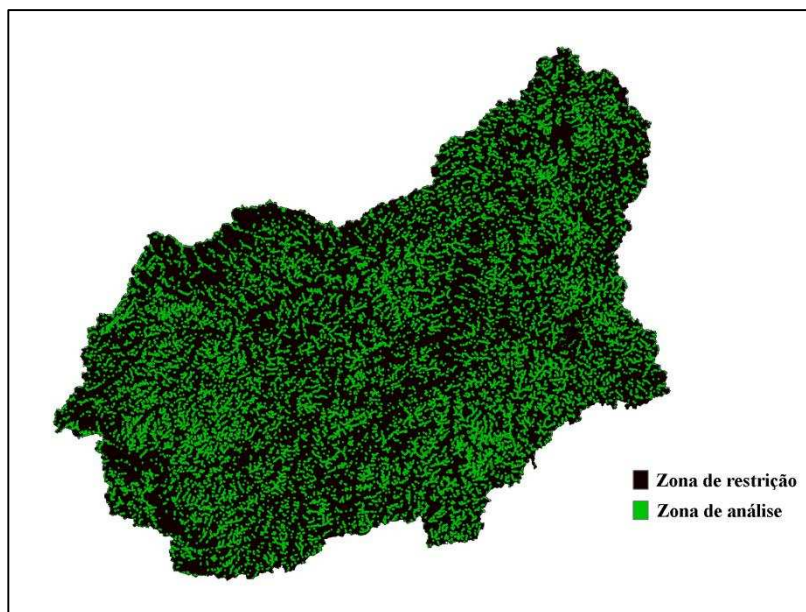


Figura 11. Mapa booleano de restrições e zona de análise.

### 3 Resultados e discussões

Como resultado da análise multicritério obteve-se o mapa apresentado na Fig. 12, que é um modelo digital de suscetibilidade a deslizamentos. Para melhor interpretação dos resultados, foi realizado o mesmo procedimento detalhado no item 2.6, onde o intervalo de valores de 0 a 255 foi reclassificado em cinco classes de suscetibilidade aos deslizamentos.

Foram identificadas zonas de alta e muito alta suscetibilidade ao deslizamento de terra em toda a região analisada na bacia. Essas zonas, que podem ser consideradas áreas críticas, correspondem a 26,2% das áreas de encostas analisadas na bacia, evidenciando a relevância do problema. Houve maior concentração de áreas críticas nas porções alta e média da bacia, sendo a região de cabeceira a mais afetada com o problema.

Isso é evidenciado no mapa de suscetibilidade (Fig. 12), onde observa-se a predominância de cores críticas principalmente na porção sudoeste da bacia. Isto significa que nessas áreas foram observadas várias condições que potencializam a ocorrência do fenômeno. Apesar do maior grau de preservação, evidenciado pela vasta cobertura florestal, a região apresenta

as maiores declividades, o que levou a maiores coeficientes de escoamento. Além disso, na área são observados os maiores índices pluviométricos e os tipos de solo classificados como de alta e muito alta suscetibilidade aos deslizamentos. Como esperado, na porção baixa da bacia foi verificada predominância das zonas de menor suscetibilidade a deslizamentos. Esse resultado deve-se às menores declividades observadas na região, além da baixa pluviosidade e tipos de solo menos suscetíveis aos deslizamentos.

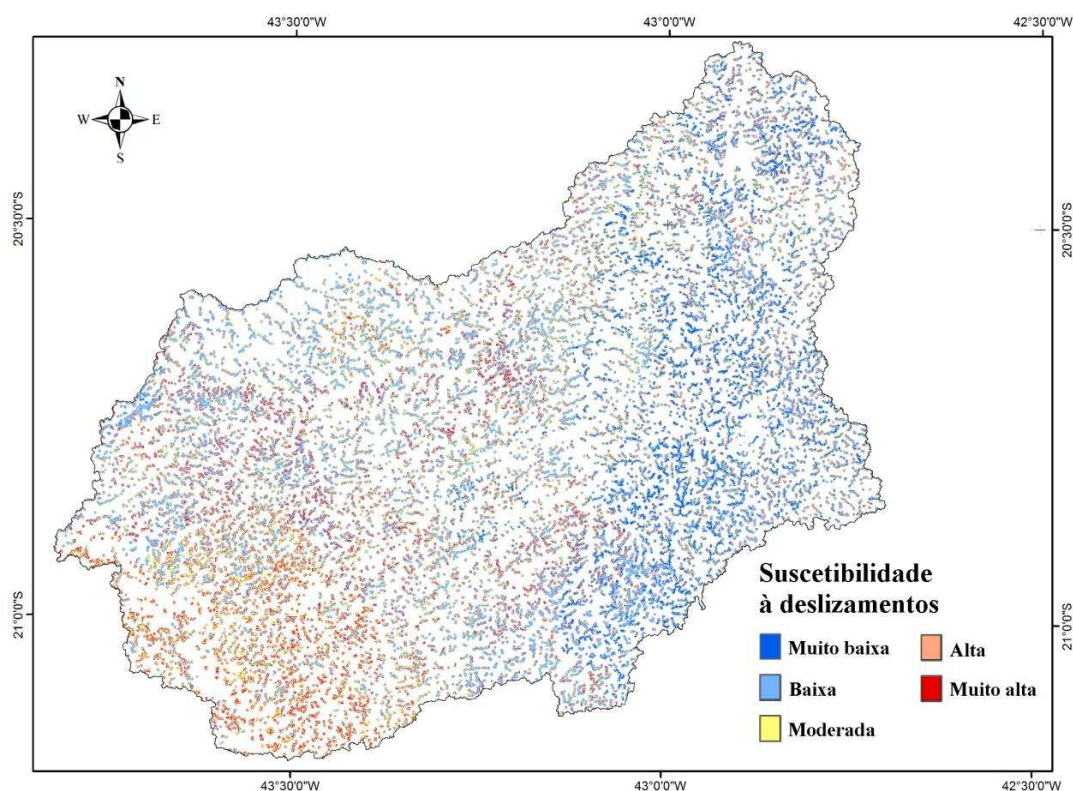


Figura 12. Mapa de suscetibilidade a deslizamentos de terra.

No detalhe da Fig. 13, as áreas em verde escuro representam os topos de morro com grande potencial de infiltração e a hidrografia localiza os fundos de vale, que não foram incluídas na análise. Nota-se coerência na definição das encostas como zona de atuação da análise de suscetibilidade aos deslizamentos. Também é possível observar que muitas encostas com alto risco são interseccionadas ou margeadas por estradas, provocando riscos como ilustrado na Fig. 2b. Esse é um problema observado principalmente nas áreas de cabeceira da bacia.



De um modo geral as áreas de menor suscetibilidade a deslizamentos, categorizadas como de muito baixa e baixa não requerem atenção imediata, pois não oferecem risco iminente às populações. Entretanto as áreas de suscetibilidade moderada devem ser avaliadas, pois devido às práticas de manejo do solo inadequadas, praticadas na região, há tendência de evoluírem para condição mais crítica. Já as áreas críticas de suscetibilidade requerem atenção especial uma vez que oferecem grande risco de deslizamento de terra.

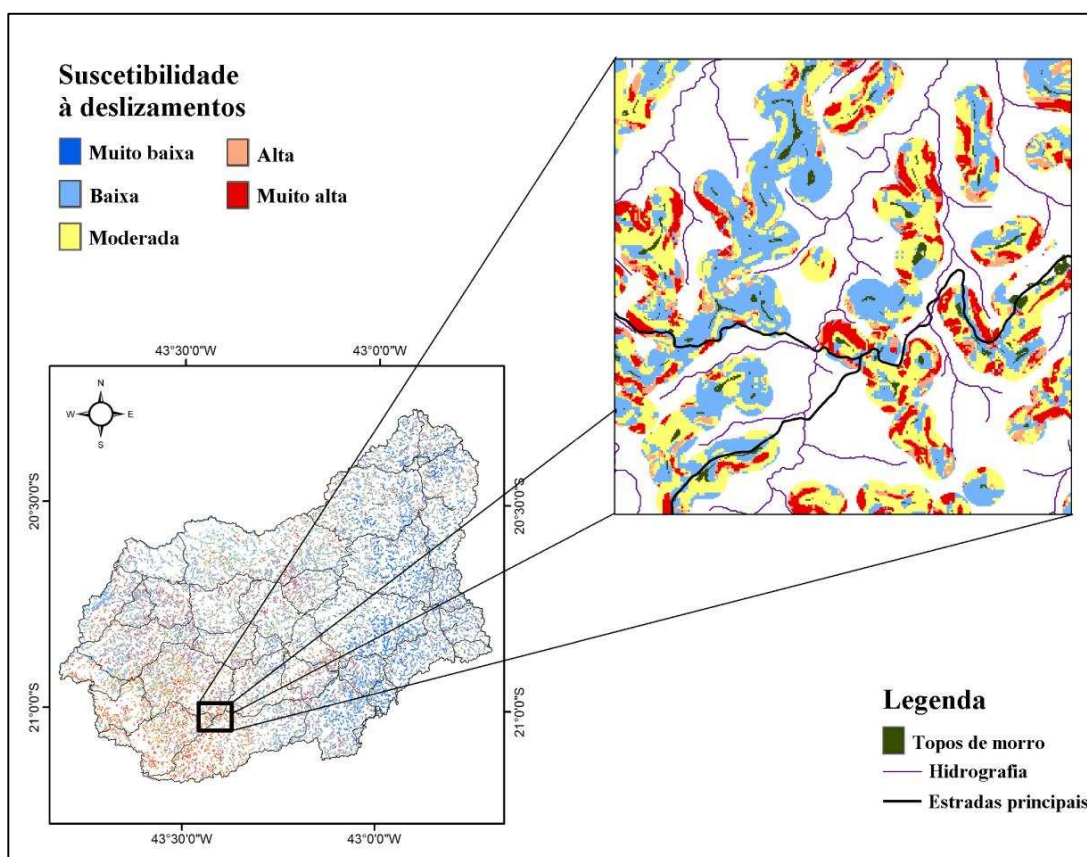


Figura 13. Detalhe do mapa de suscetibilidade a deslizamentos de terra.

## 4 Conclusões

Através da abordagem utilizada neste trabalho foi possível identificar zonas de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos de terra com base em experimentos conduzidos em campo e análise por avaliação MultiCritério desenvolvida em ambiente SIG. Além disso, foi possível concluir que:

- a etapa de coleta de dados de escoamento superficial foi otimizada devido à forma com que o experimento foi concebido para operar, ou seja, de forma ininterrupta e autônoma;
- a utilização de dados obtidos através de experimentação em campo propiciou verificar que o processo de escoamento superficial é governado principalmente por dois fatores: a declividade do terreno e a cobertura do solo. Verificou-se ainda que eles alternam sua influência conforme se apresentam na superfície. Ou seja, enquanto a declividade é menor, a cobertura vegetal é decisiva. Contudo, à medida que a declividade aumenta e atinge determinada magnitude, esta passa a exercer maior influência no escoamento à medida que a cobertura do solo perde importância;
- a metodologia permitiu integrar diferentes critérios em uma única análise de forma coerente e simplificada. Segundo avaliação fundamentada no conhecimento especialista, os resultados mostraram concordância com as condições observadas em campo na área de estudo em relação à suscetibilidade a deslizamentos;
- pode-se replicar essa metodologia em outros locais e condições ambientais distintas para identificação de zonas suscetíveis aos deslizamentos de terra.

Recomenda-se que a metodologia proposta seja utilizada como ferramenta de gestão pública e aplicada em outras regiões com histórico de ocorrência de deslizamentos de terra para identificação das zonas de alta suscetibilidade desses eventos, portanto, de grande risco às populações. Em trabalhos futuros sugere-se incorporar outros critérios para ampliar o potencial da análise MCE. Adicionalmente, um maior período de observação hidrometeorológica dos experimentos de campo pode elevar a acurácia dos resultados. Ressalta-se que a indisponibilidade de mapas de tipos de solo e cobertura do solo em escalas maiores limitou a escala do estudo a 1:650.000. No futuro, utilizando-se mapas em escalas maiores, poderão ser obtidos resultados significativamente melhores.

## Referências Bibliográficas

- Akgun, A. (2012) A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at Izmir, Turkey. *Landslides* 9(1):93–106.
- Armas, I. (2011) An analytic multicriteria hierarchical approach to assess landslide vulnerability. Case study: Cornu village, Subcarpathian Prahova Valley/Romania. *Z Geomorphologie* 55(2):209–229.
- Assis, L. C. (2012) Simulação de processos hidrológicos na Bacia Hidrográfica do Rio Piranga. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 111.
- Brunsden, D. & Prior, D. B. (Eds.) (1984) Slope instability. Wiley, Singapore.
- Camargo, R. D. A. (2012) Avaliação da suscetibilidade à erosão e proposta de zoneamento estratégico com vistas à garantia da sustentabilidade para a Bacia Hidrográfica do rio Piranga, MG. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 104.
- Castellanos Abella, E. A.; van Westen, C. J. (2007) Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. *Landslides* 4:311–325.
- Chan, N. W. (1998a) Environmental hazards associated with hill land development in Penang Island, Malaysia: Some recommendations on effective management. *Disaster Prevention and Management*, 7(4):305–318.
- Chan, N. W. (1998b) Responding to landslide hazards in rapidly developing Malaysia: A case of economics versus environmental protection. *Disaster Prevention and Management*, 7(1):14–27.
- Consórcio ECOPLAN-LUME (2010) Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce.



- Dawson, R. J. et al. (2009) Integrated analysis of risks of coastal flooding and cliff erosion under scenarios of long term change. *Climatic Change*, 95(1-2):249-288.
- EM-DAT (2013) The OFDA/CRED International Disaster Database. Universite Catholique de Louvain, Brussels, Belgium. <http://www.em-dat.net>. Accessed 20 April 2013.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (1999) Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Serviço de Produção de Informação, 412p.
- Ercanoglu, M.; Gokceoglu, C. (2004) Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). *Eng. Geol.* 75(3&4):229–250.
- Fernandes Filho, E. I. et al. (2010) Levantamento de solos e aptidão agrícola da porção mineira da bacia do Rio Doce. Belo Horizonte: Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM).
- Gorsevski, P.V.; Gessler, P.E.; Foltz, R.B. and Elliot, W.J. (2006) Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and ROC analysis. *Trans GIS* 10(3):395–415.
- Günther, A. et al. (2013) Tier-based approaches for landslide susceptibility assessment in Europe. *Landslides* 10:529-546.
- IGAM (2007) Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce e dos Planos de Ações de Recursos Hídricos para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce. Consórcio ECOPLAN-LUME.
- Lim, R.P. and Lee, S.W. (Eds.) (1992) Hill development. In: *Proceedings of the Seminar*, Malaysian Nature Society, Kuala Lumpur.

- Neuhauser, B.; Damm, B. and Terhorst, B. (2012) GIS-based assessment of landslide susceptibility on the base of the weights-of-evidence model. *Landslides* 9(4):511–528.
- Pradhan, B. (2010) Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. *Advances in Space Res* 45:1244–1256.
- R Development Core Team (2011) A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna.
- Roy, B. (1996) Multicriteria methodology for decision aiding. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Saaty, R.W. (1987) The Analytic Hierarchy Process - What it is and how it is used. *Mathematical Modeling*, 9:161-176.
- Schuster, R. (1996) Socioeconomic significance of landslides. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation: Special Report*, 247. National Academic Press, Washington, pp. 12-36.

## Material Suplementar A

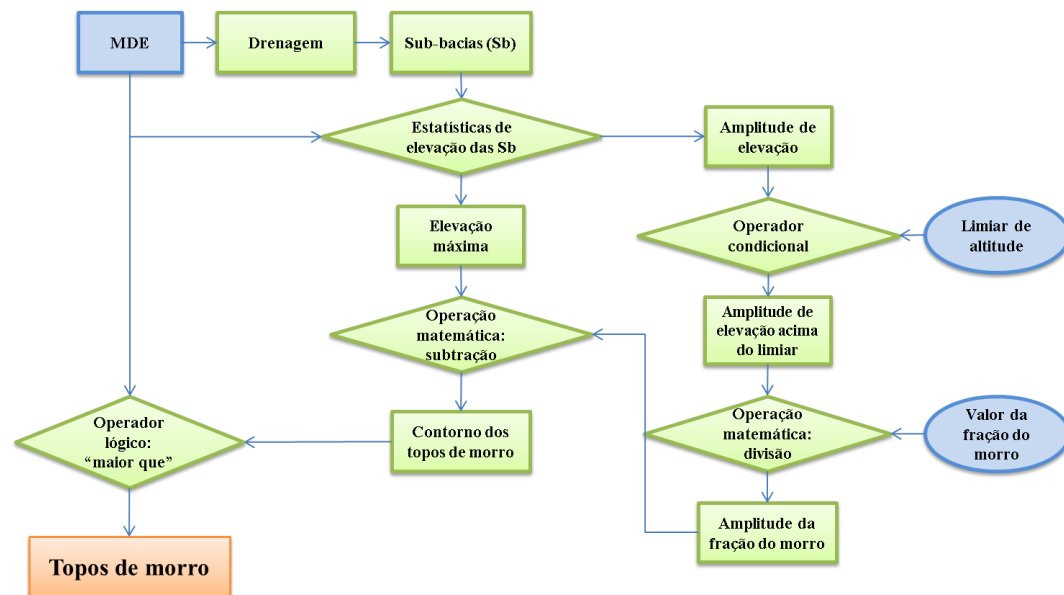


Figura 14. Algoritmo em SIG para obtenção de topos de morro a partir do MDE.

Os parâmetros de entrada estão apresentados em azul, operações em verde e o resultado em laranja. Retângulos definem *raster files*, elipses os valores numéricos de entrada e losangos as operações.

Notas:

- O algoritmo proposto foi otimizado para bacias hidrográficas;
- As operações para obtenção das sub-bacias do MDE variam de acordo com o software SIG utilizado. Entretanto, as etapas básicas são relacionadas com a obtenção da direção de fluxo e do fluxo acumulado. Este último foi usado para produzir os canais de drenagem, empregados em seguida no procedimento de conversão raster/vetor. A partir do fluxo em formato vetor, identificou-se as confluências, que puderam ser utilizadas para a definição das sub-bacias;
- Em seguida, obteve-se para cada sub-bacia a amplitude de elevação e a altitude máxima;

- Uma operação condicional foi aplicada para excluir áreas abaixo de um limiar definido pelo usuário que especifica a altura mínima do morro;
- Particionou-se os morros em intervalos de altitude de acordo com o critério do analista para a definição de uma fração superior que foi assumida como os topos de morro;
- Uma operação de subtração entre os valores máximos de altitude e a amplitude de elevação da fração superior foi aplicada para cada sub-bacia. Obteve-se como resultado os contornos da base dos topos de morro das sub-bacias;
- Finalmente, foi obtida a imagem de topos de morro através de uma operação lógica “maior que” entre o MDE e os contornos da base dos topos de morro.

## **Artigo 2. Avaliação do efeito das mudanças de cobertura do solo no comportamento hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga.**

### **Resumo**

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito das mudanças de cobertura do solo no comportamento hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga através de simulação hidrológica. Foram selecionados três eventos de chuva causadores de enchentes nos anos de 1985, 1991 e 2005. Em seguida obteve-se imagens de cobertura do solo de datas próximas a esses eventos, no intervalo máximo de cinco anos. Utilizou-se o software *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC), para calibrar e validar modelo hidrológico e simular cenários onde avaliou-se os efeitos dos três eventos de chuva nas vazões variando-se a condição de cobertura do solo. Destaca-se no período analisado o avanço das áreas agrícolas sobre a cobertura florestal e pastagens. Além disso, observou-se pequeno aumento das áreas urbanas e de solo exposto. Os resultados obtidos na avaliação dos cenários apontam para um aumento na tendência de ocorrência de enchentes devido às mudanças na cobertura do solo.

### **1 Introdução**

Atualmente as enchentes são problema frequente e comum em todo o mundo, caracterizando-se como um dos tipos de eventos que mais causam prejuízos econômicos e sociais. As causas são diversas e complexas, um conjunto de fatores como o assoreamento do leito de rios, impermeabilização de áreas de infiltração na bacia hidrográfica e até mesmo fatores climáticos. Destaca-se também a influência das mudanças da cobertura do solo, que segundo Ali et al. (2011) levam à alterações nos processos hidrológicos como interceptação, infiltração e evaporação. Isso pode afetar a geração de escoamento e os padrões de fluxo na bacia, o que

tem impacto sobre a frequência e magnitude de enchentes. Diversos autores, como Olang e Furst (2011) e Ty et al. (2012), apontam em seus estudos a importância das alterações na cobertura do solo na compreensão dos processos que levam às enchentes.

Diante disso, é cada vez mais importante a busca por ferramentas que contribuam para a melhoria da interpretação de informações referentes à dinâmica dos recursos ambientais. Neste cenário, surge como alternativa a modelagem, por meio da qual é possível identificar, compreender e prever o impacto de alterações naturais e antrópicas provocadas ao meio ambiente. Um modelo é uma abstração da realidade, não uma cópia exata, projetada para tentar reproduzir as características relevantes para o tratamento de uma determinada questão. Os modelos matemáticos utilizam equações que simulam vários cenários e eventos e preveem ou simulam impactos, sendo os mesmos uma hipótese sobre o sistema que representam (LOURDES, 2008). Segundo Hunukumbura et al. (2008), a modelagem hidrológica é comumente utilizada para estimar a resposta hidrológica de uma bacia à precipitação. Diz ainda que a seleção do modelo a ser utilizado depende dos objetivos do estudo e das informações disponíveis para a bacia, como cobertura do solo, tipos de solo, dados hidrometeorológicos, entre outros.

Dentre os modelos hidrológicos disponíveis, certamente um dos mais utilizados é o HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*), desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. O HEC-HMS foi projetado para simular processos hidrológicos como evaporação, precipitação e escoamento em redes de bacias hidrográficas (HEC, 2010). Para isso, reúne uma série de métodos e parâmetros e permite incorporar elementos tais como sub-bacias, trechos de rios, junções, desvios e sumidouros (USACE, 2000). A resposta do HEC-HMS é dada na forma de hidrogramas, os quais podem ser utilizados como base para avaliação de cheias em grandes e pequenas bacias, tanto naturais quanto urbanas.

Deve-se destacar que, para a aplicação de modelos hidrológicos em nível de bacias hidrográficas, torna-se imprescindível o uso de Sistemas de

Informação Geográfica (SIG). Segundo Johnson (2009), os SIG fornecem uma grande variedade de funções que permitem a execução de análises complexas usando atributos de dados espaciais, análises estas que seriam de difícil e demorada mensuração se realizadas manualmente.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi calibrar e validar modelo hidrológico para avaliar o efeito das mudanças de cobertura do solo no comportamento hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga.

## **2 Metodologia**

### **2.1 Área de estudo**

Este estudo foi conduzido na região da nascente do Rio Doce, especificamente na Bacia Hidrográfica do Rio Piranga, que abriga população aproximada de 300.000 habitantes e localiza-se no Estado de Minas Gerais, região sudeste do Brasil (Fig. 15). Abrange uma área de cerca de 6.600 km<sup>2</sup> e suas coordenadas geográficas estão entre 20°16' e 21°11' de latitude sul e 42°42' e 43°49' de longitude oeste. A altitude varia entre 324 e 1.452 m e a maior parte da bacia apresenta relevo fortemente ondulado, caracterizado por declividades entre 20 e 45%, de acordo com o critério de classificação adotado pela Embrapa (1999).

De acordo com Camargo (2012) a principal unidade geomorfológica é o planalto campo das vertentes, que é caracterizado pelas colinas convexo-côncavas e representa aproximadamente 75% da bacia. Segundo o IGAM (2007), a maior parte dos solos apresenta baixa fertilidade, o que, associada a declividades acentuadas de encostas, favoreceu o desenvolvimento de atividades econômicas com baixo valor agregado. As principais classes de cobertura do solo são as pastagens, que subsidiam atividade pecuária, e áreas de cultivo agrícola com ocupação por lavouras temporárias e permanentes.

Segundo o Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia (Consórcio ECOPLAN-LUME, 2010), as pastagens apresentam alto nível de

degradação devido ao intenso pisoteio e compactação e ao modelo de uso e ocupação da região, onde não é comum a aplicação de tecnologias de conservação do solo.

Também há consideráveis áreas plantadas com eucalipto, as quais, em conjunto com as demais caracterizam exploração antropogênica da área. A cobertura vegetal natural da região é definida por remanescentes florestais. Apesar de haver 28 municípios completamente inseridos na bacia, a população da região é predominantemente rural, sendo que as áreas urbanas representam menos de 1% da área total. O clima, segundo a classificação de Köppen-Geiger, enquadra-se como tropical de altitude com chuvas durante o verão e verões frescos. A temperatura média anual varia em torno de 18°C e a precipitação média anual é de 1.400 mm.

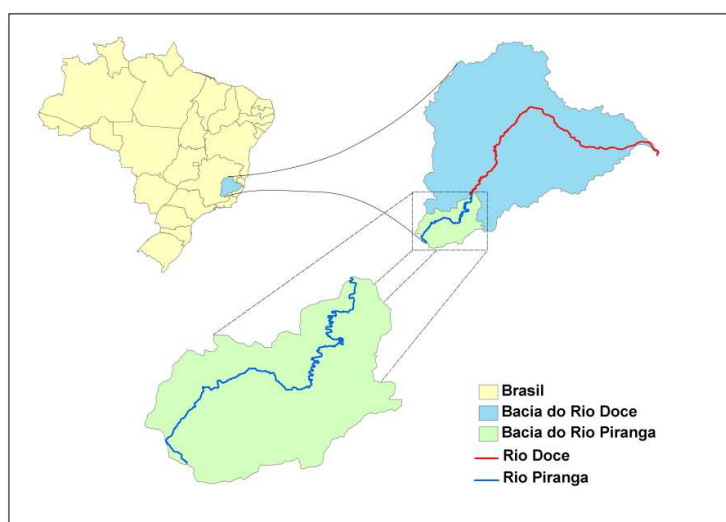


Figura 15. Localização das Bacias Hidrográficas do Rio Piranga e do Rio Doce no Estado de Minas Gerais e no Brasil.

## 2.2 Dados

*Softwares:* neste estudo foram utilizados: i) ArcGIS 10.0<sup>® 1</sup>; ii) Erdas Imagine 9.1<sup>® 2</sup>; iii) Idrisi 16.03<sup>® 3</sup>; iv) HEC-HMS 3.5<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> ESRI®, ESRI Inc. 1999-2010.

<sup>2</sup> ERDAS Inc. 1982-1999.

<sup>3</sup> The Taiga Edition, Clark Labs 1987-2009.

<sup>4</sup> HEC-HMS version 3.5, U.S. Army Corps of Engineers, 2010.



*Dados hidrometeorológicos:* foram utilizados dados de séries históricas de 9 estações pluviométricas e 7 estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Piranga e no seu entorno. Os dados de chuva correspondem às alturas máximas precipitadas diárias e os dados fluviométricos são vazões médias diárias. Os nomes e códigos das estações utilizadas são apresentados na Tabela 4 e a localização destas pode ser visualizada na Fig. 16.

Tabela 4. Códigos e nomes das estações pluviométricas e fluviométricas.

| Estações pluviométricas |                           | Estações fluviométricas |                    |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|
| Código                  | Nome                      | Código                  | Nome               |
| 02043010                | Piranga                   | 56028000                | Piranga            |
| 02043026                | Bráz Pires                | 56055000                | Bráz Pires         |
| 02042015                | Seriquite                 | 56085000                | Seriquite          |
| 02043014                | Porto Firme               | 56075000                | Porto Firme        |
| 02042018                | Ponte Nova Jusante        | 56110005                | Ponte Nova Jusante |
| 02043005                | Conselheiro Lafaiete      | 56065000                | Senador Firmino    |
| 02043018                | Carandaí                  | 56090000                | Fazenda Varginha   |
| 02143003                | Desterro do Melo          | ----                    | ----               |
| 02043052                | Ouro Branco<br>(Acominas) | ----                    | ----               |

*Modelo digital de elevação (MDE):* gerado a partir dos planos de informação referentes à hidrografia e altimetria, esta última discriminada em pontos cotados e curvas de nível, obtidas através das cartas topográficas vetoriais do mapeamento sistemático e disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A escala dos mapas digitais foi de 1:50.000 e as curvas de nível apresentam equidistância vertical de 20 m. Foram necessárias 18 cartas para abranger toda a área da bacia. Realizou-se o pré-processamento dos dados digitais obtidos e a verificação da

consistência de toda a base. As curvas de nível foram editadas manualmente em conformidade com a hidrografia mapeada. Esta última, por sua vez, foi orientada no sentido da direção de escoamento. Após a etapa de edição produziu-se o MDE com resolução de 15m. Para condicionar o MDE à hidrografia mapeada, foi utilizado o algoritmo proposto por Ribeiro et al. (2006), implementado no ArcGIS® e que pode ser dividido em três etapas: 1) rasterização da hidrografia mapeada, isto é, converter a hidrografia vetorial para sua representação matricial equivalente; 2) correção do perfil da hidrografia e; 3) refinamento de taludes ao longo da hidrografia. Na Fig. 16 é apresentado o Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC) obtido.

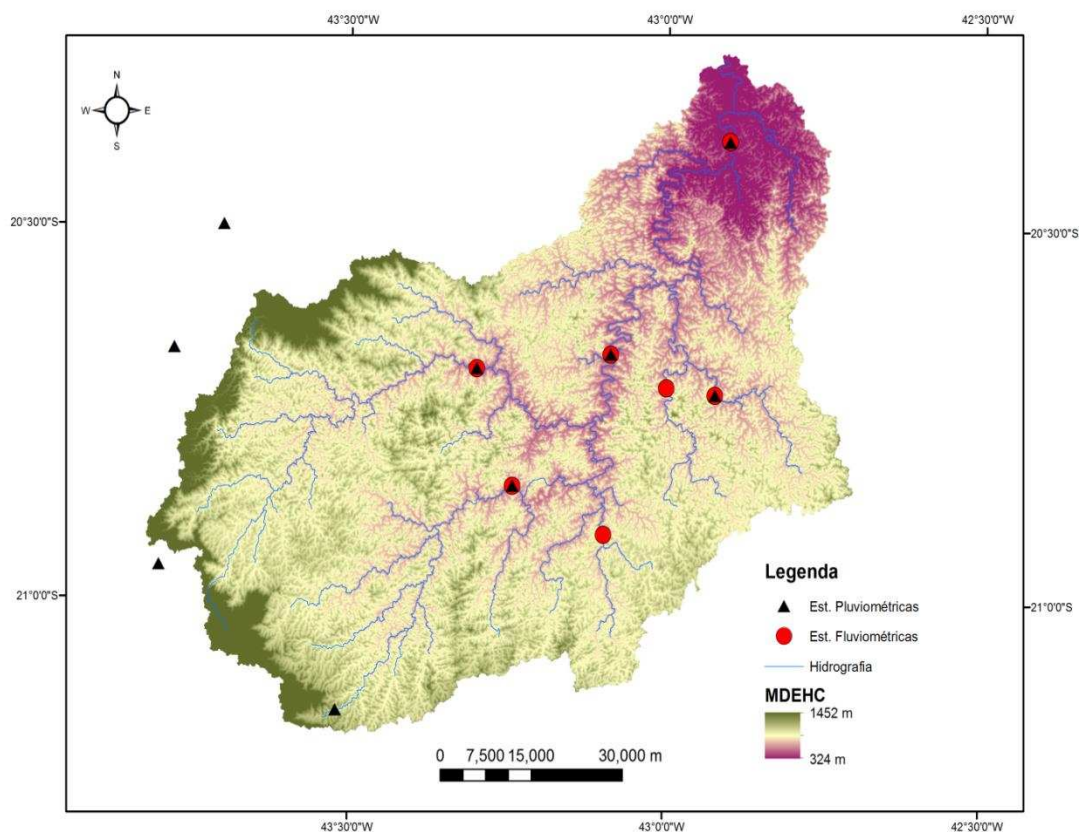


Figura 16. MDEHC da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga.

*Imagens de satélite:* Para a caracterização da cobertura do solo foram utilizadas imagens da plataforma orbital Landsat 5 (sensor TM) com resolução espacial de 30 m, disponibilizadas gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A fim de abranger toda a extensão da área de estudo, para cada data foram necessárias duas cenas, pontos 74

e 75, ambas da órbita 217. As datas de cada par de cenas obtidas foram: 04/07/1985, 18/07/1996 e 05/09/2008.

*Tipos de solo:* utilizou-se o mapa de solos apresentado na Fig. 17, que é um recorte do original “Levantamento de solos e aptidão agrícola da porção mineira da bacia do rio Doce”, publicado por Fernandes Filho et al. (2010) na escala de 1:650.000. Todas as tipologias de solo que ocorrem na região apresentam horizonte A moderado, fase floresta tropical subperenifólia e suas especificidades quanto ao grupo predominante são:

- Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) típico de textura argilosa com relevo forte ondulado (de 35% a 50%) no eixo Nordeste-Sudoeste (NE-SO) e ondulado/forte ondulado (de 50 a 60%) na região da nascente do alto Piranga, Sudoeste (SO), e de textura argilosa/muito argilosa com relevo forte ondulado/montanhoso na porção Sudeste (SE);
- Latossolo Vermelho distrófico (LVd) típico de textura muito argilosa com relevo forte ondulado e forte ondulado/montanhoso em cerca de 30% e 35% respectivamente, ambos ocorrem a Noroeste (NO) na região da nascente;
- Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (PVAe) típico, de textura argilosa e relevo ondulado representando 40% e ocorrência bem definida na região do baixo Piranga próximo à sua foz, à Norte/Nordeste (N-NE);
- Argissolo Vermelho distrófico (PVd) típico de textura argilosa e relevo forte ondulado em cerca de 50%, aparece ao Norte (N) da região do alto da bacia hidrográfica;
- Cambissolo Háplico Tb distrófico (CXbd) típico, de textura média e relevo montanhoso (50%), ocorre a extremo Sudoeste na região da nascente.

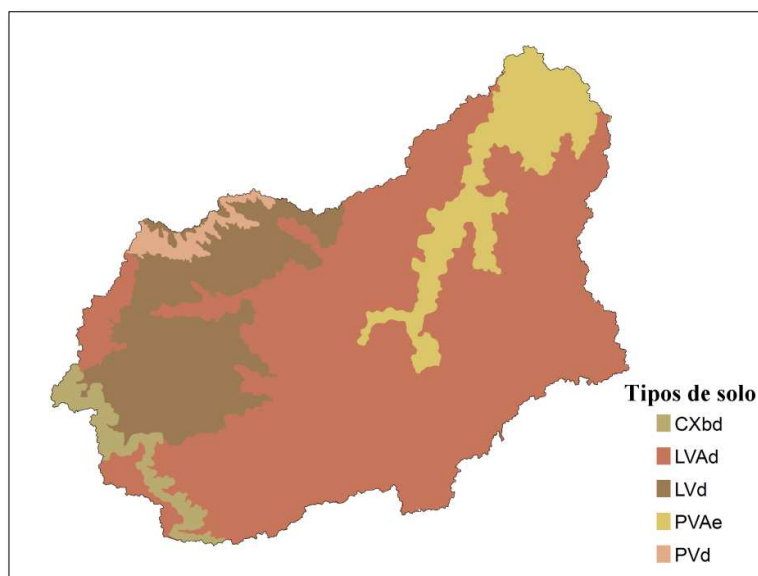


Figura 17. Mapa de solos da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga.

### 2.3 Eventos de Precipitação

A partir dos registros históricos de precipitação e vazão, selecionou-se eventos extremos em que houve a ocorrência de enchentes na bacia. De acordo com o Sistema de Alerta Contra Cheias (CPRM, 2013), a vazão de enchente na foz da bacia é de aproximadamente 507 m<sup>3</sup>/s. Assim, foram selecionadas datas de eventos em que este valor de vazão foi superado:

- (i) 1985 – ocorreu entre 22 de janeiro e 1 de fevereiro e teve como pico de enchente uma vazão de 873 m<sup>3</sup>/s no dia 29 de janeiro;
- (ii) 1991 – ocorreu entre 14 e 24 de janeiro e teve como pico de enchente uma vazão de 936 m<sup>3</sup>/s no dia 19 de janeiro;
- (iii) 2005 – ocorreu entre 2 e 9 de março de 2005 e teve como pico de enchente uma vazão de 732 m<sup>3</sup>/s no dia 6 de março.

### 2.4 Cobertura do solo

A fim de obter representação das condições de cobertura do solo aproximadas às dos eventos de cheias, procurou-se por imagens de satélite de datas próximas à ocorrência desses, no intervalo máximo de cinco anos que precederam ou sucederam os eventos de enchentes. Para representar a

condição de cobertura do solo do evento de 1985, utilizou-se imagem de 1985 (4 de julho). Porém, em relação aos eventos de 1991 e 2005, só foi possível obter imagens de boa qualidade referentes aos anos de 1996 (18 de julho) e 2008 (5 de setembro) respectivamente. Imagens de datas mais próximas apresentaram grande porcentagem de áreas encobertas por nuvens, o que tornou inviável a utilização destas para a identificação da cobertura do solo.

Empregou-se a tecnologia de Processamento Digital de Imagens (PDI) para identificação dos tipos de cobertura do solo através de classificação de imagens, por meio da qual foram produzidos três mapas, na escala aproximada de 1:150.000. Para cada data, as imagens foram mosaicadas e ortorretificadas, no software Erdas Imagine<sup>®</sup>, e submetidas ao processo de classificação, no software ArcGIS<sup>®</sup>. A partir das cenas mosaicadas, foram feitos recortes correspondentes aos limites da área de estudo. Em seguida realizou-se o processo de ortorretificação, utilizando-se como base de referência, para amostragem de pontos de controle, imagens previamente ortorretificadas pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) datadas de 2006 e 2007. Procedeu-se, então, à classificação supervisionada das imagens através do algoritmo classificador de Máxima Verossimilhança (Maxver). Conforme análise das imagens e visitas a campo, as categorias de cobertura do solo predominantes na região foram: floresta (vegetação de porte arbóreo: mata e eucalipto), pastagem, agricultura, solo exposto, área urbana e água.

Em seguida, procedeu-se à análise das mudanças na cobertura do solo por meio da ferramenta *Land Change Modeler* (LCM), disponível no software Idrisi. Através do LCM pode-se avaliar os ganhos e perdas e as contribuições individuais de cada classe para as mudanças de cobertura entre as datas analisadas (Eastman, 2009).

## **2.5 Simulação Hidrológica – Modelo HEC-HMS**

A aplicação do software HEC-HMS no processo de simulação hidrológica seguiu alguns passos, que podem ser resumidos em:

- 1) Delimitação das sub-bacias de contribuição;
- 2) Seleção de métodos e parâmetros a serem utilizados;
- 3) Determinação da precipitação;
- 4) Calibração e validação do modelo;
- 5) Simulação de cenários.

### **2.5.1 Sub-bacias de contribuição**

Por meio de ferramentas disponibilizadas pelo software ArcGIS<sup>®</sup>, a Bacia do Rio Piranga foi subdividida em sete sub-bacias (Fig. 18), das quais foram extraídos parâmetros fisiográficos e hidrológicos para a simulação no software HEC-HMS. O fator determinante para a delimitação das sub-bacias foi a localização das estações fluviométricas com dados de série histórica disponíveis na região. As sub-bacias e suas respectivas áreas de drenagem foram delimitadas de modo que a foz de cada uma delas coincidissem com a localização de uma das estações fluviométricas. Tal critério foi assumido a fim de possibilitar a comparação entre os hidrogramas de cheia observados e os hidrogramas de cheia simulados pelo HEC-HMS. A representação do modelo físico da Bacia do Rio Piranga para simulação hidrológica é apresentada na Fig. 18. Nesta figura observa-se a delimitação das sub-bacias e os elementos que representam suas respectivas áreas de drenagem. Além disso, são apresentados os canais, que simbolizam os rios com maior acúmulo de fluxo.

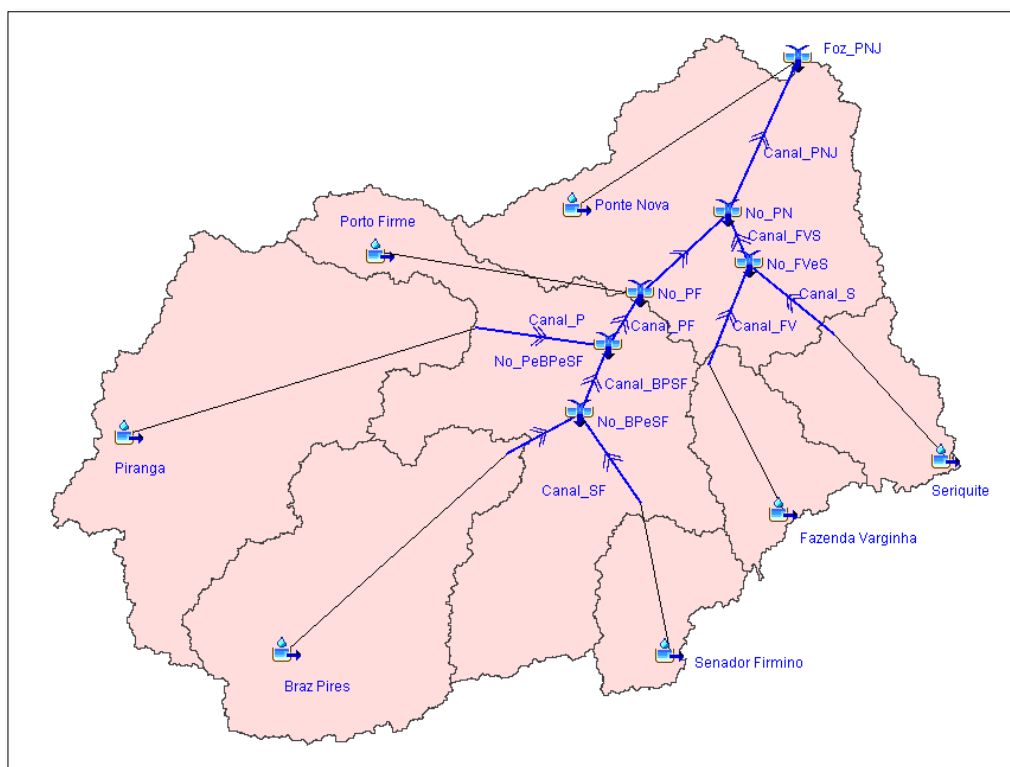


Figura 18. Modelo físico da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga no software HEC-HMS.

É preciso destacar que a área de drenagem apresentada na Fig. 18 não coincide exatamente com a da Bacia Hidrográfica do Rio Piranga, pois a primeira foi delimitada a partir da estação fluviométrica Piranga, que se encontra no município de Ponte Nova. Isso foi feito para possibilitar a comparação entre os hidrogramas simulados e observados. Assim, devido à falta de estações fluviométricas à jusante de Ponte Nova, uma área de drenagem de 385 km<sup>2</sup>, que pertence ainda à Bacia do Piranga, não foi considerada neste estudo. Portanto, a área total da bacia contemplada na simulação foi de aproximadamente 6215 km<sup>2</sup>.

### 2.5.2 Representação dos processos hidrológicos

A fim de verificar a participação da cobertura do solo na produção de escoamento superficial ao longo do tempo, adotou-se métodos sensíveis às alterações desse parâmetro. Os processos hidrológicos utilizados para a representação dos eventos de cheias foram: (i) infiltração/escoamento; (ii) propagação de cheias; e (iii) transformação chuva-deflúvio. Todos os processos hidrológicos foram simulados no software HEC-HMS.

### *Infiltração/Escoamento*

Para a simulação do processo de infiltração/escoamento, adotou-se o Método *SCS Curve Number* (SCS, 1972). Segundo Pruski et al. (2008), por meio deste método é possível estimar a lâmina de escoamento superficial a partir de dados de precipitação e parâmetros da bacia. Para a representação deste processo, foram utilizados como parâmetros as abstrações iniciais (Ia) e o número da curva (CN) referentes a cada sub-bacia (Tabela 7). O valor do CN pode variar entre cerca de 30 e 100 (Halwatura e Najim, 2013) e depende do tipo, condições de cobertura e umidade do solo no período que antecede a determinado evento de precipitação. Pequenos valores indicam alta permeabilidade do solo. Por outro lado, à medida que o CN aumenta, maior é o grau de impermeabilização e, consequentemente, maior o escoamento superficial.

Os valores de CN foram definidos com base nos valores tabelados disponibilizados por Pruski et al. (2008). Para isso, foram utilizadas informações dos mapas de solo e de cobertura do solo da bacia. Além disso, a fim de considerar condição de umidade antecedente média do solo, adotou-se a condição AMC II (*Antecedent Moisture Condition*), que se caracteriza por um total precipitado de 35 a 52,5 mm nos cinco dias anteriores ao evento (Tucci, 2000). Obteve-se então o valor de CN referente a cada tipo de cobertura encontrada em cada tipo de solo. Em seguida, por meio de média ponderada, calculou-se o CN composto referente a cada uma das sete sub-bacias em cada data. O mesmo procedimento foi realizado variando-se as condições de cobertura do solo dos anos de 1985, 1996 e 2005. Os valores de CN referentes a cada cobertura e tipo de solo foram mantidos constantes, com exceção das pastagens. A fim de representar as consequências da falta de manejo e a degradação destas com o passar do tempo, simulou-se a degradação de sua condição hidrológica baseando-se novamente na tabela de valores de CN disponibilizada por Pruski et al. (2008). Foi considerado que em 1985 a condição hidrológica das pastagens era “boa”, em 1996 “regular” e em 2005 “má”. Assim, na prática, representou-se um aumento gradativo do valor de CN da pastagem com o passar do tempo.



### *Propagação de cheias*

Para a representação do processo de propagação de cheias nos canais, rios e córregos da bacia, utilizou-se o método de “*Muskingum-Cunge*”. Como parâmetros, o método requer características como: comprimento, largura média, declividade média, forma e coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ). Utilizou-se neste estudo os valores definidos por Assis (2012) para cada parâmetro, que são apresentados na Tabela 5. A caracterização dos canais foi feita através de análises espaciais, visitas a campo e consulta a imagens de satélite.

Tabela 5. Parâmetros do Método de Propagação de cheias em canais.

| <b>Canal</b> | <b>Comprimento<br/>(m)</b> | <b>Declividade<br/>média (m/m)</b> | <b><math>n</math></b> | <b>Forma da<br/>seção</b> | <b>Largura<br/>média<br/>(m)</b> |
|--------------|----------------------------|------------------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Canal_P      | 35.466                     | 0,095                              | 0,535                 | Retangular                | 30                               |
| Canal_BP     | 28.615                     | 0,129                              | 0,190                 | Retangular                | 15                               |
| Canal_SF     | 16.950                     | 0,113                              | 0,170                 | Retangular                | 5                                |
| Canal_FV     | 12.943                     | 0,123                              | 0,447                 | Retangular                | 5                                |
| Canal_S      | 14.475                     | 0,117                              | 0,474                 | Retangular                | 6                                |
| Canal_BPSF   | 24.194                     | 0,124                              | 0,494                 | Retangular                | 30                               |
| Canal_PF     | 24.360                     | 0,105                              | 0,613                 | Retangular                | 45                               |
| Canal_PFPN   | 42.350                     | 0,114                              | 0,732                 | Retangular                | 50                               |
| Canal_FVS    | 32.079                     | 0,109                              | 0,160                 | Retangular                | 10                               |
| Canal_PNJ    | 79.654                     | 0,089                              | 0,732                 | Retangular                | 60                               |

### *Transformação chuva-deflúvio*

A transformação da precipitação excedente em escoamento superficial foi representada pelo método “*SCS Unit Hydrograph*”. Este método requer apenas o fornecimento do tempo de retardamento (Lag-time) referente a cada sub-bacia. De acordo com USACE (2000), o Lag-time varia entre 0,5 e 0,75 vezes o tempo de concentração ( $T_c$ ) e geralmente é considerado como aproximadamente 60% do  $T_c$ .

### 2.5.3 Precipitação

A partir dos dados das séries históricas das estações pluviométricas foi possível produzir mapas de precipitação relativos a cada dia dos eventos analisados. A espacialização das chuvas foi obtida através do método de interpolação *Inverse Distance Weighted* (IDW), apresentado na Eq. (1).

$$\hat{z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i) \cdot d_{ij}^{-r}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-r}} \quad (1)$$

em que  $x_i$  são os pontos amostrados,  $d$  a distância até o ponto e  $r$  a potência.

A partir dos mapas de precipitação foi possível determinar a precipitação média diária incidente em cada sub-bacia da área de estudo. Este mesmo procedimento foi realizado para cada dia das chuvas de 1985, 1991 e 2005.

### 2.5.4 Calibração e validação

Utilizou-se registros das séries históricas das estações pluviométricas e fluviométricas referentes ao evento de 1985 para o procedimento de calibração do modelo. Em seguida, procedeu-se a validação utilizando-se registros de 1991 e 2005.

A calibração foi executada em três etapas: (i) Simulação com parâmetros iniciais; (ii) Calibração manual; e (iii) Calibração automática. Inicialmente, ajustou-se os parâmetros manualmente de modo a obter melhor representação do comportamento hidrológico da bacia, analisando-se os hidrogramas calculados e observados. Em seguida, utilizou-se a função objetivo *Peak-weighted RMS error* para comparação dos hidrogramas. Essa função objetivo foi escolhida por priorizar a comparação e o ajuste das magnitudes e dos tempos de ocorrência dos picos de cheia (Tramblay et al., 2012). Através do método *Univariate-Gradient*, ajustou-se automaticamente os parâmetros a fim de minimizar os valores da função objetivo.

Para a validação do modelo foram utilizados o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ). O coeficiente

NSE, apresentado na Eq. (2), é frequentemente empregado para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{obs} - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_{obs} - \bar{E})^2} \quad (2)$$

onde  $n$  é o número de observações durante o evento,  $E_{obs}$  são os valores observados,  $E_s$  são os valores simulados e  $\bar{E}$  é a média dos valores observados. Por meio do NSE, pode-se estimar a precisão do modelo comparando-se os valores simulados com os observados. (Nash e Sutcliffe, 1970). Seus valores variam de  $-\infty$  até 1, sendo que quanto mais próximo do valor 1, melhor é o ajuste do modelo.

O coeficiente  $R^2$ , apresentado na Eq. (3), também foi utilizado para avaliar o ajuste do modelo. Este coeficiente, que varia de 0 a 1 (melhor ajuste), indica a correlação entre os valores simulados e observados (Meenu et al., 2012).

$$R^2 = \frac{[\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}}) \cdot (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})]^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \cdot \sum (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2} \quad (3)$$

onde  $Q_{sim}$  é o valor simulado,  $Q_{obs}$  é o valor observado,  $\overline{Q_{sim}}$  é a média do valor simulado, e  $\overline{Q_{obs}}$  é a média do valor observado.

### 2.5.5 Simulação de cenários

Avaliou-se cenários em que foram simulados os efeitos dos três eventos de chuva variando-se as condições de cobertura do solo de 1985, 1991 e 2005. Foram fixadas as datas das chuvas e os dados de registros históricos destas e variou-se os valores de número da curva referentes à cobertura do solo de cada ano. Com isso pretendeu-se avaliar a influência das mudanças de cobertura do solo no comportamento hidrológico da bacia. Por meio de simulação hidrológica, avaliou-se as seguintes situações principais:

- a) Chuva de 1985 ocorrendo em 1991 e 2005.
- b) Chuva de 1991 ocorrendo em 1985 e 2005.
- c) Chuva de 2005 ocorrendo em 1985 e 1991.

### 3 Resultados e discussões

#### 3.1 Mapas de cobertura do solo

Como resultado da classificação de imagens, foram obtidos os mapas de cobertura do solo referentes aos anos de 1985, 1996 e 2008 (Figuras 19, 20 e 21). Os valores calculados das áreas referentes a cada classe são apresentados na Tabela 6. Adicionalmente, nas Figuras 22, 23 e 24 observam-se os gráficos de ganhos e perdas referentes às mudanças na cobertura do solo entre 1985 e 2008.

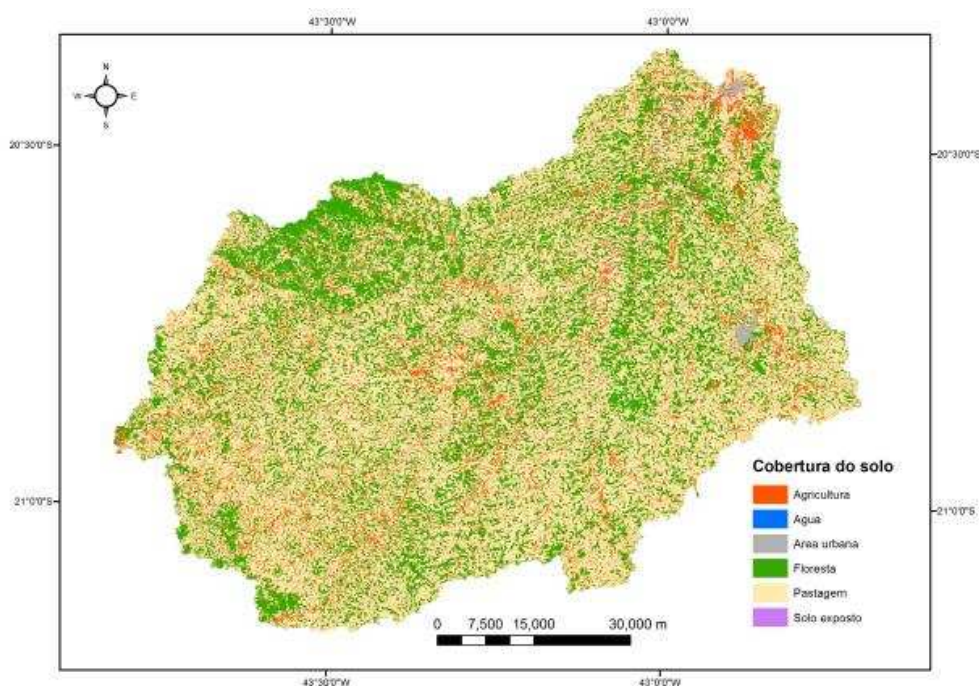


Figura 19. Mapa de cobertura do solo do ano de 1985.

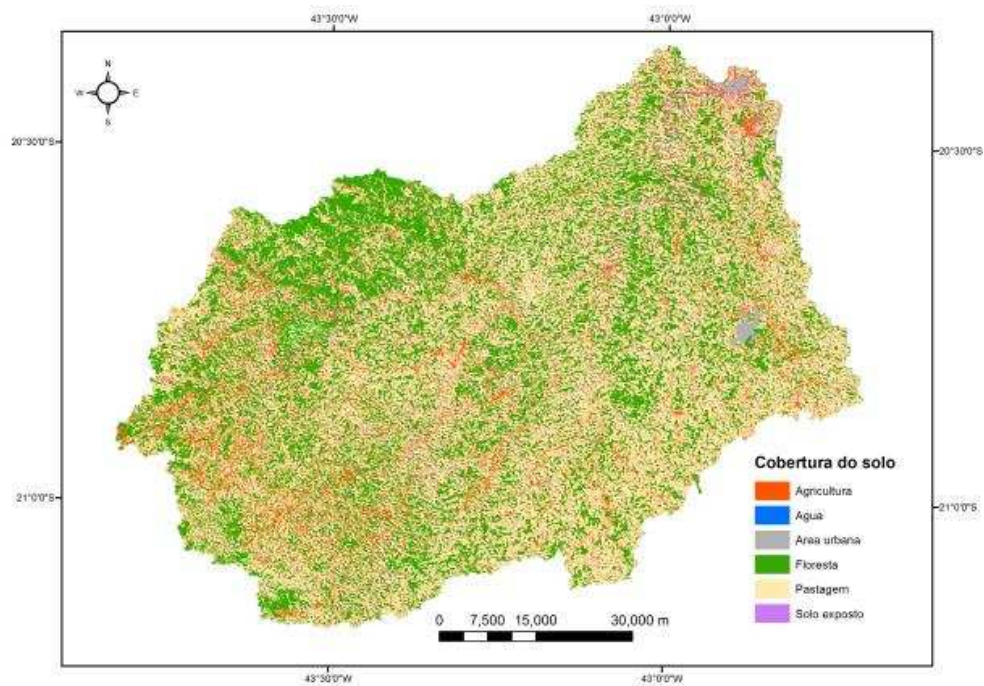


Figura 20. Mapa de cobertura do solo do ano de 1996.

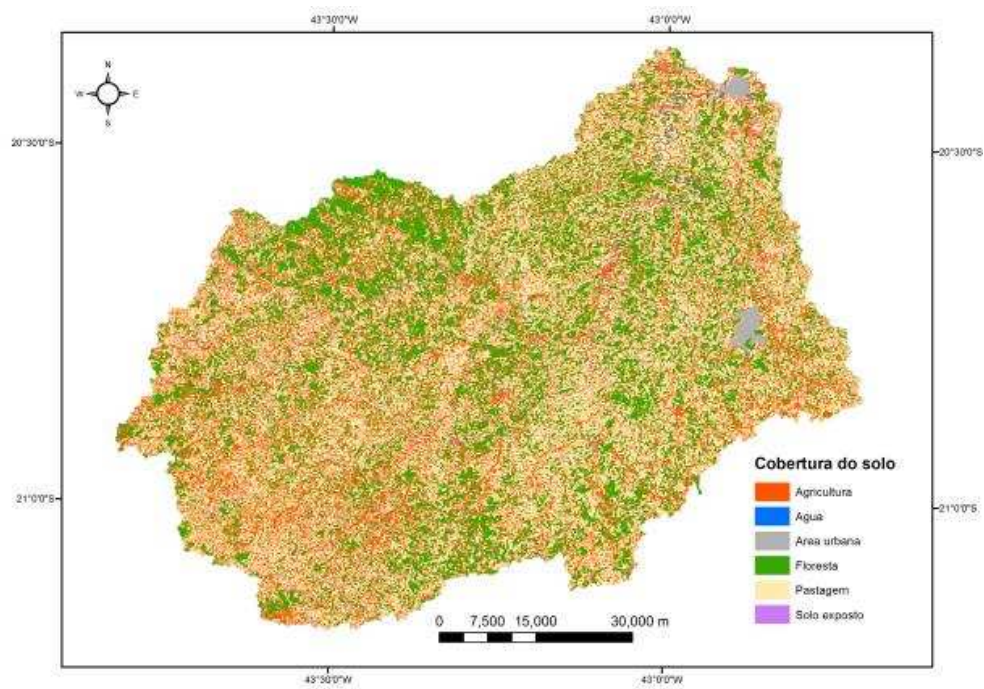


Figura 21. Mapa de cobertura do solo do ano de 2008.

Tabela 6. Porcentagens referentes aos tipos de cobertura do solo em 1985, 1996 e 2008.

| Tipo de cobertura | 1985                    |      | 1996                    |      | 2008                    |      |
|-------------------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|
|                   | Área (Km <sup>2</sup> ) | (%)  | Área (Km <sup>2</sup> ) | (%)  | Área (Km <sup>2</sup> ) | (%)  |
| Agricultura       | 732                     | 11.8 | 721                     | 11.6 | 1581                    | 25.4 |
| Água              | 6                       | 0.1  | 7                       | 0.1  | 16                      | 0.3  |
| Área Urbana       | 12                      | 0.2  | 17                      | 0.3  | 31                      | 0.5  |
| Floresta          | 1907                    | 30.7 | 2082                    | 33.5 | 1670                    | 26.9 |
| Pastagem          | 3501                    | 56.3 | 3171                    | 51   | 2758                    | 44.3 |
| Solo exposto      | 57                      | 0.9  | 217                     | 3.5  | 159                     | 2.6  |

Entre os anos de 1985 e 1996 (Fig 22), observou-se um pequeno aumento percentual das áreas urbanas e de solo exposto. Além disso, houve um significativo aumento nas áreas de floresta, classe em que foram incluídas as matas e os plantios de eucalipto. Esse acréscimo de área se deve principalmente à cultura do eucalipto, visto que as atividades de reflorestamento são praticamente inexistentes na bacia. As áreas de pastagem diminuíram e a agricultura se manteve praticamente estável durante esse período.

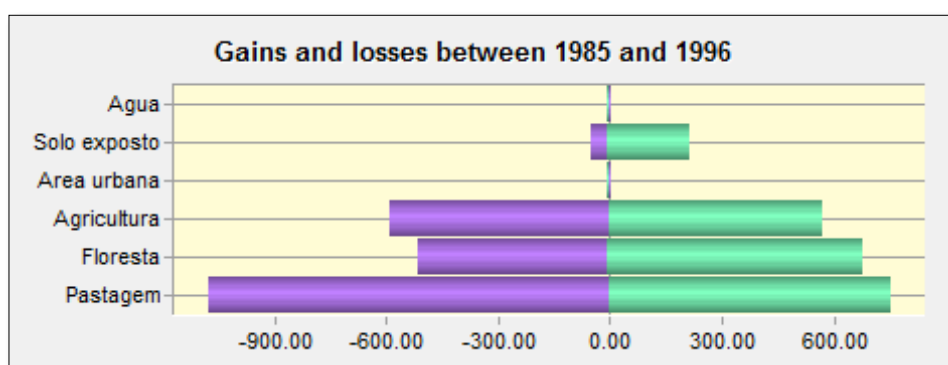


Figura 22. Ganhos e perdas de área (Km<sup>2</sup>) para cada classe de cobertura entre 1985 e 1996.

Entre os anos de 1996 e 2008 (Fig. 23) também houve pequeno crescimento das áreas urbanas, mas desta vez os solos expostos diminuíram. Destaca-se neste período o expressivo aumento da agricultura, que passou de 11,6%

da área da bacia para 25,4%. Isso se deve, principalmente, ao avanço sobre as áreas de floresta e pastagem, o que pode ser observado na Fig. 24.

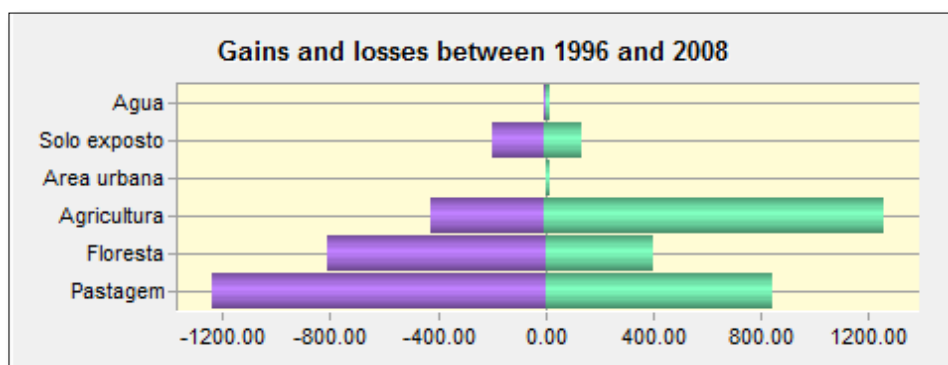


Figura 23. Ganhos e perdas de área (Km²) para cada classe de cobertura entre 1996 e 2008.

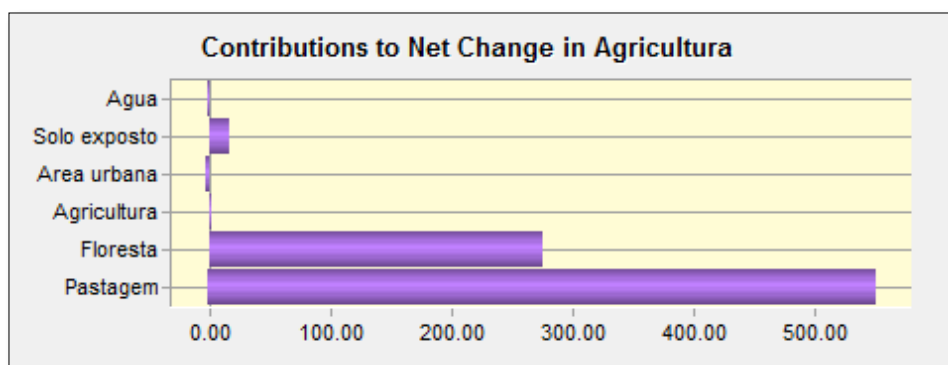


Figura 24. Contribuição de área (Km²) de cada classe de cobertura para a agricultura entre 1996 e 2008.

### 3.2 Simulação Hidrológica - Modelo HEC-HMS

#### 3.2.1 Calibração e validação

Foram calibrados os parâmetros  $I_a$  e Lag-time, que fazem parte respectivamente dos métodos de infiltração/escoamento e transformação chuva-deflúvio. Os valores iniciais e otimizados destes parâmetros são apresentados na Tabela 7, assim como as áreas de drenagem e os valores de número da curva de cada sub-bacia.

Os coeficientes NSE e  $R^2$  foram calculados considerando-se os valores simulados e observados a partir do início de ascensão dos picos de cheia.

Assim, para o evento de 1985 a análise começa no dia 24 de janeiro; para o evento de 1991 começa no dia 17 de janeiro; e para o evento de 2005 começa no dia 3 de março.

Tabela 7. Áreas de drenagem, CN e parâmetros calibrados referentes às sub-bacias analisadas.

| Sub-bacia                | Área<br>(km <sup>2</sup> ) | CN<br>1985 | CN<br>1991 | CN<br>2005 | Parâmetros calibrados |              |            |              |
|--------------------------|----------------------------|------------|------------|------------|-----------------------|--------------|------------|--------------|
|                          |                            |            |            |            | Iniciais              |              | Otimizados |              |
|                          |                            |            |            |            | Ia<br>(mm)            | Lag<br>(min) | Ia<br>(mm) | Lag<br>(min) |
| Piranga                  | 1397                       | 62.7       | 66.2       | 72.9       | 10.0                  | 363.6        | 0.4        | 454.5        |
| Bráz Pires               | 1091                       | 62.4       | 71.4       | 73.7       | 10.0                  | 333.1        | 0.6        | 450.0        |
| Senador<br>Firmino       | 298                        | 61.4       | 66.6       | 71.4       | 10.0                  | 199.7        | 171.6      | 227.3        |
| Fazenda<br>Varginha      | 328                        | 60.8       | 66.4       | 72.3       | 100.0                 | 205.6        | 152.2      | 227.3        |
| Seriquite                | 342                        | 62.2       | 67.6       | 74.0       | 100.0                 | 207.2        | 152.2      | 228.4        |
| Porto<br>Firme           | 1470                       | 62.2       | 66.5       | 71.8       | 100.0                 | 374.3        | 191.6      | 456.8        |
| Ponte<br>Nova<br>Jusante | 1294                       | 64.6       | 68.9       | 73.9       | 100.0                 | 364.9        | 225.0      | 456.8        |

Na Fig. 25 são apresentados os hidrogramas simulado (Q simulada) e observado (Q observada) referentes à calibração do modelo entre 22 de janeiro e 1 de fevereiro de 1985, além da precipitação média (P média) incidente na bacia em cada dia.



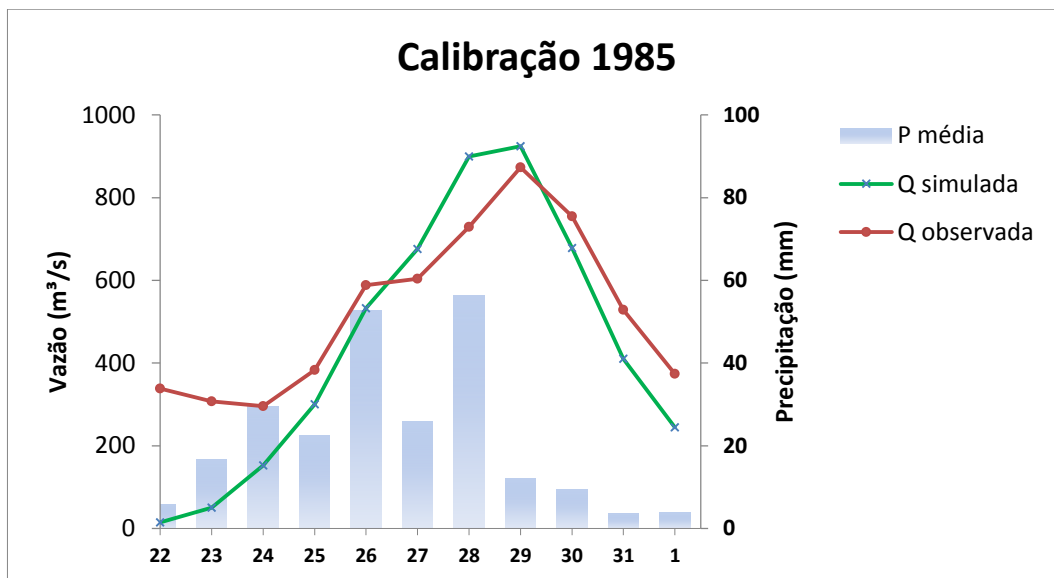


Figura 25. Resultado do processo de calibração do modelo com o evento de chuva de 1985.

Com base tanto na análise qualitativa, comparação visual entre os hidrogramas simulado e observado, quanto quantitativa, por verificação do NSE e  $R^2$ , considerou-se satisfatória a etapa de calibração. O modelo calibrado foi capaz de reproduzir com boa concordância o comportamento da bacia diante de evento extremo de chuva. Houve discrepância entre os valores simulados e observados no início do evento, porém notou-se bom desempenho a partir do início da ascensão do hidrograma observado. Isso pode ser explicado pelo uso da função objetivo *Peak-weighted RMS error* na etapa de calibração do modelo, função esta que prioriza o ajuste dos picos de enchentes. Além disso, a subestimativa das vazões no início do evento atribui-se aos altos valores calibrados para o parâmetro abstrações iniciais (Ia).

O pico de vazão simulado ocorreu no mesmo dia do observado e seu valor foi superestimado em 51 m³/s, o que representa 5,8 % de discrepância (Tabela 8). Considerou-se satisfatórios os valores obtidos para o coeficiente NSE e  $R^2$ , respectivamente 0,66 e 0,92. Segundo Moriasi et al. (2007), em geral, valores de NSE superiores a 0,50 podem ser considerados adequados. Além disso, ao trabalhar com dados diários de precipitação e vazão, outros autores (Meenu et al., 2012; Yimer et al., 2009 e Assis, 2012) obtiveram resultados similares em relação ao NSE.

Foram utilizados na validação do modelo os valores otimizados dos parâmetros durante a etapa da calibração. Nas Figuras 26a e 26b são apresentados os hidrogramas (simulados e observados) e as precipitações médias incidentes na bacia referentes à validação do modelo com os eventos de chuva de 1991 (14 a 24 de janeiro) e 2005 (2 a 9 de março).

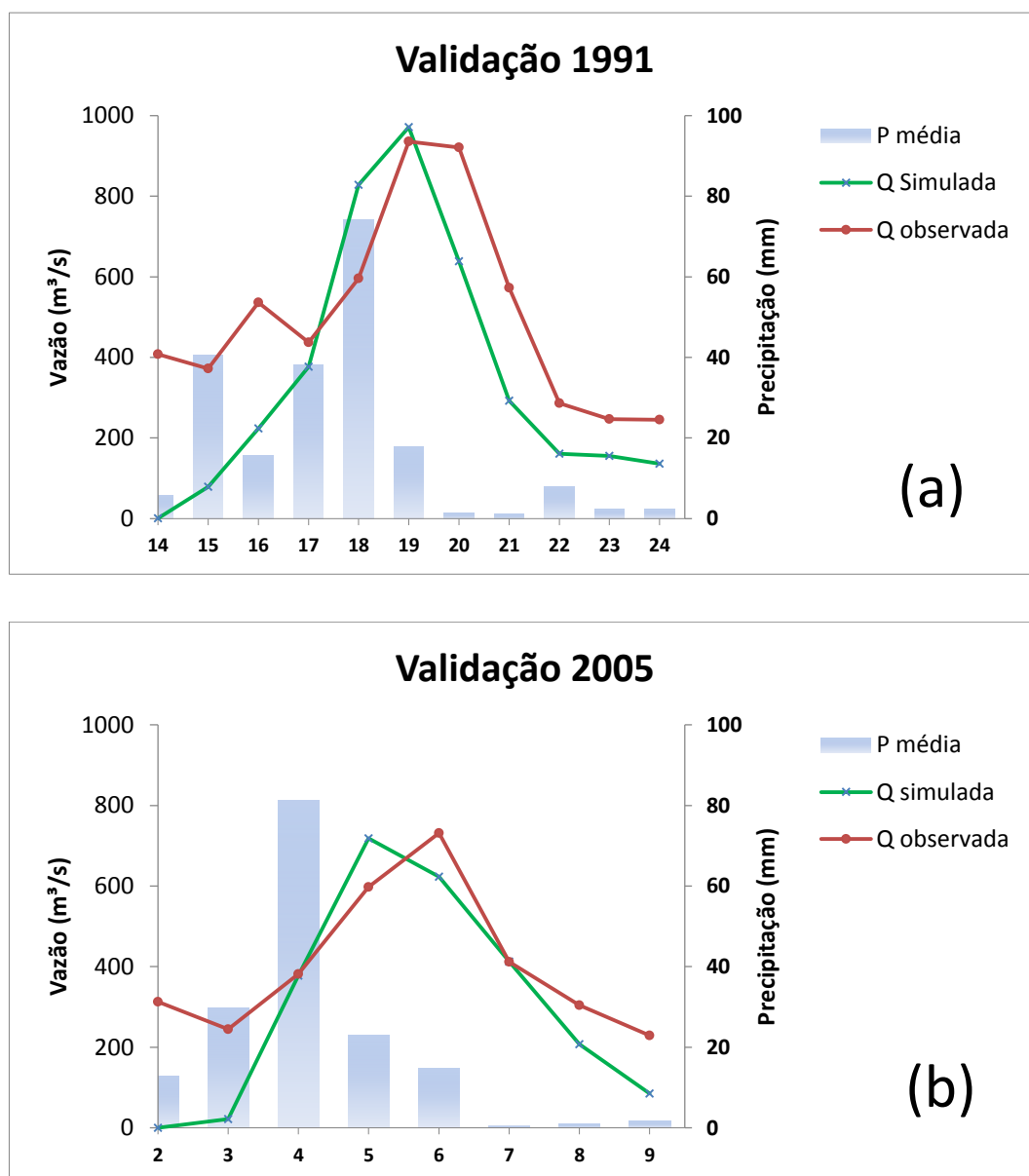


Figura 26. Resultados dos processos de validação do modelo com os eventos de chuva dos anos de 1991 (a) e 2005 (b).

Assim como na calibração, os resultados da validação foram considerados adequados tanto qualitativa quanto quantitativamente. Observa-se nas Figuras 26a e 26b que os valores simulados acompanham os observados na

maior parte dos dias. É preciso destacar que, em ambos os eventos, o modelo subestimou as vazões nos primeiros dias. Porém, representou adequadamente o comportamento da bacia a partir do início da ascensão dos picos. Em relação à validação com o evento de 1991, o pico de vazão foi superestimado em 35 m³/s, o que representa 3,7 % de discrepância (Tabela 8). Já no caso do evento de 2005 a diferença foi menor (1,8 %), sendo que houve subestimativa de 13 m³/s do valor de pico simulado em relação ao observado. Porém, desta vez, o pico simulado ocorreu um dia antes do observado. Os valores de NSE e R² obtidos foram inferiores aos da calibração, ainda assim podem ser considerados aceitáveis e satisfatórios. Obteve-se NSE de 0,54 e R² de 0,74 para o evento de 1991 e NSE de 0,50 e R² de 0,86 para o evento de 2005.

Tabela 8. Vazões e tempos de pico simulados e observados nas etapas de calibração e validação.

|                            | Variável                | Simulado | Observado | D    | Dp   |
|----------------------------|-------------------------|----------|-----------|------|------|
| <b>Calibração<br/>1985</b> | Vazão de pico<br>(m³/s) | 924      | 873       | + 51 | 5,8  |
|                            | Tempo de pico           | 29-jan   | 29-jan    | 0    | ---- |
| <b>Validação<br/>1991</b>  | Vazão de pico<br>(m³/s) | 971      | 936       | + 35 | 3,7  |
|                            | Tempo de pico           | 19-jan   | 19-jan    | 0    | ---- |
| <b>Validação<br/>2005</b>  | Vazão de pico<br>(m³/s) | 719      | 732       | - 13 | 1,8  |
|                            | Tempo de pico           | 05-mar   | 06-mar    | -1   | ---- |

D – Diferença (m³/s e dias); Dp – Diferença percentual (%).

### 3.2.2 Simulação de cenários

Na Tabela 9 apresenta-se os principais resultados da simulação de cenários com vistas à avaliação dos efeitos das mudanças de cobertura do solo nas vazões da bacia. Os picos simulados em cada cenário são comparados com os picos observados originais apresentados na Tabela 8.

Tabela 9. Vazões de pico simuladas e observadas para cada cenário avaliado.

|                       | <b>Cobertura<br/>do solo</b> | <b>Pico<br/>Simulado<br/>(m³/s)</b> | <b>Pico<br/>Observado<br/>(m³/s)</b> | <b>D (m³/s)</b> | <b>Dp (%)</b> |
|-----------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|---------------|
| <b>Chuva<br/>1985</b> | 1991                         | 997                                 | 873                                  | + 124           | 14,2          |
|                       | 2005                         | 1066                                | 873                                  | + 193           | 22,1          |
| <b>Chuva<br/>1991</b> | 1985                         | 885                                 | 936                                  | - 51            | 5,4           |
|                       | 2005                         | 1041                                | 936                                  | + 105           | 11,2          |
| <b>Chuva<br/>2005</b> | 1985                         | 555                                 | 732                                  | - 177           | 24,2          |
|                       | 1991                         | 641                                 | 732                                  | - 91            | 12,4          |

D – Diferença (m³/s e dias); Dp – Diferença percentual (%).

Ao simular a chuva de 1985 ocorrendo em condições de cobertura do solo referentes a 1991 e 2005, observou-se aumento de 124 e 193 m³/s, respectivamente, na vazão de pico, o que representa vazões 14,2 e 22,1% maiores. Esse aumento se deve, provavelmente, ao avanço das áreas agrícolas sobre a floresta e à degradação da condição hidrológica das pastagens pela falta de práticas de conservação. Destaca-se também que, em ambas as situações, a vazão de enchente na foz da bacia (507 m³/s) foi atingida em menor tempo, aproximadamente um dia antes. Pode-se inferir que, devido às mudanças de cobertura do solo na bacia, à medida que o tempo passa uma mesma chuva tem maior potencial para causar enchente na bacia. Ou ainda, sob outro ponto de vista, chuvas de magnitudes cada vez menores passam a ter potencial para causar enchentes.

Quanto à chuva de 1991, quando ocorre sob as condições de cobertura do solo de 1985, provoca um pico de enchente menor que o observado,

subestimando em 5,4 % a vazão na foz da bacia. Esta mesma chuva, quando simulada em 2005, causa superestimativa de 105 m<sup>3</sup>/s na vazão de pico de enchente, o que representa uma diferença de 11,2 %.

Combinando a chuva de 2005 e as condições de cobertura do solo referentes a 1985 e 1991, houve subestimativas de 177 e 91 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, na vazão de pico, o que representa vazões 24,2 e 12,4% menores. Destaca-se que, considerando a chuva de 2005 e a cobertura do solo de 1985, a vazão de pico foi de 555 m<sup>3</sup>/s. Neste cenário, o extravasamento da calha do rio seria mínimo e praticamente não haveria problema de enchente na foz da bacia.

#### **4 Conclusões**

Foram obtidos mapas de cobertura do solo referentes aos anos de 1985, 1996 e 2008 através da classificação de imagens. Por meio da análise de ganhos e perdas e de contribuições individuais de cada classe entre as datas, constatou-se principalmente que:

- Entre os anos de 1985 e 1996 observou-se pequeno aumento percentual das áreas urbanas e de solo exposto. As áreas de pastagem diminuíram e as de agricultura se mantiveram estáveis. Houve também um significativo aumento nas áreas de cobertura florestal, sobretudo devido ao plantio de eucalipto;
- Entre os anos de 1996 e 2008 houve pequeno crescimento das áreas urbanas e os solos expostos diminuíram. Foi mais expressivo o aumento da agricultura, que passou de 11,6% da área da bacia para 25,4%, avançando principalmente sobre áreas cobertas por floresta e pastagem.

As etapas de calibração e validação do modelo hidrológico foram consideradas satisfatórias tanto por análise quantitativa quanto qualitativa. Considerou-se que o modelo foi capaz de representar com boa concordância o comportamento hidrológico da bacia, principalmente no que se refere aos picos de cheia relacionados a eventos extremos de precipitação.

Os resultados obtidos com a simulação de cenários apontam para um aumento na tendência de ocorrência de enchentes devido às mudanças na cobertura do solo. Com o passar do tempo, uma mesma chuva passa a ter maior potencial para causar enchente na bacia. Ou ainda, sob outro ponto de vista, chuvas de magnitudes cada vez menores passam a ter potencial para causar enchentes. Entre as principais causas deste problema, certamente estão o avanço das áreas agrícolas sobre a cobertura florestal e a piora da condição hidrológica das pastagens por falta de práticas de conservação.

## **Referências Bibliográficas**

- Ali, M.; Khan S. J.; Aslam I. and Khan Z. (2011) Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. *Landscape Urban Plan.* 102(4): 271-279.
- Assis L. C. (2012) Simulação de processos hidrológicos na Bacia Hidrográfica do Rio Piranga. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 111.
- Camargo R. D. A. (2012) Avaliação da suscetibilidade à erosão e proposta de zoneamento estratégico com vistas à garantia da sustentabilidade para a Bacia Hidrográfica do Rio Piranga, MG. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 104.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (2013) Sistema de Alerta Contra Cheias da Bacia do Rio Doce. <http://www.cprm.gov.br/alerta/site/conteudo/tabela1.gif>. Acessado em 02 de dezembro de 2013.
- Consórcio ECOPLAN-LUME (2010) Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce.
- Eastman, J. R. (2009). Idrisi Taiga Tutorial. Tutorial version 16.02. Clark University, Worcester, MA – USA, 333p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (1999) Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Serviço de Produção de Informação, 412p.
- Fernandes Filho, E. I. F. et al. (2010) Levantamento de solos e aptidão agrícola da porção mineira da bacia do Rio Doce. Belo Horizonte: Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM).

- Halwatura, D. and Najim, M. M. M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling & Software* 46:155–162.
- HEC - Hydrologic Modeling System (2010) Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- Hunukumbura, P. B.; Weerakoon, S. B. and Herath, S. (2008) Runoff modeling in the upper Kotmale Basin. In: Hennayake, N., Rekha, N., Nawfhal, M., Alagan, R., Daskon, C. (Eds.), *Traversing No Man's Land, Interdisciplinary Essays in Honor of Professor Madduma Bandara*. University of Peradeniya, Sri Lanka, pp. 169e184.
- IGAM (2007) Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce e dos Planos de Ações de Recursos Hídricos para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce. Consórcio ECOPLAN-LUME.
- Johnson, L. E. (2009) *Geographic information systems in water resources engineering*. Ed. Ilustrada. New York: IWA Pub. 298 p.
- Lourdes, S. S. P. (2008) *Ambientes, uso e ocupação do solo e zoneamento estratégico para as subbacias dos rios Jacupiranga e Pariquera-Açu, Vale do Ribeira, SP*. 2008. 180f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- Meenu, R.; Rehana, S.; Mujumdar, P. P. (2012) Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga-Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. *Hydrological Process*.
- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50:885-900.



- Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part 1: a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282–290.
- Olang L. O.; Furst J. (2011) Effects of land cover change on flood peak discharges and runoff volumes: model estimates for the Nyando River Basin, Kenya, *Hydrological Processes*. 25: 80-89.
- Pruski, F. F.; Brandão, V. S.; Silva, D. D. (2008) *Escoamento superficial* 2. ed. Viçosa: UFV, 87 p.
- Ribeiro, C. A. A. S.; Meitner, M. J.; Veiga, M. M. (2006) Environmental protection in Brazil: where the truth lies. *Proceedings of 26th ESRI International User Conference*. San Diego, CA: [s.n.].
- SCS - Soil Conservation Service (1972) *National engineering handbook*. Section 4: Hydrology. Washington: USDA. P. 101 - 1023.
- Tramblay, Y. et al. (2012) Estimation of antecedent wetness conditions for flood modelling in Northern Morocco, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9, 9361-9390, doi:10.5194/hessd-9-9361-2012.
- Tucci, C. E. M. (2000) *Escoamento Superficial*. In: Tucci, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: ABRH-EDUSP, 943 p.
- Ty, T. V.; Sunada, K.; Ichikawa, Y. and Oishi, S. (2012) Scenario-based Impact Assessment of Land Use/Cover and Climate Changes on Water Resources and Demand: A Case Study in the Srepok River Basin, Vietnam - Cambodia. *Water Resources Management* 26, 1387–1407.
- USACE (2000) *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual*. U.S. Army Corps of engineers. [S.l.], p. 145.
- Yimer G., Andreja J., Griensven A. V. (2009) Hydrological response of a catchment to climate change in the Upper Beles River basin, Upper Blue Nile, Ethiopia. *Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine* Vol. 2.

## Conclusões Gerais

Através da abordagem utilizada neste trabalho, que foi desenvolvido na forma de dois estudos envolvendo a ocorrência de eventos extremos na Bacia do Rio Piranga, foi possível concluir que:

- A metodologia apresentada permitiu a identificação de zonas de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos de terra com boa concordância em relação às condições observadas em campo na área de estudo. A utilização de dados obtidos através de experimentação em campo propiciou maior compreensão da relação entre o escoamento superficial e os fatores declividade e cobertura do solo. Destaca-se a replicabilidade dessa metodologia em outros locais e condições ambientais distintas para identificação de zonas suscetíveis aos deslizamentos de terra.
- As etapas de calibração e validação do modelo hidrológico foram consideradas satisfatórias tanto por análise quantitativa quanto qualitativa. Considerou-se que o modelo foi capaz de representar com boa concordância o comportamento hidrológico da bacia, principalmente no que se refere aos picos de cheia relacionados a eventos extremos de precipitação.
- No período analisado, entre 1985 e 2008, as principais mudanças na cobertura do solo foram o avanço das áreas agrícolas sobre a cobertura florestal e pastagens. Além disso, observou-se um pequeno aumento das áreas urbanas e de solo exposto. Destaca-se também a piora da condição das pastagens por falta de práticas de conservação.
- Os resultados obtidos na avaliação dos cenários apontam para um aumento na tendência de ocorrência de enchentes devido às mudanças na cobertura do solo. Com o passar do tempo, uma mesma chuva passa a ter maior potencial para causar enchente na bacia. Ou ainda, sob outro ponto de vista, chuvas de magnitudes cada vez menores passam a ter potencial para causar enchentes.

Espera-se que os resultados deste estudo permitam aprimorar os conhecimentos sobre os deslizamentos de terra e as enchentes e que possam contribuir como ferramenta para gestão de riscos na Bacia Hidrográfica do Rio Piranga.