



AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS COM USO DO MODELO TRIGRS NO MUNICÍPIO DE IBIRAMA - SC

Heron Schwarz¹ & Gean Paulo Michel²

Resumo: A modelagem de estabilidade de encostas é uma ferramenta importante na avaliação e mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos e previsão de sua ocorrência. Neste trabalho é aplicado o modelo TRIGRS - *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope Stability Analysis*, para análise de estabilidade de encostas com relação a escorregamentos do tipo translacional raso no município de Ibirama – SC. Cinco cenários foram simulados com o TRIGRS, variando a precipitação (0 mm e 83,4 mm) e a profundidade do lençol freático anterior a precipitação (1,0 m, 0,75 m, 0,45 m e 0,01 m). Foi avaliada a coincidência espacial entre áreas classificadas como instáveis pelo modelo e as cicatrizes de escorregamentos, através do cálculo de índices tradicionalmente utilizados na avaliação de modelos de estabilidade. O cenário modelado de maior concordância com as cicatrizes de escorregamento considerou precipitação de 83,4 mm em 24 horas e profundidade do lençol freático de 0,45 m, resultando em áreas instáveis em 50 % das cicatrizes. Resultados demonstraram a sensibilidade do modelo à altura do lençol freático e profundidade do solo, parâmetros de difícil estimativa. Erros obtidos no processo de modelagem foram atribuídos, principalmente, às incertezas na definição dos parâmetros de entrada do modelo.

Palavras-chave: Movimento de Massa. Estabilidade de encostas. TRIGRS.

SLOPE STABILITY ASSESSMENT USING TRIGRS MODEL IN IBIRAMA- SC REGION

Abstract: Slope stability modeling represents an important tool in estimating and mapping landslide susceptible areas. This paper demonstrates the use of TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope Stability Analysis*) model to assess the slope stability of Ibirama municipality, in SC-Brazil. Five scenarios were simulated with TRIGRS, with changes in precipitation (0 mm e 83,4 mm) and water table depth (1,0 m, 0,75 m, 0,45 m e 0,01 m). The spatial concomitance between landslide scars and areas classified as unstable by the model was calculated, through the estimative of indexes traditionally used in the evaluation of stability models. The simulated scenario with greater accordance to landslide scars considered 83.4 mm of precipitation in 24 hours and an initial water table depth of 0.45 m, resulting in unstable areas inside of 50 % of the scars. Results revealed the sensibility of TRIGRS model to water table and soil depth, parameters usually difficult to estimate. Errors in the simulation process were related mostly to the uncertainties in the estimative of TRIGRS's input parameters.

Keywords: Mass movement. Slope stability. TRIGRS.

¹ Mestrando do Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - UFRGS/IPH, heron.sch@gmail.com

² Professor do Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - UFRGS/IPH, gean.michel@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

O século XX caracterizou-se por um crescimento sem precedentes na população mundial. A população brasileira, em conformidade com o visualizado em escala global, apresentou elevado crescimento no período. Com a intensa urbanização ocorrida neste período, a população passou a formar grandes aglomerados populacionais, frequentemente fixados ao redor de corpos hídricos. Contudo, repetidamente a fixação de residências não respeitou os limites das calhas de corpos hídricos, tornando a população suscetível e vulnerável a inundações associadas a eventos hidrológicos de elevados períodos de retorno.

Conforme Kobiyama *et al.* (2010), devido à intensa urbanização, bem como em decorrência das inundações, grande parte da população passou a fixar residências em encostas, morros e montanhas nas periferias das cidades. A sobrecarga de tais encostas, aliada a processos hidrológicos e geomorfológicos naturais e técnicas de engenharia pouco eficazes, favoreceu a ocorrência de outro tipo de desastre, os escorregamentos. Tais eventos, embora sejam processos naturais de modificação da paisagem, podem resultar em inúmeros impactos ambientais, sociais e econômicos, podendo estar associados a um elevado número de vítimas e dano, por vezes maiores do que os gerados por inundações (MICHEL *et al.*, 2013).

A região sul do Brasil, em especial o Alto Vale do Itajaí, é conhecida pelo elevado número de desastres associados a escorregamentos de terra. Tal fator se deve, principalmente, à geomorfologia e a topografia local bastante acidentada (JANSEN e VIEIRA, 2012), bem como, ao clima subtropical, com elevados índices pluviométricos. A cidade de Ibirama – SC têm sido afetada de maneira recorrente por movimentos de massa de pequeno à médio porte, resultando em impactos sociais e econômicos elevados aos habitantes.

Este trabalho visa aplicar um modelo matemático para estimativa da estabilidade de encostas, avaliando os resultados sob diferentes cenários, com relação ao evento hidrológico de 08 de setembro de 2011 e escorregamentos por ele deflagrados.

METODOLOGIA

Características Gerais do Município

O município de Ibirama se localiza na região do Alto Vale do Itajaí, em Santa Catarina. Conta, segundo o censo populacional de 2009 (IBGE, 2010), com uma população de 17.330 habitantes distribuída ao longo de um território de 246,4 km².

O município pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí Açu, na sub-bacia do Rio Hercílio ou Itajaí do Norte, apresentando topografia fortemente acidentada, consistindo em um vale com picos de até 824 m de altitude, enquanto o centro urbano e aglomerados residenciais são localizados às margens do Rio Hercílio e seus afluentes, sob altitudes próximas de 150 m.

A região conta com frequentes escorregamentos, decorrentes de elevadas precipitações. Dentre os eventos registrados, tem destaque as precipitações de setembro de 2011 que incorreram em escorregamentos de grande porte ao longo da bacia. No município de Ibirama, as deflagrações de maior porte ocorreram no dia 08 de setembro de 2011, após uma precipitação de 83,4 mm, distribuída de maneira aproximadamente constante em 24 h.

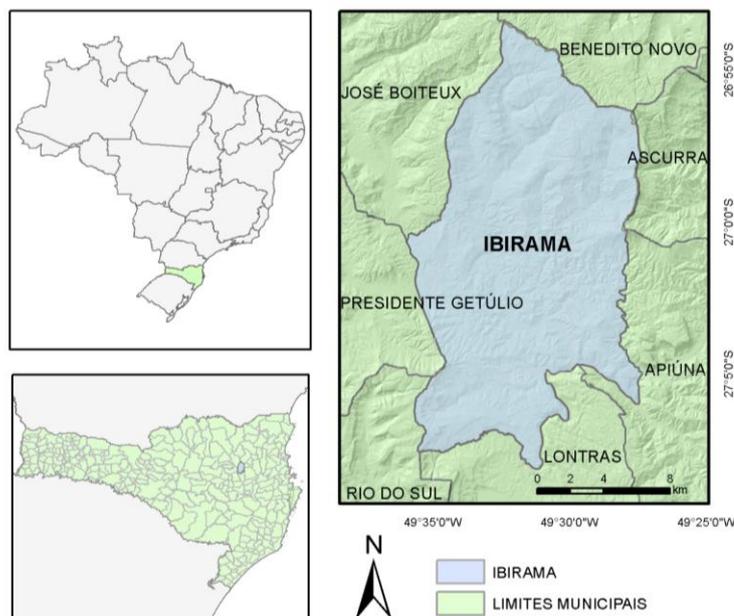


Figura 01 - Localização de Ibirama – SC.

Definição de Unidades Geotécnicas, Pontos de Amostragem e Cicatrizes de Escorregamento

Para considerar a variação dos parâmetros de entrada utilizados pelo modelo sobre a área de estudo, a região foi dividida em subáreas denominadas unidades geotécnicas (UG). Cada UG representa uma região formada por perfis de solos que possuem comportamento geotécnico supostamente similar, desta forma, a definição das UG decorre da intersecção espacial entre um tipo de solo, com base no Mapa de Reconhecimento de Solos do Estado de Santa Catarina elaborado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária em 2009, e um tipo de rocha de formação, com base na Carta Geológica da Folha Curitiba elaborada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em 2010. As operações entre mapas foram executadas utilizando o software *ArcGis*, Versão 10.3.1 de 2014 (Environmental Systems Research Institute).

A intersecção entre os tipos de solo: argissolo vermelho-amarelo, cambissolo háplico e neossolo litólico; com os tipos de rocha: magmática e sedimentar; deu origem a 6 unidades geotécnicas, sob as quais a coleta de informações e processamento de dados se baseou.

A partir dos pontos de amostragem, foi executado o ensaio de resistência mecânica do solo saturado, através do *Borehole Shear Test (BST)* inundado e coleta de amostras de solo para ensaio de granulometria, visando a identificação de parâmetros hidráulicos do solo, por pedotransferência, utilizando a ferramenta *Rosetta* (SCHAAP, *et al.*, 2001). A visita e execução de ensaios *in situ*, ocorreu entre os dias 19 e 25 de outubro de 2016, com análise de 6 pontos ao longo da área do município, contemplando as 6 unidades geotécnicas definidas.

A identificação das cicatrizes de escorregamento se deu de maneira visual sobre extensa avaliação de ortofotos posteriores ao evento, seguida de mapeamento com uso do software *ArcGis* 10.3.1.

Descrição do Modelo TRIGRS

Com o intuito de avaliar a suscetibilidade a movimentos de massa translacionais na região de Ibirama, foi aplicado o modelo TRIGRS - *Transient Rainfall Infiltration And Grid-Based Regional*

Slope-Stability, desenvolvido por Baum et al. (2002). O modelo é capaz de calcular o fator de segurança (*FS*) conforme variações na tensão total do solo.

O TRIGRS utiliza a equação (01), que é uma adaptação da equação de estabilidade para encostas infinitas, para cálculo do *FS*:

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \theta} + \frac{c - \psi(z, t) \cdot \rho_w \cdot g \cdot \tan \phi}{\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \quad (01)$$

onde: ψ é o potencial total da água no solo, sendo este uma função da profundidade do solo e do tempo. Quando o solo exhibe uma camada saturada, no interior desta camada ψ assume valores positivos, ou seja, o potencial total é representado pelo potencial de pressão. Este potencial de pressão equivale a pressão gerada pela altura da camada d'água sobre o ponto em análise. Em meio a camadas não-saturadas, ψ assume valores negativos, ou seja, o potencial total é representado pelo potencial matricial do solo. O modelo calcula o *FS* para diferentes profundidades do solo com incrementos definidos pelo usuário, a partir da superfície, até uma profundidade máxima.

O modelo TRIGRS conta com dois módulos distintos para descrever a variação do potencial total da água no solo ao longo do tempo: (i) condições iniciais saturadas; e (ii) condições iniciais não-saturadas (MICHEL, 2015). Caso a condição inicial seja de saturação, o TRIGRS baseia-se na linearização, proposta por Iverson (2000), da forma unidimensional da equação de Richards e em soluções estabelecidas por Baum et al. (2002) e Savage et al. (2003).

Na condição inicial de não saturação do solo, o solo é tratado como um sistema de duas camadas uma inferior, composta pela zona saturada somada a franja capilar e outra superior, pela camada não saturada. A camada não saturada absorve parte da água que infiltra pela superfície o restante passa por esta camada e se acumula sobre a camada saturada, aumentando a poro-pressão. O modelo utiliza a equação de Gardner (1958) para descrever a curva de retenção da água no solo, onde a umidade e a condutividade são uma função exponencial do potencial matricial do solo. Também é considerado escoamento superficial hortoniano e um método simples para estabelecer a rota do escoamento superficial oriundo das células que exibem excesso de água na superfície para as células adjacentes a jusante. Informações mais detalhadas acerca das equações utilizadas pelo TRIGRS podem ser encontradas em Baum et al. (2008).

Tabela 01 - Parâmetros de entrada do TRIGRS.

Parâmetros Operacionais	Parâmetros Mecânicos do Solo	Parâmetros Hidráulicos do Solo
<ul style="list-style-type: none"> - Número de Intervalos verticais de cálculo. - Número de termos das soluções para profundidade finita ou infinita. - Profundidade superficial a partir da qual será computada a carga de pressão. - Número de linhas e colunas do raster. 	<ul style="list-style-type: none"> - Teor volumétrico residual de água. - Teor volumétrico de água no solo saturado. - Parâmetro α da equação de Gardner (1958). - Peso específico do solo. - Coesão do solo. - Profundidade máxima. - Ângulo de atrito interno. 	<ul style="list-style-type: none"> - Condutividade hidráulica saturada vertical do solo. - Intensidade da chuva para cada intervalo. - Duração acumulada de cada intervalo. - Difusividade hidráulica. - Altura inicial do lençol freático. - Tempo inicial da precipitação. - Taxa de infiltração inicial. - Peso específico da água.

A entrada de dados do modelo TRIGRS é feita primeiramente através das informações de declividade e direção de fluxo, obtidas pelo Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de aplicação. O modelo depende também de parâmetros relacionados às propriedades hidráulicas, pedológicas e pluviométricas, expostas na Tabela 01 (BAUM *et al.*, 2002). Os parâmetros hidráulicos e

pedológicos podem ser inseridos no modelo de forma uniforme para toda região de estudo, ou distribuídos em unidades mapeadas. Além dos dados citados, o modelo depende de parâmetros de operação específicos.

Aplicação do Modelo

A aplicação do modelo ao município de Ibirama – SC, teve por base o evento pluviométrico de 08 de setembro de 2011 de 83,4 mm em 24 h de precipitação e os escorregamentos por ele deflagrados. Para avaliação das características topográficas da área de estudo foi utilizado o material gerado pelo levantamento aerofotogramétrico do estado de Santa Catarina, disponibilizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável de SC (SDS) por meio do Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina. Este levantamento gerou um Modelo Digital de Terreno (MDT) SG-22-Z utilizado, na escala 1:10.000. Além disso, na aplicação do modelo também foram utilizados dados de precipitação (Estação Ibirama-CEOPS-FURB), e dados pedológicos e hidráulicos levantados através de ensaios de campo. Considerou-se a espessura de solo uniforme em 105 cm e foram simulados quatro cenários de profundidade da camada saturada de solo: 100 cm, indicando um solo majoritariamente seco, 75cm e 45cm, indicando um solo parcialmente saturado e 1cm, indicando um solo majoritariamente saturado.

Nas diversas simulações, o objetivo do modelo foi representar a situação ocorrida em setembro de 2011, através da coincidência espacial de áreas com fator de segurança menor do que 1,00 e áreas em que efetivamente ocorreram escorregamentos. A análise de concordância das simulações foi feita através do cálculo dos Índice de Acerto (*IA*), Índice de Erro (*IE*) e sua relação, propostos por Sorbino et al. (2010) nas equações 02 e 03.

$$IA = \frac{\sum \left(\frac{A_{dentro}}{A_{instável}} \right)}{n} \quad (02)$$

$$IE = \frac{\sum \left(\frac{A_{fora}}{A_{estável}} \right)}{n} \quad (03)$$

onde: A_{dentro} é a área considerada instável pelo modelo que está dentro das cicatrizes de escorregamento; A_{fora} é a área considerada instável pelo modelo que ficou fora das cicatrizes; $A_{instável}$ é a área das cicatrizes; $A_{estável}$ é a área da encosta que não está inclusa nas cicatrizes; e n é o número de cicatrizes de escorregamentos ou encostas analisadas. Para comparação das simulações e adoção do cenário de maior concordância, geralmente adota-se como critério o maior valor na relação IA/IE (SORBINO et al., 2010; MICHEL, 2015). Através desta análise é avaliada, não apenas a taxa de acerto do modelo em representar escorregamentos nos locais onde de fato ocorreram, mas também sua capacidade de não gerar escorregamentos nos locais onde não ocorreram.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 02 apresenta o valor dos parâmetros pedológicos e hidrológicos utilizados no presete trabalho.

Os parâmetros variados em cada simulação, bem como os respectivos índices de acerto, erro e sua relação estão descritos na Tabela 03.

No cenário sem precipitação (Simulação P00H100), uma área de 4,44 % da região de estudo apresentou $FS \leq 1,00$, indicando instabilidade. Quando comparado com as áreas onde ocorreram escorregamentos ao ano de 2011, percebeu-se que nenhuma cicatriz se localizou nos pontos

considerados instáveis pela modelagem. As cicatrizes, conforme pode ser visto na Figura 02-A, se apresentaram todas em áreas com $FS > 1$.

Tabela 02 - Parâmetros adotados no modelo

UG*	1	2	3	4	5	6
θ_r (m ³ /m ³)	0.0841	0.0671	0.1024	0.0486	0.0956	0.0702
θ_s (m ³ /m ³)	0.4498	0.4117	0.5095	0.3823	0.4818	0.3950
C (kPa)	1.7	1.6	2	1.5	1.5	4.67
K_s (m/s)	1.36E-04	9.73E-05	2.46E-04	4.27E-04	1.64E-04	1.23E-04
D_0 (m ² /s)	7.00E-04	5.66E-05	1.43E-04	8.00E-04	9.47E-05	2.41E-04
γ (N/m ³)	1549.80	1811.70	1609.50	1782.30	1581.80	1795.00
α_{ga} (m ⁻¹)	0.188	0.200	0.236	0.625	0.223	0.636
φ (°)	22.538	18.778	14.842	26.335	18.004	12.680
N_{vg}	1.449	1.478	1.217	1.403	1.368	1.320
α_{vg} (cm-1)	0.010	0.010	0.019	0.033	0.013	0.024
z (m)	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05

*onde θ_r : teor volumétrico de água residual; θ_s : teor volumétrico de água no solo saturado; C : Coesão do solo; K_s : Condutividade hidráulica saturada; D_0 : Difusividade hidráulica; γ : peso específico do solo; α_{ga} : Parâmetro da equação de Gardner; φ : Ângulo de atrito interno do solo; N_{vg} e α_{vg} : Parâmetros da equação de Van Genuchten; e z : profundidade do solo.

Tabela 03 - Resultado e Codificação das Simulações.

Simulação	Precipitação (mm)	Período (horas)	Profundidade do Solo (m)	Profundidade do Lençol (m)	IA (%)	IE (%)	IA/IE	Área Instável (%)
P00H100	0,00	-	1,05	1,00	0,00	4,44	0,00	4,44
P83H100	83,40	24	1,05	1,00	2,19	7,65	0,29	7,65
P83H075	83,40	24	1,05	0,75	8,49	11,83	0,72	11,83
P83H045	83,40	24	1,05	0,45	17,86	18,91	0,94	18,91
P83H001	83,40	24	1,05	0,01	21,23	28,20	0,75	28,20

As áreas instáveis obtidas na Simulação P00H100 provavelmente estão relacionadas à incapacidade de determinar, com precisão, os parâmetros de entrada do modelo sobre toda a área de estudo. Em especial, neste caso é possível que a profundidade do solo tenha sido superestimada em alguns pontos, visto que nas áreas consideradas instáveis, mesmo sob nenhuma precipitação, percebe-se maior afloramento rochoso, frequentemente relacionado com encostas com maior declividade e, conseqüentemente, solos, se existentes, de menor profundidade incorrendo em menor tensão de cisalhamento sobre a encosta.

No cenário em que é incluída a precipitação de 83,4 mm em um período de 24 horas (Simulação P83H100), sob mesma altura de lençol freático, percebe-se um incremento das áreas instáveis, expandidas à 7,65 % da área total. Aplicando o cálculo do IA e IE aos resultados, foram obtidos valores de $IA = 2,19$ % e $IE = 7,65$ %, de forma que a relação IA/IE resultou em 0,29. Conforme Sorbino et al. (2010), valores de IA/IE menores do que 1,00 indicam um número maior de falsos positivos do que acertos quanto a estimar as áreas realmente instáveis da área de estudo. Ainda, apenas 25 % das cicatrizes tiveram ao menos um pixel definido em áreas de instabilidade do modelo (Figura 02-B).

O baixo IA obtido com a simulação P83H100, pode ser explicado pelos escorregamentos não decorrerem de uma única precipitação de elevada intensidade, mas sim em um longo período de chuvas intermitentes, culminando em um evento de maior intensidade. O baixo período de retorno da precipitação de 83,4 mm que deflagrou os escorregamentos (menor de 4 anos), corrobora para a

afirmação de que esta precipitação provavelmente não foi o único fator causal para os escorregamentos.

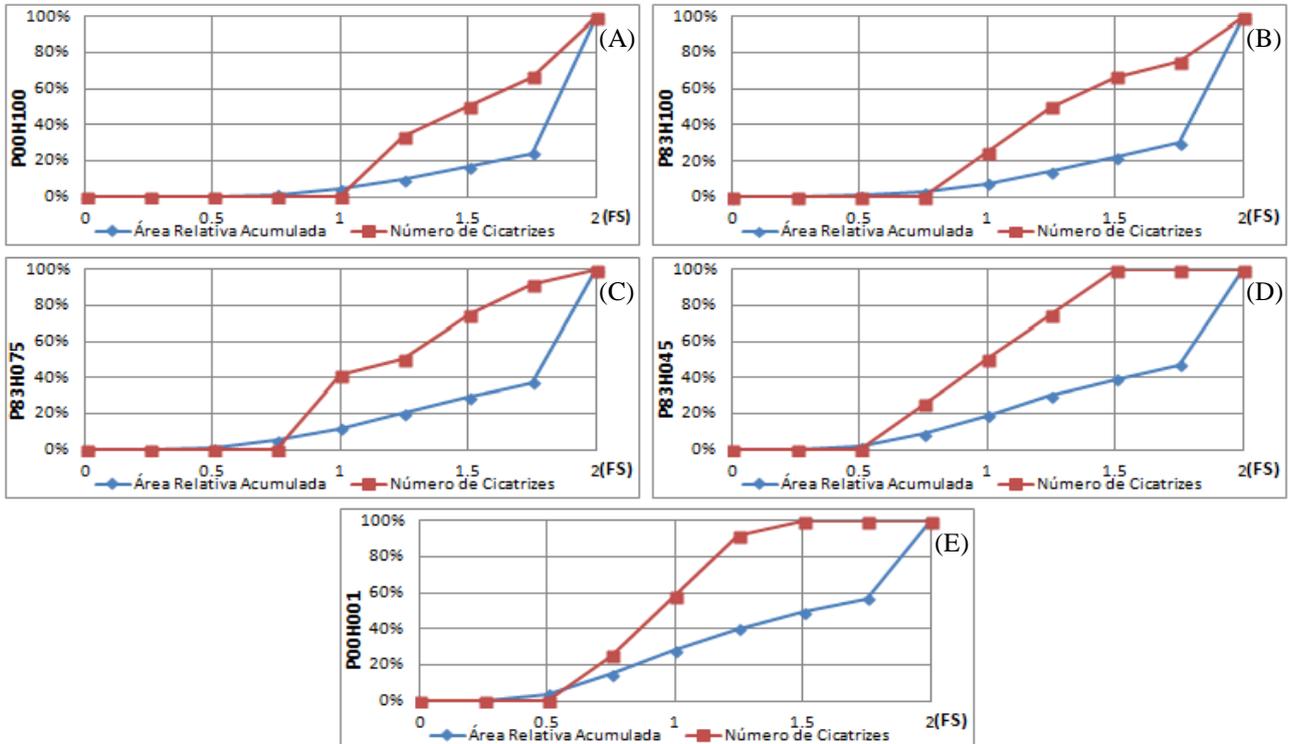


Figura 02 - Relação do número de cicatrizes e área acumulada para cada faixa de FS, em cada cenário simulado.

Percebe-se então, que o cenário com profundidade de lençol em 0,45 m, alcançou o melhor valor para a relação IA/IE de 0,94, com IA e IE sendo, respectivamente 17,86 % e 18,91 % sendo 18,91 % da área total considerado como área de instabilidade. O número de cicatrizes com ao menos um pixel enquadrado como instável pelo modelo foi de 50% do total de cicatrizes analisadas (Figura 02-D).

Percebe-se um aumento do valor da relação IA/IE com o aumento até da altura de lençol freático, até a 0,45 m, reduzindo com 0,01 m. Este aumento corrobora com a afirmação de que o evento que gerou o escorregamento inclui a saturação parcial provocada pelas precipitações anteriores ao dia 08 de setembro de 2011 e demonstra que em casos específicos, a simulação baseada somente no evento deflagrador pode não representar os mecanismos de ocorrência de escorregamentos fidedignamente. A redução de IA/IE ao se considerar o solo majoritariamente saturado, por sua vez, demonstra a superestimativa do modelo às precipitações anteriores, considerando 28,20 % da área total como instável.

Percebe-se, ainda, que mesmo o cenário de melhor desempenho (P83H045) apresentou baixos índices de acerto, maximizados, diante da relação IA/IE pela larga área de estudo para a qual foi aplicado. Os principais motivos aos quais se atribui esta falha da simulação são a dificuldade de se estimar os valores de profundidade da camada de solo e de altura do lençol freático anterior ao evento. Michel (2015) cita que a equação para cálculo do FS é muito sensível a tais parâmetros, de forma que altos valores para profundidade do solo incorrem em maiores probabilidades de classificação das áreas como instáveis. O autor ainda cita que a superestimativa de áreas instáveis tem efeito tanto no cálculo do IA quanto no cálculo do IE . Contudo, partindo do pressuposto que existem mais áreas estáveis do que instáveis, o IE recebe um impacto maior do erro relacionado à incapacidade de estimar com precisão as profundidades, gerando valores de IA/IE mais baixos.

CONCLUSÕES

O maior valor de *IA* encontrado no estudo foi igual a 21,23 %, sendo 17,86 % o valor obtido no cenário com melhor desempenho. Contudo, ao se avaliar o *FS* mínimo nas cicatrizes, percebe-se que este cenário é capaz de incluir áreas de instabilidade em 50 % destas, sendo assim bem-sucedido em reproduzir os efeitos da precipitação sobre a área de estudo.

Dentre os motivos para ocorrência dos baixos valores de *IA/IE*, tem destaque a sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada, em especial a altura de lençol freático e à profundidade do solo, parâmetros de difícil estimativa. Ainda, devido a topografia local, bastante acidentada, espera-se que a profundidade do solo apresente elevada disparidade, variando de vários metros, até praticamente inexistente em áreas de afloramento rochoso.

Devido ao modelo mostrar precisão limitada ao simular precipitações longas que ocorram em caráter intermitente, a variação da altura inicial do lençol se mostrou uma maneira eficaz de contabilizar tal situação. A dependência da estabilidade de encostas às precipitações antecedentes à deflagração não permitiu definir quais precipitações contribuíram para evento.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, que o modelo TRIGRS seja combinado com metodologias de estimativa da profundidade do solo de maneira distribuída. Ainda, este trabalho abre espaço para pesquisas relacionadas à capacidade de infiltração dos solos das bacias que compõe a área de estudo e o comportamento destes perante longos períodos com elevada precipitação e em regime intermitente.

REFERÊNCIAS

- BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; e GODT, J. W. **TRIGRS - A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis**. US Geological Survey Open-File Report, v. 424, 2002.
- GARDNER, W. R. **Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table**. Soil Science, v. 85, p. 228-232, 1958.
- IVERSON, R. M. **Landslide triggering by rain infiltration**. Water Resources Research, v. 36, n. 7, p. 1897-1910, 2000.
- JANSEN, G. R; VIEIRA, R. **Evolução da paisagem: situações de risco a escorregamento no município de Blumenau, SC**. Revista de Estudos Ambientais, v. 14, n. 3, p. 58-76, 2012.
- KOBIYAMA, M; MONTEIRO, L. R.; MICHEL, G. P. **Aprender hidrologia para prevenção de desastres naturais**. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS/LabHidro, 2006b. 12p.(apostila), 2010.
- MICHEL, G. P; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F. **Formulação do fator de segurança considerando a presença de vegetação**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v. 20, 2013.
- MICHEL, G. P. **Estimativa da profundidade do solo e seu efeito na modelagem de escorregamentos**. 2015. 164 f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2015.
- SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W.; BAUM, R. L. **A model for spatially and temporally distributed shallow landslide initiation by rainfall infiltration**. In: RICKENMANN, D.; CHEN, C. (Org.). Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Vols 1 and 2, p. 179-187, 2003.
- SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; VAN GENUCHTEN, M. T. **Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions**. Journal of Hydrology, v. 251, n. 3-4, p. 163-176, 2001.
- SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L. **Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models**. Natural Hazards, v. 53, n. 2, p. 313-332, 2010.