

## IMPORTÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA NO MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A ESCORREGAMENTOS NO USO DO MODELO SHALSTAB

*Carla Moreira Melo<sup>1</sup>; GeanPaulo Michel<sup>2</sup> & Masato Kobiyama<sup>3</sup>*

**ABSTRACT** – The increase in disasters due to the occurrence of landslides has driven the improvement of mapping predictive models. Being one of these models, SHALSTAB offers advantages due to the small number of input required parameters, such as geotechnical ones. However, it is difficult to determine these parameters, which influences on the reliability level of the created maps. Precisely for this reason, the benefits of the geotechnical parameters measuring are not yet clear in the use of this model. Therefore, the objective of the present study was to verify the advantages of the characterization of the geotechnical units in the SHALSTAB application to the Jaguar stream basin (25 km<sup>2</sup>) in the municipality of Alto Feliz, Rio Grande do Sul state. By using the geotechnical data obtained in this basin and also data proposed by software default, different scenarios were simulated. As their results, slope instability maps were generated for statistical analyses. The results showed that the scenario with the best performance was constituted by discretized values by geotechnique units allied to the maximum number of sampling points. This indicates the importance of the characterization of the geotechnique units in the study basin to use the model.

**Palavras-Chave** – Escorregamento, SHALSTAB, caracterização geotécnica.

### 1 - INTRODUÇÃO

Os desastres devido à ocorrência dos escorregamentos têm aumentado significativamente, causando consequências que vão, além de prejuízos reparáveis, à perda da vidas humanas. Desta maneira, gestores públicos estão cada vez mais aderindo às ferramentas que subsidiem as tomadas de decisões no sentido de alcançar um ordenamento territorial mais adequado, no intuito de trazer maior segurança à população.

Tais ferramentas, como os modelos computacionais aliados à Sistemas de Informações Geográficas (SIG), vêm contribuindo aos gestores neste sentido, como é o caso do modelo *Shallow Landsliding Stability Model* (SHALSTAB), proposto por Montgomery e Dietrich (1994). Este modelo é amplamente adotado para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos devido a diversas vantagens, sendo elas: fácil acesso pela internet, plataforma amigável com usuário, pequena quantidade de dados requeridos pelo modelo; e rápido processamento.

---

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), carla.mm.melo@gmail.com

2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), gean.michel@ufrgs.br

3) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), masato.kobiyama@ufrgs.br

No Brasil o SHALSTAB teve seu uso intensificado a partir do trabalho de Guimarães (2000). Posteriormente, com o trabalho de Michel *et al.* (2012), foi possibilitada a inserção de novas variáveis e a caracterização espacialmente discretizada das unidades geotécnicas. Mesmo que estes aspectos tenham viabilizado a geração de mapas preditivos mais realistas, ainda existem muitas incertezas quanto aos benefícios efetivos em consequência da caracterização das unidades geotécnicas, além dos processos inerentes relativos à espacialização e a quantidade de dados amostrais de solo necessários para tal fim.

Por isso, o objetivo do presente estudo foi verificar as vantagens geradas pela caracterização discretizada das unidades geotécnicas no cálculo de estabilidade de encostas por intermédio do modelo SHALSTAB. Para isso, utilizaram-se dados geotécnicos providos da bibliografia, pertencentes à bacia arroio Jaguar (Alto Feliz – RS) e os propostos pelo *default* do próprio software.

## 2 - TEORIA SHALTAB

O modelo SHALSTAB é um método determinístico, direcionado à identificação de locais com predisposição a escorregamentos translacionais rasos. Esse modelo resultou da combinação do modelo de estabilidade de encosta, pelo método de encosta infinita, e de um modelo hidrológico (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994). Desse modo, o modelo determina as áreas suscetíveis a escorregamentos, a partir da razão entre taxa de recarga e transmissividade do solo suficiente para provocar a desestabilização de uma encosta (Equação 1).

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \sin \theta \cdot \left\{ \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) + \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot \tan \phi \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \right\} \quad (1)$$

onde  $q$  é a taxa de recarga uniforme [mm];  $T$  é a transmissividade do solo [ $m^2$ /dia];  $b$  é o comprimento de contorno [m];  $a$  é a área de contribuição a montante [ $m^2$ ];  $\theta$  é a declividade da encosta [graus];  $\rho_s$  é a massa específica do solo [ $kg/m^3$ ];  $\rho_w$  é a massa específica da água [ $kg/m^3$ ];  $\phi$  é o ângulo de atrito interno do solo [graus];  $c$  é a coesão do solo [ $N/m^2$ ];  $z$  é a profundidade do solo [m]; e  $g$  é a aceleração gravitacional [ $m/s^2$ ].

## 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 - ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do arroio Jaguar (25  $km^2$ ) está localizada no estado do Rio Grande do Sul, inserida majoritariamente na microrregião de Montenegro, nos municípios de Alto Feliz e São Vendelino. Pequena parcela da bacia é abrangida pela microrregião de Caxias do Sul,

municípios de Farroupilha e Carlos Barbosa. Afluente da bacia do arroio Forromeco, contemplada pela bacia do rio Caí, (Figura 1).

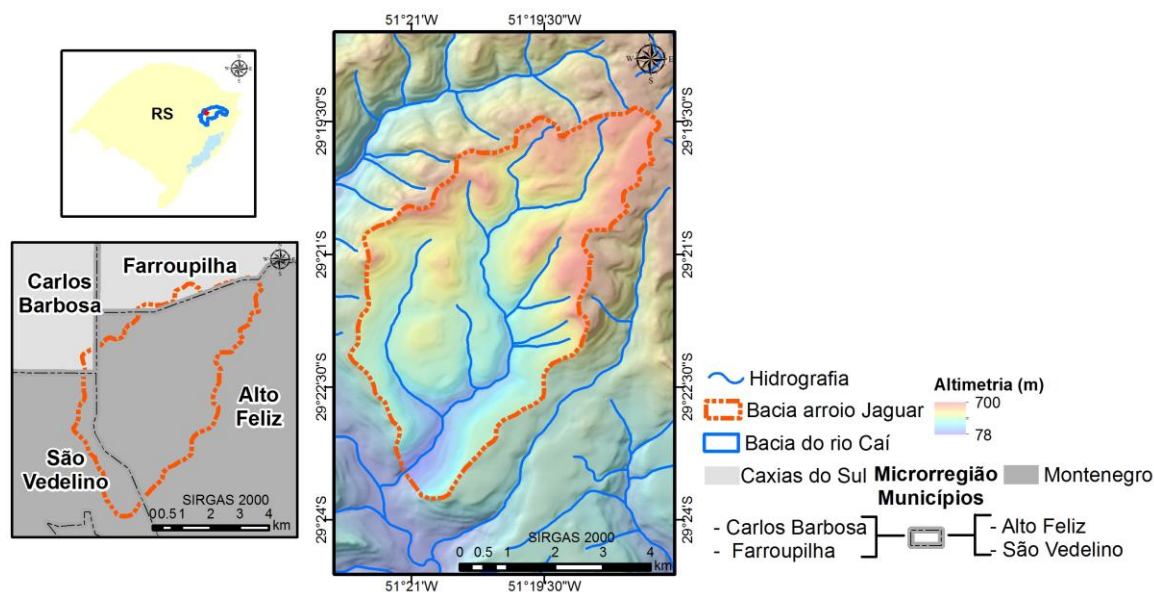


Figura 1 - Localização da bacia do arroio Jaguar

## 3.2 - DADOS UTILIZADOS

O modelo SHALSTAB necessita basicamente de seis variáveis para sua aplicação. O  $\theta$  e  $\alpha$  são dados de entrada que foram obtidos do modelo digital do terreno (MDT) com resolução espacial de 2,5 m, cedido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Este MDT foi gerado pela BRADAR por interferometria de dados de Radar de Abertura Sintética na banda P. Já os parâmetros de entrada  $\phi$ ,  $c$ , e  $\rho_s$  e  $z$  foram obtidos de Michel (2015), os quais constituíram 20 pontos amostrais distribuídos ao longo de 5 unidades geotécnicas. Neste trabalho e em Michel (2015), admite-se por unidade geotécnica a área designada pela interseção entre uma determinada unidade litológica com uma determinada unidade pedológica.

## 3.3 - APLICAÇÃO DO SHALSTAB

O modelo SHALSTAB foi aplicado para o cálculo de estabilidade de encosta. O algoritmo original deste modelo considera um único conjunto de valores geotécnicos para toda bacia. No entanto, o presente trabalho adotou algoritmo proposto por Michel *et al.* (2012), o qual admite discretizar os valores geotécnicos de cada unidade. Baseadas nos valores dos 20 pontos amostrais de solo e nos valores propostos pelo *default* do *software* foram propostos dois cenários, sendo eles: (i) cenário 1 - leva em consideração a totalidade dos 20 pontos amostrais para o cálculo de cada parâmetro ( $\phi$ ,  $c$  e  $\rho_s$ ), considerando a média do conjunto de pontos inseridos em cada unidade geotécnica (Tabela 1); e (ii) cenário 2 - leva em consideração os valores adotados pelo *default* do SHALSTAB (Tabela 2).

Tabela 1 – Parâmetro de entrada do modelo SHALSTAB no cenário 1

Unidades Geotécnicas	Nº de pontos	Valor médio		
		$\phi$ (°)	$c$ (N/m <sup>2</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	2	34	4725	1690
2	4	30	7153	1760
3	2	27	9855	1730
4	3	39	6037	1710
5	9	26	6908	1711

Tabela 2 – Parâmetro de entrada do modelo SHALSTAB no cenário 2

Bacia	$\phi$ (°)	$c$ (N/m <sup>2</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )
Arroio Jaguar	45	2000	1600

O número de pontos foi distribuído de forma a priorizar unidades geotécnicas com maior número de cicatrizes de escorregamento. Cabe salientar que cada cenário foi simulado para seis diferentes profundidades do solo: 0,5 m, 0,75 m, 1 m, 1,5 m, 2 m e 3 m. Nota-se, segundo Michel (2015), que a média da profundidade da bacia foi de 0,75 m.

### 3.4 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

Avaliação do desempenho para os distintos cenários basearam-se no inventário de cicatrizes de escorregamentos (cabeceira) distribuindo-as em cada classe de estabilidade. Os resultados foram avaliados adotando o limiar de instabilidade de acordo com a densidade de células instáveis dentro do inventário de cicatrizes de escorregamentos. O limiar adotado para o presente estudo foi  $\log q/T = -2,5$ . Os métodos de avaliação de desempenhos adotados foram baseados nos propostos por Sorbino *et al.* (2010) e Dietrich *et al.* (2001). Sorbino *et al.* (2010) propuseram dois índices: sendo eles: Índice de Acerto (*IA*) e Índice de Erro (*IE*). O *IA* é porcentagem de área definida como instável pelo modelo que coincide com a área de ocorrência de escorregamentos, ou seja, o inventário de cicatrizes (Equação 2). Já o *IE* é a razão percentual entre as áreas consideradas como instáveis pelo modelo e não compatíveis com o inventário de cicatrizes e áreas da bacia que não foram coincidentes por escorregamentos.

$$IA = \frac{A_{dentro}}{A_{instável}} \cdot 100 \quad (2)$$

$$IE = \frac{A_{fora}}{A_{estável}} \cdot 100 \quad (3)$$

onde *IA* é o Índice de Acerto; *IE* é o Índice de Erro;  $A_{dentro}$  é a área considerada instável pelo modelo que está dentro de cicatrizes de escorregamentos;  $A_{instável}$  é a área da cicatriz de escorregamento;  $A_{fora}$  é a área considerada instável pelo modelo fora de cicatrizes de escorregamento; e  $A_{estável}$  é a área da encosta que não foi afetada pelo escorregamento.

Adotando os índices propostos por Sorbino *et al.* (2010), cabe observar que os mesmos foram calculados para áreas com declividade acima 26,7°. Este critério foi adotado para o presente estudo, embasado em Michel (2015) onde este valor foi a declividade mínima inserida dentro das cicatrizes de escorregamentos para bacia do arroio Jaguar. Ademais o presente trabalho aderiu à representação de tais resultados na curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*), amplamente utilizada, como em Van Den Eeckhaut *et al.* (2006). Assim, no intuito de comparar os desempenhos, o *IA* foi plotado no eixo das ordenadas, enquanto o *IE* no eixo da abscissas. Esta configuração gráfica viabilizou a verificação dos desempenhos dada pela representação da proporcionalidade percentual de tais índices.

Outrossim, também apoiou-se para a avaliação do desempenho do modelo a metodologia proposta por Dietrich *et al.* (2001). Este método estabelece que um desempenho satisfatório seria aquele que consegue detectar os escorregamentos em menor área classificada como instável na bacia. Cada célula com menor valor  $\log q/T$ , resultante do modelo SHALSTAB, detectada no polígono da cicatriz de escorregamento, representa o local menos estável, sendo assim, considerada a categoria que controla a estabilidade do local. Aliado a esta perspectiva de análise os autores propuseram avaliação do desempenho por intermédio de curvas que representam o número de células de grade em cada categoria de  $\log q/T$  e a frequência cumulativa resultante da área total que recai em cada categoria. A partir destas curvas de áreas cumulativas na bacia e nas cicatrizes de escorregamentos, em cada categoria, é possível verificar o desempenho do modelo, já que o mesmo melhora à medida que as curvas se distanciam. À vista disso, o presente estudo propôs um índice para o cálculo da área existente entre as curvas (Equação 4).

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - A_i)}{n} \quad (4)$$

onde  $E$  é igual o percentual da área cumulativa dos escorregamentos;  $A$  é o percentual da área cumulativa da área total na bacia; e  $n$  é o número de classes.

## 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O melhor desempenho foi apresentado na simulação contemplada pelo cenário 1 considerando  $Z = 2$  m (Figura 2). Neste contexto, o *IA* correspondeu 87%, enquanto *IE* 10%. Já os índices referente ao cenário 2, derivados de valores constantes para toda bacia (*default*), apresentaram desempenhos inferiores. Neste cenário o resultado com melhor desempenho aderiu a  $Z = 1$  m, sendo que  $IA = 61\%$  e  $IE = 15\%$ .

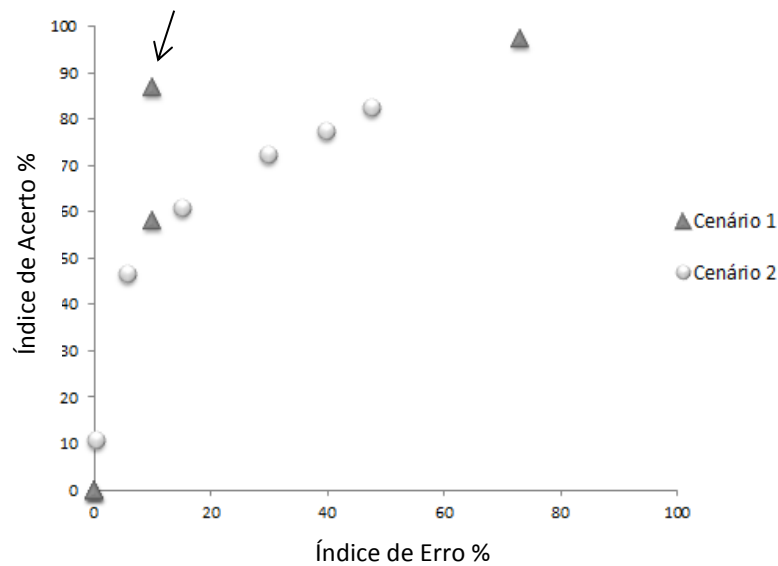


Figura 2 - Desempenhos de IA e IE

Ademais, relacionando as classes de estabilidade do modelo e a porcentagem cumulativa de área e escorregamentos em cada classe para o cenários 1 ( $Z = 2$  m), observou-se que a partir do limiar  $\log q/T = -2,5$  89% dos escorregamentos enquadram-se em 9% de área instável na bacia. Já para cenário 2 ( $Z = 1$  m), 71% dos escorregamentos foram capturados por 3% de área instável na bacia. Tais resultados são corroborados pelos cálculos da área existente entre as curvas gráficas das porcentagens cumulativas de área instável e de escorregamentos (Figura 3). O cenário 1 obteve maior área, apresentando melhor desempenho. Ainda, nota-se que embora o cenário 1 apresente porcentagem maior designada instável na bacia do que o cenário 2, este último apresentou 28% dos escorregamentos enquadrados em classes estáveis, enquanto o cenário 1 apresentou 10%. Observando tais aspectos, conjectura-se que apesar do baixo valor da  $c$ , dado pelo *default*, traduza menor resistência ao solo, o alto valor do  $\phi$ , pode ter influenciado na subestimação de classes instáveis na bacia, principalmente nas unidades geotécnicas 2 e 5 que contemplam as cicatrizes de escorregamentos. Além disso, observa-se que, no cenário 1, pequena porcentagem de escorregamentos foram enquadrados na classe incondicionalmente instável, enquanto a maioria dos escorregamentos foram capturados por classes relacionadas aos parâmetros hidrológicos. Isso apresenta um bom indício de calibração do modelo, visto que a deflagração dos escorregamentos está relacionada com as chuvas.



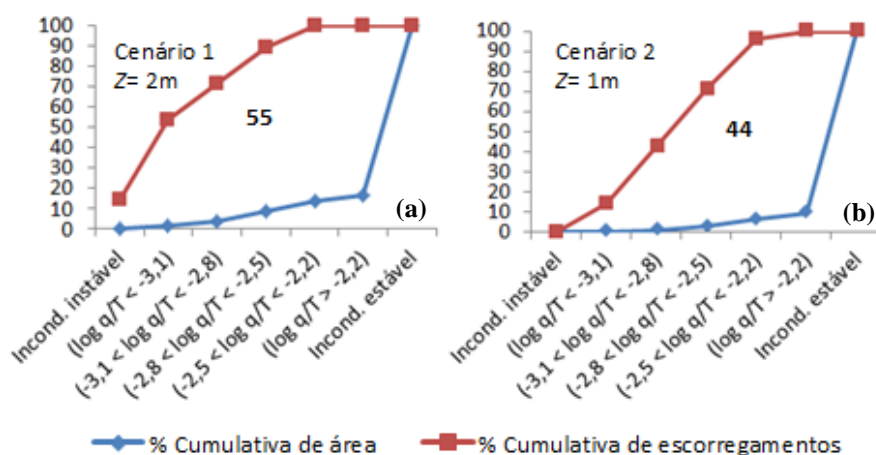


Figura 3 - Porcentagem cumulativa de área e de escorregamentos em cada classe nos cenários 1(a) e 2(b).

A Figura 4 apresenta o mapa de estabilidade do cenário 1, com as sete classes definidas pelo SHALSTAB.

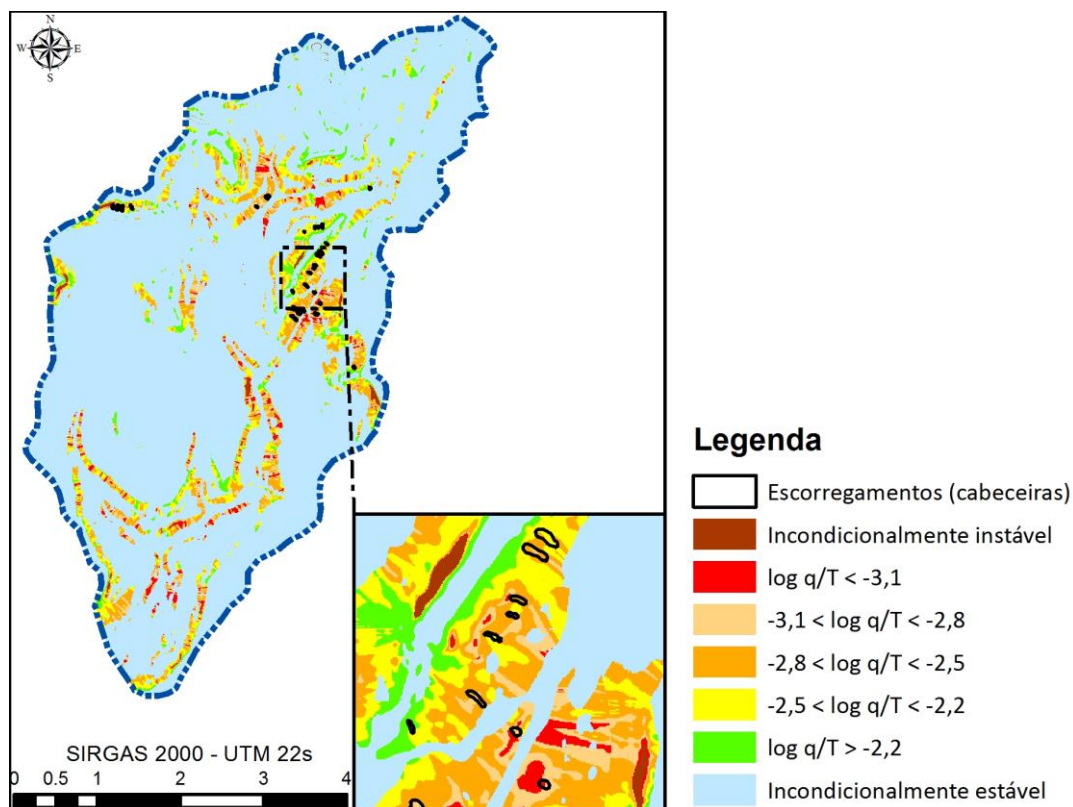


Figura 4 - Mapa de estabilidade da bacia do arroio Jaguar (cenário 1)

## 5 - CONCLUSÃO

O modelo SHALSTAB vem viabilizando a obtenção de resultados confiáveis para predição de escorregamentos translacionais. O presente trabalho verificou, através de métodos de avaliação de desempenhos, os benefícios gerados pela caracterização das unidades geotécnicas. Tais vantagens ficaram evidentes em consequência dos melhores desempenhos terem sido

resultantes do contexto em que os parâmetros de solo foram discretizados por unidades geotécnicas. Ainda, foi notório, a importância da quantidade de pontos amostrados na caracterização de cada unidade geotécnica e a influência de resultados mais próximos a realidade do contexto da bacia.

Enfim, é importante que as metodologias considerem, além da variabilidade das unidades geotécnicas na aplicação do modelo, a quantidade de amostragens de solo *in loco* que as caracterizam. Isso permitirá que sejam gerados mapas previsíveis com classes mais fidedignas a realidade da bacia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DIETRICH, W.E.; BELLUGI, D.; REAL DE ASUA, R. (2001). “*Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management.*” In Land Use and Watersheds: Human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas. Org por Wigmosta, M.S and Burges, S.J. (eds.), Amer, Geoph, Union , Water Science and Application 2, p.195-227.

GUIMARÃES, R.F. (2000). “*A modelagem matemática na avaliação de áreas de risco a deslizamentos: o exemplo das bacias dos rios Quitite e Papagaio (RJ).*” 150p. Tese (Doutorado em Geologia) – Depto. de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MICHEL, G.P.. (2015). “*Estimativa da profundidade do solo e seu efeito na modelagem de escorregamentos.*” 164p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento) Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MICHEL, G.P.; KOBAYAMA, M.; GOERL, R.F. (2012). “*Avaliação do papel da vegetação na estabilidade de encostas através do modelo SHALSTAB modificado.*” In. Anais do IX Simpósio Nacional de Geomorfologia, Rio de Janeiro/ RJ, Anais, 4p.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W.E. (1994). “*A physically-based model for topographic control on shallow landsliding.*” *Water Resources Research*, v.30, n.4, p. 1153-1171.

SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI L. (2010). “*Susceptibility analysis of shallow landslides source áreas using physically based models.*” *Natural Hazards*, v.53, p.313-332.

VAN DEN EECKHAUT, M.; VANWALLECHEM, T.; POESEN, J.; GOVERS, G.; VERSTRATEN, G.; VANDEKERCKHOVE, L. (2006). “*Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium)*”. *Geomorphology*, v.76. n.3-4, p.392-410.