



# Influência da Espacialização da Profundidade de Ruptura do Solo no Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Translacionais com o Modelo Matemático SHALSTAB

Regiane Mara Sbroglia  
UFSC, Florianópolis, Brasil, regi\_sb@hotmail.com

Rafael Augusto dos Reis Higashi  
UFSC, Florianópolis, Brasil, rrhigashi@gmail.com

Edison Ramos Tomazzoli  
UFSC, Florianópolis, Brasil, edison@cfh.ufsc.br

**RESUMO:** O objetivo do trabalho é analisar a influência da espacialização de um dos parâmetros de entrada do SHALSTAB - profundidade da superfície de ruptura do solo ( $z$ ). Para isso, foram elaborados dois cenários mantendo constante o valor de  $z$ , de 2 e 5 metros, e três considerando a espacialização de  $z$  a partir de equações ( $z_1$ ,  $z_2$  e  $z_3$ ). Para os cenários  $z_1$  e  $z_2$  foi previsto variação linear da profundidade com a altimetria e declividade, respectivamente. No cenário  $z_3$ , foi utilizada a média dos cenários  $z_1$  e  $z_2$ . Os dados topográficos foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação e os parâmetros do solo determinados em laboratório a partir do ensaio de cisalhamento direto. Com base nos resultados, verificou-se que a variação de  $z$  influenciou nos resultados do modelo. Apesar dos cenários com espacialização de  $z$  apresentarem resultados similares, o de maior capacidade preditiva foi o cenário  $z_2$ .

**PALAVRAS-CHAVE:** Deslizamentos, SHALSTAB, Profundidade do Solo, Superfície de Ruptura.

## 1 INTRODUÇÃO

Na previsão de deslizamentos translacionais pode-se citar o SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*). O SHALSTAB é um modelo matemático determinístico que utiliza dados espacializados em um *grid*, ou seja, calcula para cada *pixel* o grau de suscetibilidade a ocorrência de deslizamentos. Para a modelagem, incorpora parâmetros topográficos (declividade, área de contribuição e comprimento de contorno) e parâmetros do solo (ângulo de atrito efetivo, intercepto de coesão efetiva, peso específico saturado e a profundidade do solo).

A distribuição espacial da profundidade do

solo está relacionada a um conjunto de fatores que interagem entre si, gerando alta variabilidade espacial e dificultando sua definição. De acordo com Michel (2015), os métodos para medir ou estimar a profundidade do solo podem ser divididos em de campo e em matemáticos. Os métodos de campo englobam os geofísicos e de referência. Os métodos matemáticos utilizam equações matemáticas, geradas por análises estatísticas ou relações físicas. Os métodos matemáticos são de grande relevância, pois possuem capacidade de realizar a estimativa da profundidade do solo a partir de outras variáveis.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo analisar a influência da espacialização



do parâmetro profundidade do solo ( $z$ ) para análise da superfície de ruptura utilizando o modelo SHALSTAB na bacia do Ribeirão Baú, localizada no município de Ilhota, estado de Santa Catarina. Para isso, foram elaborados cinco cenários, dois deles mantendo constante o valor de  $z$  e três deles considerando a espacialização. A aferição dos resultados obtidos foi realizada comparando-se os cenários com as cicatrizes dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008.

## 2 MODELO SHALSTAB

A equação matemática do SHALSTAB (Eq. 1) é composta pela combinação de um modelo hidrológico, que considera estado uniforme de recarga na estimativa do grau de saturação do terreno, e de um modelo de estabilidade de encosta, que utiliza parâmetros geotécnicos e topográficos para calcular a estabilidade de uma determinada porção de solo com base na teoria de taludes infinitos (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \sin\theta \left[ \frac{\gamma_s}{\gamma_a} \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi} \right) + \frac{c}{\cos^2 \cdot \tan\varphi \cdot \gamma_a \cdot g \cdot z} \right] \quad (1)$$

Onde  $q$  é a taxa de recarga uniforme (mm/d);  $T$  é a transmissividade ( $m^2/d$ );  $a$  é a área de contribuição a montante ( $m^2$ );  $b$  é o comprimento de contorno unitário (m);  $\theta$  é a declividade (graus);  $\gamma_s$  é a densidade do solo ( $kg/m^3$ );  $\gamma_a$  é a densidade da água ( $kg/m^3$ );  $\varphi$  é o ângulo de atrito entre os grãos (graus);  $c$  é a coesão (kPa);  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ); e  $z$  é a profundidade do solo para análise da superfície de ruptura (m).

### 2.1 Profundidade do Solo ( $z$ )

Saulnier et al. (1997) propuseram duas equações empíricas para determinação da profundidade do solo em toda a extensão de uma bacia hidrográfica. A primeira equação é a partir de valores de profundidade do solo como função linear decrescente da elevação (Eq. 2).

$$z_i = z_{max} - \left( \frac{z_{max} - z_{min}}{e_{max} - e_{min}} \right) \cdot (e_i - e_{min}) \quad (2)$$

Onde  $z_i$  é a profundidade do solo em determinado ponto;  $e_i$  é a elevação no mesmo ponto;  $z_{max}$  e  $z_{min}$  são máximo e mínimo valores para a profundidade, respectivamente; e  $e_{max}$  e  $e_{min}$  são máximo e mínimo valores de elevação na bacia hidrográfica, respectivamente.

A segunda equação estabelece um decréscimo linear da profundidade do solo em função da declividade (Eq. 3).

$$z_i = z_{max} - \left( \frac{z_{max} - z_{min}}{\tan\theta_{max} - \tan\theta_{min}} \right) \cdot (\tan\theta_i - \tan\theta_{min}) \quad (3)$$

Onde  $\theta_{max}$  e  $\theta_{min}$  são a declividade máxima e mínima da bacia, respectivamente; e  $\theta_i$  é a declividade da encosta em determinado ponto.

Silva (2010) desenvolveu um modelo hidrológico com considerações a respeito da distribuição espacial da profundidade do solo e utilizou a média aritmética das profundidades calculadas com as equações 2 e 3.

Saulnier et al. (1997) e Silva (2010) pretendiam adotar determinado padrão de distribuição espacial da profundidade do solo e verificar o efeito desta adoção no processo de modelagem hidrológica (MICHEL, 2015).

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Obtenção dos Parâmetros Topográficos

O MDE na escala 1:10.000 (resolução espacial de 1m) foi disponibilizado pela Secretaria de Desenvolvimento Sustentável (SDS/SC). As variáveis topográficas utilizadas na modelagem, declividade ( $\theta$ ) e área de contribuição ( $a$ ), foram obtidas em formato matricial (*raster*) a partir do MDE. O comprimento de contorno ( $b$ ) corresponde ao tamanho do *pixel* (1m).



### 3.2 Obtenção dos Parâmetros Geotécnicos

As variáveis referentes aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) e o intercepto de coesão efetiva ( $c'$ ) foram determinadas por meio de ensaios de cisalhamento direto, conforme a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D3080/1998. Trata-se de um ensaio do tipo CD (Consolidado Drenado), que nesse estudo foi realizado com velocidade de 0,307mm/min, na condição inundada e nas tensões efetivas normais de 33, 78 e 128kPa. O peso específico saturado ( $\gamma_{\text{sat}}$ ) foi determinado com base no peso específico natural ( $\gamma_{\text{nat}}$ ) também determinado nos ensaios de cisalhamento direto.

Os parâmetros dos solos ( $\phi'$ ,  $c'$  e  $\gamma_{\text{sat}}$ ) foram determinados para as unidades geotécnicas de solo residual, individualizadas no mapa geotécnico em escala 1:50.000 elaborado por Sbroglia (2015) a partir da metodologia de Dias (1995). A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros geotécnicos para as unidades Cambissolo substrato de arenito (Ca), Cambissolo substrato de conglomerado (Cc), Cambissolo substrato de folhelho (Cf), Cambissolo substrato de gnaiss (Cgn) e Cambissolo substrato de piroxenito (Cpi).

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos obtidos pelos ensaios.

Unidades Geotécnicas	$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
Ca	18,4	8,42	26,5
Cc	17,8	5,24	29,2
Cf	17,8	2,94	25,3
Cgn	18,3	6,95	31,8
Cpi	15,6	12,96	15,8

### 3.3 Cenários de Espacialização do Parâmetro z

Os cenários para a modelagem com o SHALSTAB foram elaborados com base em dados de entrada espacializados. Os dados topográficos e hidrológicos foram espacializados a partir do MDE e os dados do

solo a partir do mapa geotécnico. Para a espacialização do parâmetro z, foram elaborados cinco cenários, dois deles sem espacialização da profundidade do solo e três com a espacialização, intitulados:

- **2m** - cenário com z constante de 2 metros;
- **5m** - cenário com z constante de 5 metros;
- **z1** - cenário obtido a partir da Equação 2;
- **z2** - cenário obtido a partir da Equação 3; e
- **z3** - cenário obtido a partir da média aritmética dos cenários z1 e z2.

Para a análise de deslizamentos translacionais, adotou-se como profundidade mínima e máxima da superfície de ruptura do solo os valores 0 e 5 metros, respectivamente.

### 3.4 Modelagem com o SHALSTAB e Validação dos Cenários

O modelo SHALSTAB foi executado no *software ArcGis10.1* por meio da ferramenta *Automatic SHALSTAB Analysis* (ASA) desenvolvida por Sbroglia et al. (2017). A ferramenta, a qual é adicionada ao *Toolbox* do *ArcGis*, contém a rotina automatizada da equação matemática do SHALSTAB (Eq. 1).

A validação dos cenários foi realizada por meio da verificação da coincidência espacial entre as superfícies de ruptura das cicatrizes dos deslizamentos de novembro de 2008 e as áreas designadas como instáveis pelo modelo.

A partir dos dados, foram elaboradas as curvas de validação referentes aos cinco cenários conforme Chung e Fabbri (2003) e Remondo et al. (2003). Essas curvas relacionam a porcentagem acumulada de cada classe de estabilidade presente na área de estudo (eixo das abcissas) com a porcentagem acumulada do número de deslizamentos presentes em cada uma dessas classes (eixo das ordenadas), ambos os eixos devem apresentar o somatório iniciando pela classe mais instável.



#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das Equações 2 e 3 foi possível elaborar os mapas com a profundidade de solo espacializada, conforme Figuras 1, 2 e 3, e elaborar o gráfico da Figura 4.

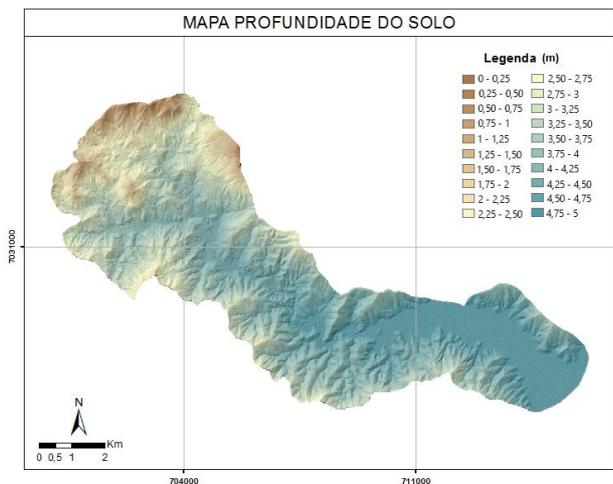


Figura 1. Mapa de profundidade solo a partir da Eq. 2 – cenário z1.

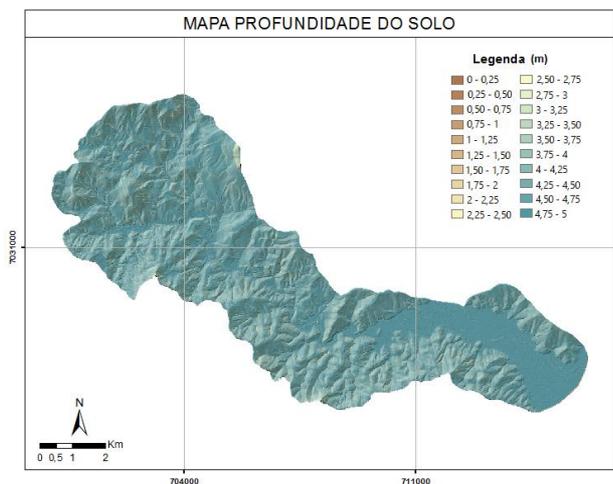


Figura 2. Mapa de profundidade solo a partir da Eq. 3 – cenário z2.

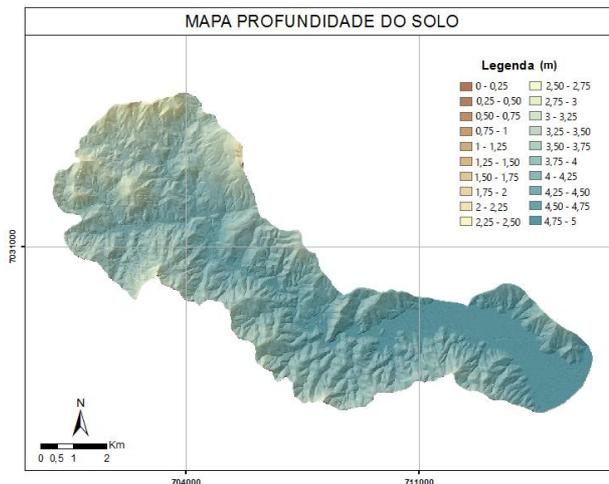


Figura 3. Mapa de profundidade solo a partir da média aritmética entre a Eq. 2 e Eq. 3 – cenário z3.

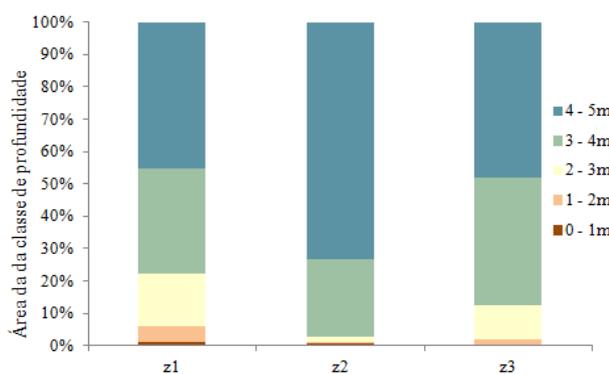


Figura 4. Distribuição da profundidade de solo nos cenários z1, z2 e z3.

Observou-se que as maiores profundidades de solo ocorreram em maior área no cenário z2 (73,3%). No cenário z1 ocorreu uma distribuição mais equalitária entre as classes de profundidade do solo. Entretanto, em todos os cenários as áreas mais profundas equivalem as áreas mais baixas da bacia hidrográfica.

Dessa forma, no cenário z1, quando a Equação 2 é aplicada, obtém-se menor profundidade nas áreas de cabeceira e solos profundos nas áreas mais baixas. Isso acontece por que o sedimento das áreas mais altas é conduzido gravitacionalmente para as áreas mais baixas, o que reduz as profundidades nas cabeceiras e as aumenta nas áreas baixas.



No cenário z2, por sua vez, a Equação 3 descreve a profundidade do solo em termos de propensão a ocorrência de erosão. Áreas de declividade mais acentuada têm predisposição a demonstrar maiores potenciais erosivos, conseqüentemente, criando profundidades menores de solo, enquanto que nas áreas de baixa declividade são propícias à deposição, apresentando profundidades maiores.

Em relação à análise da suscetibilidade a deslizamentos translacionais para a bacia do Ribeirão Baú, foram elaborados cinco cenários, dois deles mantendo z constante (Figuras 5 e 6) e três considerando a espacialização do parâmetro z na equação do modelo matemático SHALSTAB (Figuras 7, 8 e 9).

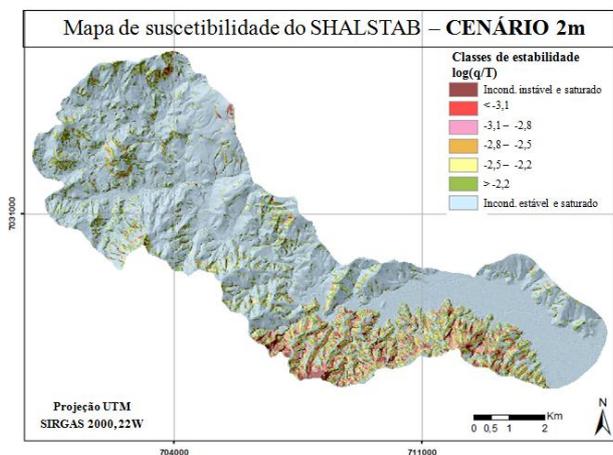


Figura 5. Mapa de suscetibilidade – cenário 2m.

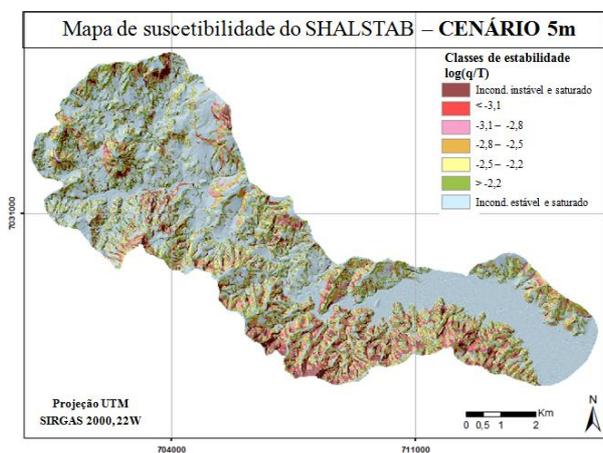


Figura 6. Mapa de suscetibilidade – cenário 5m.

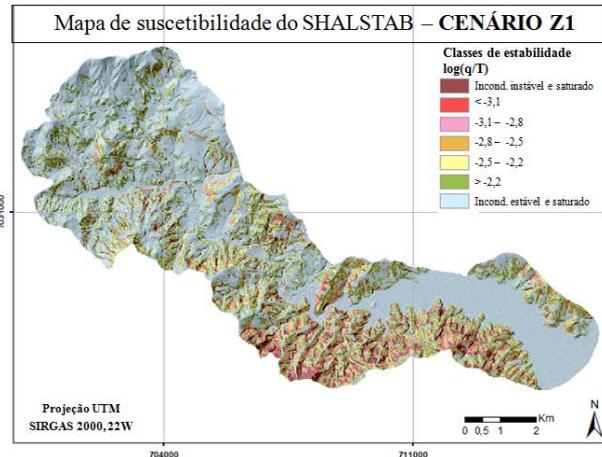


Figura 7. Mapa de suscetibilidade – cenário Z1.

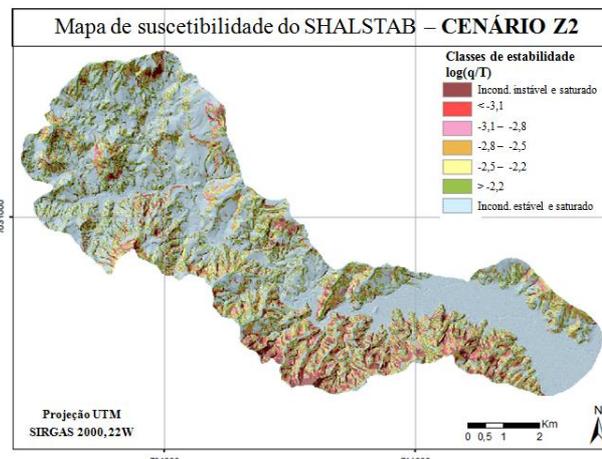


Figura 8. Mapa de suscetibilidade – cenário Z2.

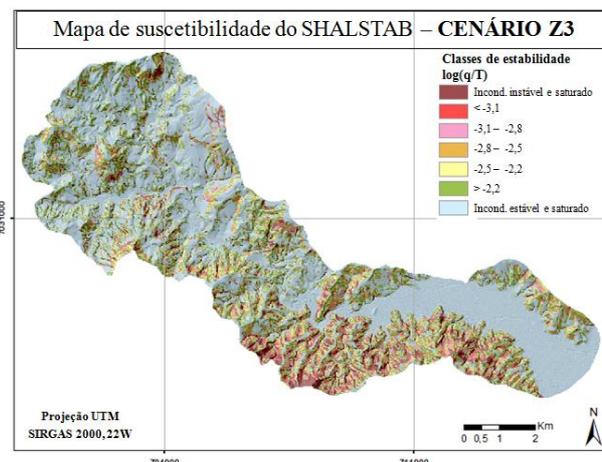


Figura 9. Mapa de suscetibilidade – cenário Z3.

Ainda, foi elaborado um gráfico com a porcentagem de cada classe do SHALSTAB nos diferentes cenários (Figura 10).

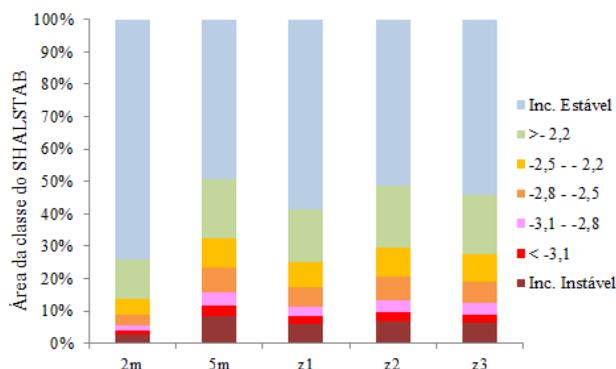


Figura 10. Área de cada classe do SHALSTAB nos cinco cenários.

Nos mapas elaborados e gráfico, observou-se que a área das classes extremas tiveram maior variação nos cenários com a profundidade do solo constante. No cenário 2m ocorreu a menor área da classe Incondicionalmente Instável, de 2,9%, enquanto que o maior valor foi no cenário 5m, de 8,5%. Nos cenários com espacialização da profundidade do solo, os valores das classes extremas foram similares. A classe Incondicionalmente Instável, por exemplo, apresentou área de 6,1, 6,8 e 6,5% nos cenários z1, z2 e z3, respectivamente.

Ainda, foram relacionados os cinco cenários elaborados com as 527 superfícies de ruptura das cicatrizes dos deslizamentos mapeadas. A Figura 11 apresenta o número de cicatrizes em cada classe do SHALSTAB para os cenários com valor de z constante (2m e 5m) e espacializado (z1, z2, z3).

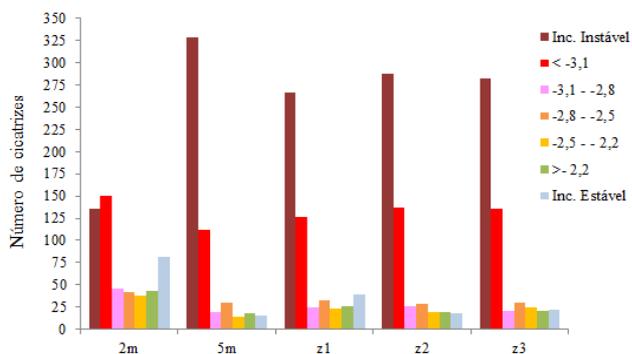


Figura 11. Número de cicatrizes em cada classe do SHALSTAB para os cinco cenários.

De acordo com o gráfico da Figura 11, pode-se observar que o cenário 5m foi o que apresentou o maior número de cicatrizes na classe Incondicionalmente Instável (328 cicatrizes, 61,2%) e o menor número na classe Incondicionalmente Estável (18 cicatrizes, 3,4%). Enquanto que o cenário 2m foi o que apresentou o menor número na classe Incondicionalmente Instável (135 cicatrizes, 25,2%) e o maior na classe Incondicionalmente Estável (43 cicatrizes, 8,0%).

Em relação aos cenários com espacialização do valor da profundidade do solo, o que apresentou o maior número de cicatrizes na classe Incondicionalmente Instável (288 cicatrizes, 53,7%) e o menor número na classe Incondicionalmente Estável (19 cicatrizes, 3,5%) foi o cenário z2.

No entanto, visto que a eficácia do modelo SHALSTAB está relacionada à sua capacidade de prever os locais onde ocorreram os deslizamentos em um baixo percentual de áreas classificadas como instáveis, a identificação do cenário que melhor se ajustou às cicatrizes mapeadas na bacia do Ribeirão Baú foi realizada a partir da análise das curvas de validação apresentadas na Figura 12.

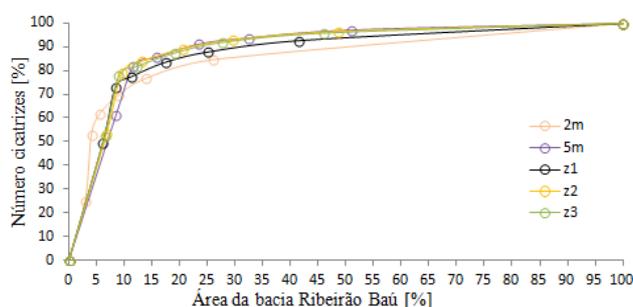


Figura 12. Curvas de validação para os cinco cenários elaborados.

Segundo Remondo et al. (2003), um modelo é considerado como altamente preciso quando 90% dos deslizamentos ocorrem em até 5% de áreas instáveis, e com pouca precisão quando 40% dos deslizamentos ocorrem em 30% de áreas instáveis. Logo, quanto mais rapidamente a curva de validação se distanciar do eixo das



abscissas, e alcançar a proporção de 100% dos *pixels* deslizados, melhor será a confiabilidade do modelo e a sua capacidade preditiva.

Nesse sentido, as curvas de validação referentes aos cenários com espacialização da profundidade de ruptura do solo foram as que apresentaram maior gradiente e maior distância da diagonal, sendo, então, consideradas de melhor capacidade preditiva dentre as simulações realizadas.

No entanto, observou-se que nenhum dos cenários elaborados pode ser considerado de alta precisão seguindo os preceitos dos referidos autores.

O cenário que apresentou maior capacidade preditiva foi o z2. Nesse cenário foram identificadas 89,4% das cicatrizes em 20,6% de área instável (equivalente à classe  $\text{Log}q/T = -2,8$  a  $-2,5$ ). No entanto, destaca-se que os cenários z1, z2 e z3 apresentaram resultados muito similares.

## 5 CONCLUSÕES

Realizou-se neste trabalho a análise da influência da espacialização do parâmetro profundidade do solo para análise da superfície de ruptura (*z*) utilizando o modelo matemático SHALSTAB na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú. Esse modelo considera dados hidrológicos e topográficos e as propriedades físicas e de resistência dos solos na determinação da razão entre a quantidade de precipitação e a transmissividade do solo necessária para tornar uma encosta instável.

Dessa forma, foram elaborados dois cenários mantendo o valor de *z* constante, de 2 e 5 metros, e três considerando a espacialização de *z* (z1, z2 e z3) a partir de equações propostas por Saulnier et al. (1997) e Silva (2010). Para os cenários z1 e z2 foi previsto variação linear da profundidade com a altimetria e declividade, respectivamente, e para o cenário z3 foi utilizada a média aritmética dos cenários z1 e

z2. A validação dos resultados obtidos foi realizada comparando-se os cenários com as cicatrizes dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008.

Cabe destacar que essas equações não foram desenvolvidas com o propósito de mapear de maneira acurada a profundidade do solo, mas pretendem simular tipos diferentes de distribuição espacial da profundidade do solo na bacia e avaliar o efeito da consideração desses diferentes padrões.

Dessa forma, em relação à espacialização de *z*, observou-se que no cenário z1 ocorreu uma distribuição mais equalitária entre as classes de profundidade do solo e que as maiores profundidades ocorreram em maior área no cenário z2.

Nos cenários elaborados com o SHALSTAB, observou-se que as áreas das classes extremas tiveram maior variação nos cenários com a profundidade do solo constante. Já nos cenários com espacialização da profundidade do solo, os valores das classes extremas foram similares.

Em relação ao inventário de cicatrizes, o cenário 5m foi o que apresentou o maior número de deslizamentos na classe Incondicionalmente Instável e o menor número na classe Incondicionalmente Estável. Em relação aos cenários com espacialização do valor da profundidade do solo, o que apresentou o maior número de cicatrizes na classe mais instável e o menor na mais estável foi o z2.

Apesar desse fato, ocorreram deslizamentos em todas as classes do SHALSTAB nos cinco cenários, inclusive, na classe denominada de Incondicionalmente Estável. Isto pode estar relacionado a diversos fatores, inclusive à data de aquisição dos dados do aerolevante para a elaboração do MDE, posterior ao desastre de 2008 (após as rupturas, os taludes apresentarão alteração em suas geometrias, sobretudo na declividade), à ocorrência de intervenções antrópicas e à complexidade dos deslizamentos, o que ressalta a necessidade de análise em campo, principalmente, das encostas



com deslizamentos nas áreas consideradas estáveis pelo modelo.

Com a elaboração das curvas de validação, que relacionam a área das classes de maior suscetibilidade e o número de cicatrizes, observou-se que nenhum dos cenários elaborados pode ser considerado de alta precisão conforme observado por Remondo et al. (2003). Apesar dos cenários z1, z2 e z3 apresentaram resultados muito similares, o cenário que apresentou maior capacidade preeditiva dentre os cinco cenários elaborados foi o cenário de z espacializado intitulado z2.

## AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por disponibilizar o espaço para a realização dos ensaios de cisalhamento direto.

À Pró-Reitoria de Pós-Graduação (Propg) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG) da UFSC

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- American Society For Testing and Materials – ASTM (2004) *D3080: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*, West Conshohocken, USA: ASTM, 9 p.
- Chung, C.F.; Fabbri, A.G. (2003) Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping, *Natural Hazards*, Vol. 30, p. 451-472.
- Dias, R.D. (1995) Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais, *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo, p. 51-55.
- Michel, G.P. (2015) *Estimativa da Profundidade do Solo e seu Efeito na Modelagem de Escorregamentos*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 164 p.
- Montgomery, D.R.; Dietrich, W.E. (1994) A physically

based model for the topographic control on shallow landsliding, *Water Resource Research*, Vol. 30, n. 4, p. 1153-1171.

- Remondo, J.; González, A.; Terán, J.R.D.; Cendrero, A.; Fabbri, A.G.; Chung, C.F. (2003) Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in northern Spain, *Natural Hazards*, Vol. 30, n. 3, p. 437-449.
- Saulnier, G.M.; Beven, K.; Obled, C. (1997) Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL, *Journal of Hydrology*, Vol. 202, p. 158-172.
- Silva, R.V. (2010) *Desenvolvimento de um Modelo Hidrológico Distribuído por Meio de Células Voronoi com Consideração das Profundidades do Solo*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 226 p.
- Sbroglia, R.M. (2015) *Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, 187 p.
- Sbroglia, R.M.; Porath, P.H.M.; Higashi, R.A.R.; Oliveira, F.H. (2017) *Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Translacionais com o Uso da Ferramenta ASA - Automatic Shalstab Analysis*, XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encosta, COBRAE, ABMS, Florianópolis, Vol. 1, p. 3878-3885.