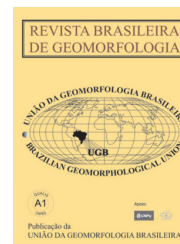


www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 19, nº 4 (2018)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1372>



### APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NO ESTUDO DE ESCORREGAMENTOS NO BRASIL: REVISÃO

### APPLICATION OF THE SHALSTAB MODEL TO STUDY LANDSLIDES IN BRAZIL: REVIEW

**Carla Moreira Melo**

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970. Brasil  
E-mail: carla.mm.melo@gmail.com*

**Masato Kobiyama**

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970. Brasil  
E-mail: masato.kobiyama@ufrgs.br*

#### Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):  
03/07/2018  
Aceito (Accepted):  
14/08/2018

#### Palavras-chave:

Escorregamento; SHALSTAB; Brasil.

#### Keywords:

Landslide; SHALSTAB; Brazil.

#### Resumo:

O presente artigo realizou um levantamento dos trabalhos técnico-científicos que aplicaram o modelo SHALSTAB no mapeamento de escorregamentos no Brasil no período de 2002–2016. Inicialmente foi realizada uma breve descrição do modelo, contemplando as variáveis e alguns aspectos fundamentais para a sua aplicação. Posteriormente, o panorama espacial dos trabalhos que aplicaram o modelo foi apresentado. Foram considerados artigos, trabalhos de conclusão de curso (TCC), dissertações, teses e relatórios técnicos. Destaca-se que foi dada preferência aos artigos científicos publicados a partir de estudos realizados em TCCs, dissertações e/ou teses. O artigo foi finalizado com uma análise e representação espacial quali-quantitativa dos trabalhos que utilizaram esse modelo matemático nos estados brasileiros, abrangendo a variação metodológica de obtenção dos parâmetros adotados.

#### Abstract:

The present study reviewed technical-scientific studies that applied the SHALSTAB model for landslides mapping in Brazil during the period 2002–2016. First, the model was briefly described and some fundamental aspects for its application were mentioned. Afterward, the temporal and spatial panoramas of these studies were presented. It is important to mention that we focused on scientific papers based on monographs, dissertations, and/or theses. The paper was concluded by a qualitative and quantitative spatial analysis and representation of the studies that used this model in Brazilian states, covering a methodological variation of obtaining the adopted parameters.

## Introdução

Segundo o IBGE (2014), aproximadamente 50% dos municípios brasileiros sofreram com pelo menos um evento causador de desastre natural entre o período de 2008 a 2013, quando 895 municípios foram atingidos por escorregamentos. Este número foi superado apenas pelas inundações bruscas (enxurradas) e inundações graduais que atingiram 1574 e 1543 municípios, respectivamente. Essa mesma pesquisa constata que o estado com maior número de ocorrências de escorregamentos é Minas Gerais, correspondendo a 225 municípios. Por conseguinte, outros estados também apresentaram destaque, sendo eles: São Paulo com 121 municípios, Santa Catarina com 118 municípios, Rio de Janeiro com 70 municípios e Espírito Santo com 48 municípios.

Diante da frequência desses eventos, observa-se que estão surgindo diversas ferramentas que podem subsidiar ações quanto à redução dos desastres associados aos escorregamentos. Nesse sentido, cabe mencionar as modelagens computacionais aliadas ao Sistema de Informação Geográfica (SIG), que vêm contribuindo na predição de escorregamentos, visto que permitem, por exemplo, a produção de mapas de áreas susceptíveis a tal fenômeno, entre outros.

Nesse contexto, percebe-se a importância dessas ferramentas, já que a partir das mesmas, medidas estruturais e não estruturais podem ser adequadamente realizadas. Em vista disso, o conhecimento das potencialidades e limitações das ferramentas é imprescindível na assertividade da tomada de decisão. Portanto, no que tange aos modelos de escorregamento, além do conhecimento da origem metodológica dos dados de entrada, verifica-se a importância da calibração e validação dos mesmos, dessa forma assegurando a eficiência e fidedignidade dos resultados do modelo com a realidade de campo, respectivamente.

Dentre os diversos modelos computacionais de escorregamentos, o *Shallow Landsliding Stability Model* (SHALSTAB), proposto por Montgomery e Dietrich (1994), vem sendo amplamente adotado. Este modelo deriva do método de análise de previsão determinístico e caracteriza-se pela redução do aspecto subjetivo, como encontrado nos métodos heurísticos, o que possibilita a determinação de níveis de risco em valores absolutos (WESTEN *et al.*, 1997; BARREDO *et al.*, 2000). Assim, além desta

vantagem inerente ao modelo SHALSTAB, diversas outras têm contribuído para sua ampla utilização no mapeamento de escorregamentos, tais como: o modelo é disponibilizado gratuitamente na internet; plataforma amigável com usuário; pequena quantidade de dados requeridos pelo modelo e rápido processamento. Essas vantagens contribuem para a utilização generalizada do modelo, porém, às vezes de maneira indiscriminada, ou seja, desconsiderando algumas limitações do mesmo. Desta forma ocasionando, conseqüentemente, mapas preditivos com classes não fidedignas, que poderão levar o usuário a conclusões errôneas. De acordo com Dietrich e Montgomery (1998), as limitações estão relacionadas, por exemplo, às regiões com escorregamentos e lençóis freáticos profundos, áreas com afloramentos rochosos, falésias entre outras.

Assim, o presente estudo objetivou realizar uma investigação da aplicabilidade do modelo SHALSTAB no Brasil, contemplando o seu histórico, sua distribuição espacial, os métodos para obtenção dos parâmetros e para verificação da calibração e validação do modelo, quando existentes. Para isso, foram analisadas pesquisas técnico-científicas (artigos, teses, dissertações, trabalhos de conclusão de curso, entre outros) que utilizaram o modelo SHALSTAB para mapeamento de escorregamentos.

## Teoria do SHALSTAB

### Geral

O modelo SHALSTAB é um método determinístico, direcionado à identificação de locais com predisposição a escorregamentos translacionais. Esse modelo resultou da combinação do modelo de estabilidade de encosta, pelo método de encosta infinita, e um modelo hidrológico (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994; FERNANDES *et al.*, 2001; VIEIRA e MARTINS, 2016). Desse modo, o modelo determina as áreas suscetíveis a escorregamentos a partir da relação entre a razão da quantidade da chuva e a transmissividade suficiente para provocar a instabilidade de uma encosta.

### Modelo de Estabilidade de Encosta Infinita

O estudo de estabilidade de encostas considera, fundamentalmente, a relação entre campos de forças provindas do peso dos materiais, escoamento da água e as relacionadas à resistência de ruptura. Dessa forma, a análise de equilíbrio-limite admite que as forças que

tendem a induzir a ruptura em encostas são equalizadas pelas forças resistentes (FIORI e CARMIGNANI, 2015). Diante disso, a relação existente entre as forças de resistência e as que favorecem a ocorrência do deslocamento do material em uma encosta, é expressa pelo fator de segurança (*FS*) (SELBY, 1993).

Para análise de escorregamento translacional com o *FS*, é comumente utilizada a teoria de estabilidade de encosta infinita. Essa teoria é adequada para situações em que o comprimento da encosta é muito superior à profundidade do solo. Isso acontece em função do tipo de análise, realizada em relação a um plano infinito de solo sobre um plano inclinado que desconsidera os efeitos provindos do atrito nas laterais e nas extremidades. Segundo Guimarães *et al.* (2003), o escorregamento translacional com contato abrupto solo-rocha apresenta características de fenômenos envolvidos que justificam a teoria de encosta infinita.

Essa teoria fundamenta-se na lei de Mohr-Coulomb que considera a influência da pressão-poro da água na redução da resistência ao cisalhamento:

$$\tau = c + (\sigma - u) \cdot \tan \phi \quad (1)$$

onde  $\tau$  é a tensão cisalhante no momento da ruptura [ $\text{N/m}^2$ ];  $c$  é a coesão do solo [ $\text{N/m}^2$ ];  $\sigma$  é a tensão

normal [ $\text{N/m}^2$ ];  $u$  [ $\text{N/m}^2$ ] é a poro-pressão e  $\phi$  é o ângulo de atrito interno do solo [graus]. Essa lei vincula  $\phi$  e  $c$  à resistência de cisalhamento do solo, ou seja, relacionado à tensão de um solo para um nível de deformação que permita caracterizar a condição de ruptura. Porquanto, o atrito interno do solo representa o atrito físico e atrito fictício proveniente do entrosamento de suas partículas. Já a coesão do solo é o efeito das forças eletroquímicas de atração entre suas partículas.

Na análise de encosta infinita, o peso do solo ( $W$ ) pode ser obtido com base na profundidade vertical do solo ( $Z$ ) (Figura 1). Aqui, nota-se que:

$$z = \frac{p}{\cos \theta} \quad (2)$$

onde  $p$  é a espessura do solo [m] e  $\theta$  é a declividade da encosta [graus]. Neste caso, o valor de  $W$  é calculado como:

$$W = l \cdot p \cdot \rho_s \cdot g \quad (3)$$

onde  $l$  é o comprimento da encosta [m];  $\rho_s$  é a densidade do solo úmido [ $\text{kg/m}^3$ ] e  $g$  é a aceleração gravitacional [ $\text{m/s}^2$ ].

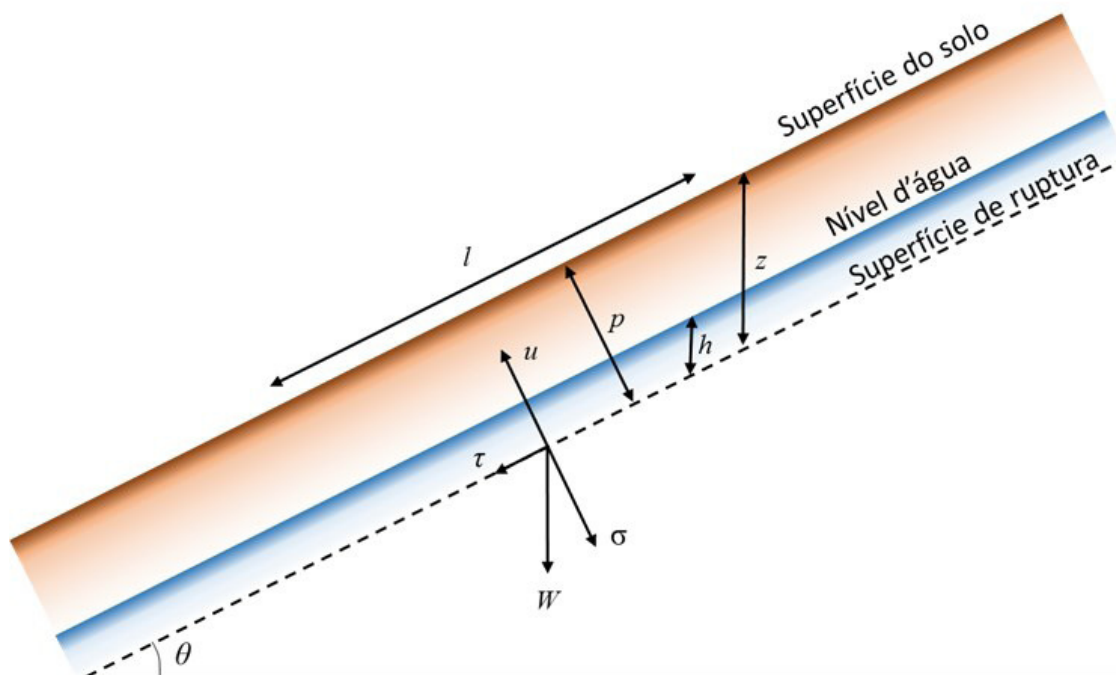


Figura 1 - Representação do modelo de estabilidade de encosta infinita. (Fonte: SELBY, 1993).

Partindo do princípio que uma tensão é resultante de um par de forças e sentidos contrários atuantes em uma unidade de área, decompõem-se os vetores do peso, que se subentende uma análise bidimensional de talude infinito. Assim, considerando uma largura unitária (análise bidimensional) abrangendo toda extensão da encosta, as componentes pesos, paralela e perpendicular à encosta representam  $\tau$  e  $\sigma$ , respectivamente:

$$\tau = \frac{W \cdot \sin \theta}{l} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{W \cdot \cos \theta}{l} \quad (5)$$

Substituindo as Equações (2) e (3) nas Equações (4) e (5) obtém-se:

$$\tau = z \cdot \rho_s \cdot g \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \quad (6)$$

$$\sigma = z \cdot \rho_s \cdot g \cdot \cos^2 \theta \quad (7)$$

Fiori e Carmignani (2015) explicaram que  $u$  é a componente força que atua no sentido oposto à tensão normal, sendo resultante da pressão na qual a água dentro dos poros do solo está exposta. Então,  $u$  está vinculada ao peso da coluna d'água presente no solo, sendo expressa como:

$$u = h \cdot \rho_w \cdot g \cdot \cos^2 \theta \quad (8)$$

onde  $h$  é a altura vertical da coluna d'água dentro da coluna de solo [m] e  $\rho_w$  é a densidade da água [kg/m<sup>3</sup>].

Selby (1993) substituiu as Equações (6), (7) e (8) na Equação (1) aplicando a teoria de estabilidade de encosta infinita:

$$\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta = c_r + c_s + (\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta - \rho_w \cdot g \cdot h \cdot \cos^2 \theta) \cdot \tan \phi \quad (9)$$

onde  $c_r$  é a coesão das raízes [N/m<sup>2</sup>] e  $c_s$  é a coesão do solo [N/m<sup>2</sup>]. O lado direito da Equação (9) representa as forças de estabilidade e o lado esquerdo as forças instabilidade. Portanto, pode-se calcular o fator de segurança ( $FS$ ):

$$FS = \frac{c_r + c_s + [\rho_s \cdot g \cdot z - \rho_w \cdot g \cdot h] \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi}{\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \quad (10)$$

Assim, quando as forças que promovem a estabilidade forem exatamente iguais às forças que levam a instabilidade, o  $FS$  é igual a 1. Já quando  $FS < 1$ , a encosta está predisposta à falha; e onde  $FS > 1$ , a encosta tende à estabilidade. Não se pode designar um valor que representa a estabilidade absoluta, apenas por um aumento da probabilidade de estabilidade com o aumento do valor de  $FS$  (SELBY, 1993).

### Modelo Hidrológico

Os modelos hidrológicos TOPMODEL (BEVEN e KIRKBY, 1979) e TOPOG (O'LOUGHLIN, 1986) apresentam proposições que embasam o modelo hidrológico de estado uniforme. O mesmo simula a variação padrão do comportamento espacial de umidade do solo (altura da coluna d'água do solo), considerando estado de recarga uniforme, em um período chuvoso que, evidentemente, não está em estado uniforme.

Na Figura 2, os símbolos  $a$ ,  $b$  e  $q$  são a área de contribuição à montante, o comprimento de contorno do limite inferior de cada elemento e a taxa de recarga uniforme, respectivamente. Por fim,  $h$  e  $z$  representam a coluna d'água a partir das espessuras do fluxo subsuperficial e da massa instável, respectivamente.

O'Loughlin (1986) definiu um índice de umidade (*wetness*) representada por  $w$  [m/m] na condição de saturação total do solo. Portanto, nessa condição de saturação do solo, obtém-se a quantidade de água que entra em determinado estado uniforme sobre a quantidade máxima de saída pela camada de solo:

$$W = \frac{q \cdot a}{b \cdot T \cdot \sin \theta} = \frac{Ks \cdot \sin \theta \cdot h \cdot \cos \theta \cdot b}{Ks \cdot \sin \theta \cdot Z \cdot \cos \theta \cdot b} = \frac{h}{Z} \quad (11)$$

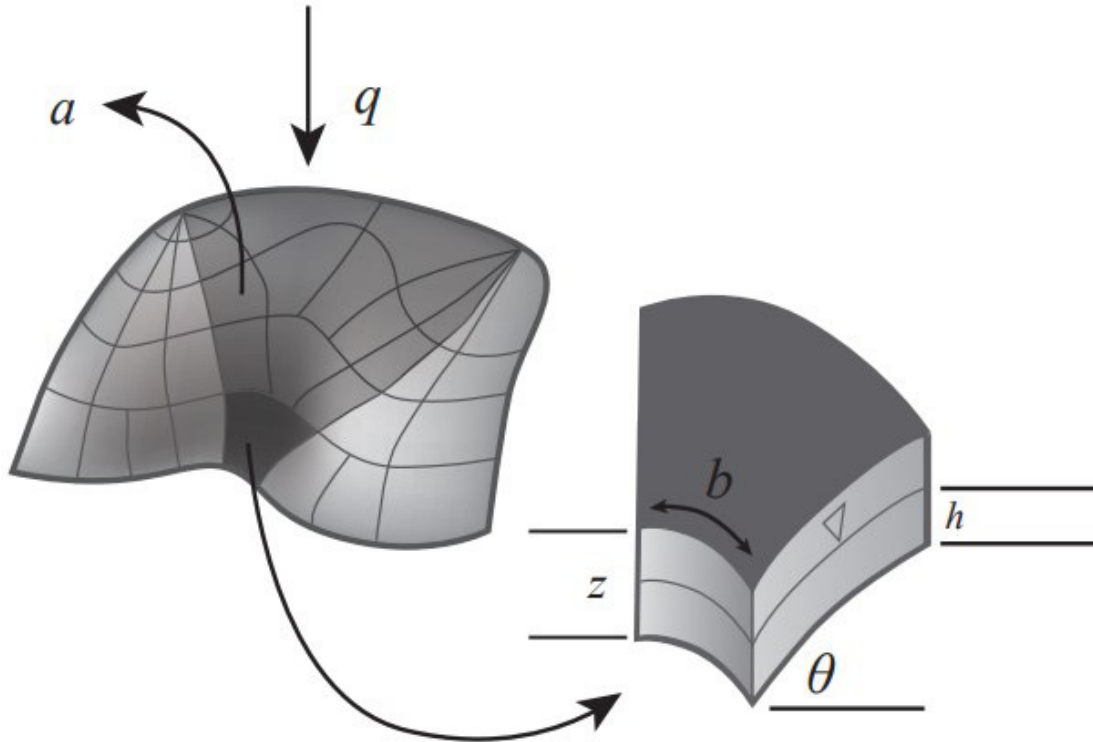


Figura 2 - Elementos usados pelo modelo hidrológico de estado uniforme. (Adaptado de Montgomery e Dietrich, 1994).

### Combinação dos Modelos

A combinação do modelo de encosta infinita e do modelo hidrológico de estado uniforme é gerada a partir do rearranjo da Equação (9) em função de  $h/z$  com consideração de  $c = c_s + c_r$ :

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) + \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot \tan \phi \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \quad (12)$$

Igualando as Equações (11) e (12), obtém-se:

$$\frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \sin \theta} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) + \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot \tan \phi \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \quad (13)$$

No caso do SHALSTAB, a Equação (13) é solucionada como:

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \sin \theta \cdot \left\{ \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) + \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot \tan \phi \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \right\} \quad (14)$$

Em síntese, os parâmetros necessários para aplicação do modelo são seis, sendo que  $\theta$  e  $a$  provêm do modelo digital do terreno (MDT);  $\phi$ ,  $c$ , e  $\rho_s$  podem ser obtidos pela amostragem do solo em campo e  $z$  pode ser observado em campo ou pela literatura.

### Classificação de classes de estabilidade

Analisando a relação entre  $h/z$  igualada a zero (ausência de coluna d'água do solo) na Equação (12), observa-se que a elevada declividade da encosta se sobressai aos parâmetros de resistência do solo:

$$\tan \theta \geq \tan \phi + \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \quad (15)$$

Nessa condição, é estabelecida a classe incondicionalmente instável, geralmente identificada pelas áreas de difícil acumulação dos solos em função da declividade.

No entanto, tem-se a situação em que  $h/z$  representa a saturação total do solo, no contexto em

que parâmetros de resistência serão sempre maiores ou iguais à declividade. Essa situação representa a determinação da classe incondicionalmente estável:

$$\tan \theta \leq \tan \phi \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) + \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \quad (16)$$

Ela pode ser comumente identificada pelas áreas de baixa declividade que não apresentam condições para escorregamento, embora esteja sobre intensas cargas hidráulicas.

Assim sendo, o SHALSTAB estimou a proporção saturada da espessura do solo e originalmente classificou 7 classes de instabilidade (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994). A partir do valor de  $q/T$  é calculado o grau de instabilidade para cada célula da área de estudo. Em função dessa razão apresentar valores muito pequenos, os resultados do modelo se dão em escala logarítmica (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998). A Tabela 1 apresenta as sete classificações.

**Tabela 1: Classes de acordo com o modelo SHALSTAB**

ID	Classes
1	Incondicionalmente instável
2	$\log q/T < -3,1$
3	$-3,1 < \log q/T < -2,8$
4	$-2,8 < \log q/T < -2,5$
5	$-2,5 < \log q/T < -2,2$
6	$\log q/T > -2,2$
7	Incondicionalmente estável

Michel *et al.* (2015a) propuseram uma reclassificação de sete classes para quatro classes, sendo elas: incondicionalmente instável, incondicionalmente estável, instável e estável. As duas primeiras classes estão vinculadas às condições enquadradas nas Equações (15) e (16), respectivamente. Já as classes instável e estável, derivadas do agrupamento das cinco classes intermediárias, são determinadas pela resolução da Equação (14). Logo, para a condição de instabilidade, o lado direito da Equação (14) deve ser maior. No entanto, quando o lado esquerdo da igualdade for maior, existem condições para classificação de estabilidade. Em vista desta reclassificação, observa-se que um único valor de  $q/T$  viabiliza a determinação do limiar de estabilidade e instabilidade.

## Trabalhos com SHALSTAB no Brasil

### Distribuição temporal e espacial dos trabalhos

Os trabalhos técnico-científicos que aplicaram o modelo SHALSTAB para mapeamentos de escorregamentos no Brasil, presentes neste estudo, foram pesquisados via internet (site de congressos, universidades, entre outros) e cedidos por alguns autores. Assim, este estudo é constituído por 39 trabalhos que abrangem: artigos; teses, dissertações, trabalhos de conclusão de curso (TCC) e relatórios técnicos. Aqui, salienta-se que alguns pesquisadores publicaram artigos científicos com base em seus TCCs, dissertações e teses. Nestes casos, apenas o artigo foi analisado. A Figura 3 apresenta a quantidade de trabalhos de acordo com as categorias mencionadas no período de 2002–2016.

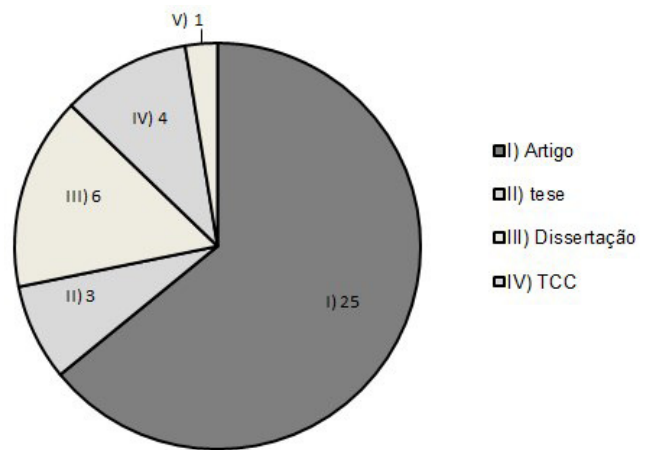


Figura 3 - Número de publicações dos trabalhos com o modelo SHALSTAB no Brasil no período de 2002–2016.

No Brasil, o modelo SHALSTAB surgiu no final do século XX. A aplicabilidade do modelo teve impulso com a tese de doutorado de Guimarães (2000) aplicado na bacia do rio Quitite e Papagaio, no Rio de Janeiro. Antes disso, nesta mesma região, diversos trabalhos foram apresentados em forma de artigos em congressos (GUIMARÃES *et al.*, 1999a e 1999b; VIEIRA *et al.*, 1999). Embora o trabalho de Guimarães (2000) marque historicamente o pioneirismo do SHALSTAB no país, a Figura 4 apresenta, em perspectiva temporal, as publicações aqui analisadas. Neste panorama, observou-se que dentro o período de 2002–2016, a produção científica teve maior frequência no ano de 2015, com destaque na produção de artigos. Ainda que já se conjecturasse os artigos como a categoria de maior frequência, em comparação com as demais

categorias, exceto relatório técnico, subsidiarem em grande parte a produção dos mesmos. Observou-se que de 2002 até 2015 a produção quadruplicou.

A Figura 5 apresenta a distribuição espacial dos trabalhos com o modelo SHALSTAB no Brasil. A maioria das áreas de estudos está localizada em relevo de serra, ou seja, áreas com declividade acentuada. A forte declividade aliada ao clima tropical (característico por altos índices pluviométricos) são condições favoráveis para desencadear escorregamentos de encosta. Destas áreas de estudos, 10.557 km<sup>2</sup> foram

mapeados com o SHALSTAB. No entanto, deste total não estão contempladas as seguintes áreas de estudos: estrada BR 356 em Ouro Preto – MG (REDIVO *et al.*, 2004); estrada Rio-Teresópolis (CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2005); Rodovia BR-101 km 48 (Rio-Santos) (RABACO, 2005); bacia do córrego Independência (ZAIDAN e FERNANDES, 2009), Bacias no município de Tubarão – SC (MICHEL e HIGASHI, 2010) e nas encostas do Morro Santana entre os municípios de Porto Alegre e Viamão – RS (MICHEL *et al.*, 2015b), devido à ausência de informação da área total.

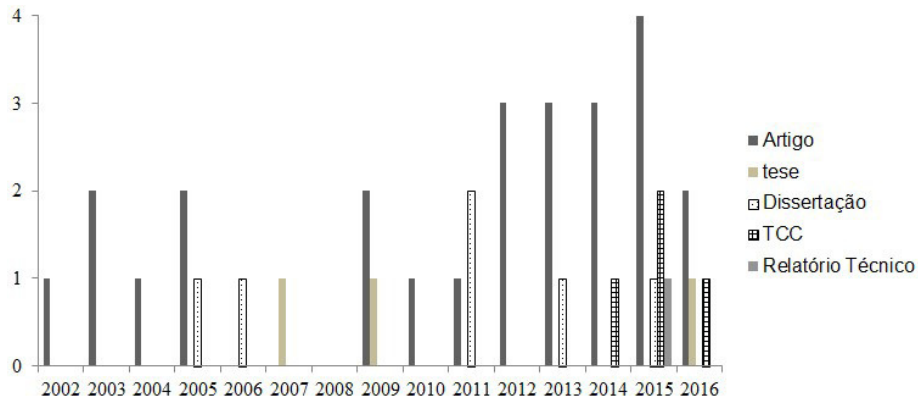


Figura 4 - Representação em cenário temporal das produções científicas analisadas (2002–2016).

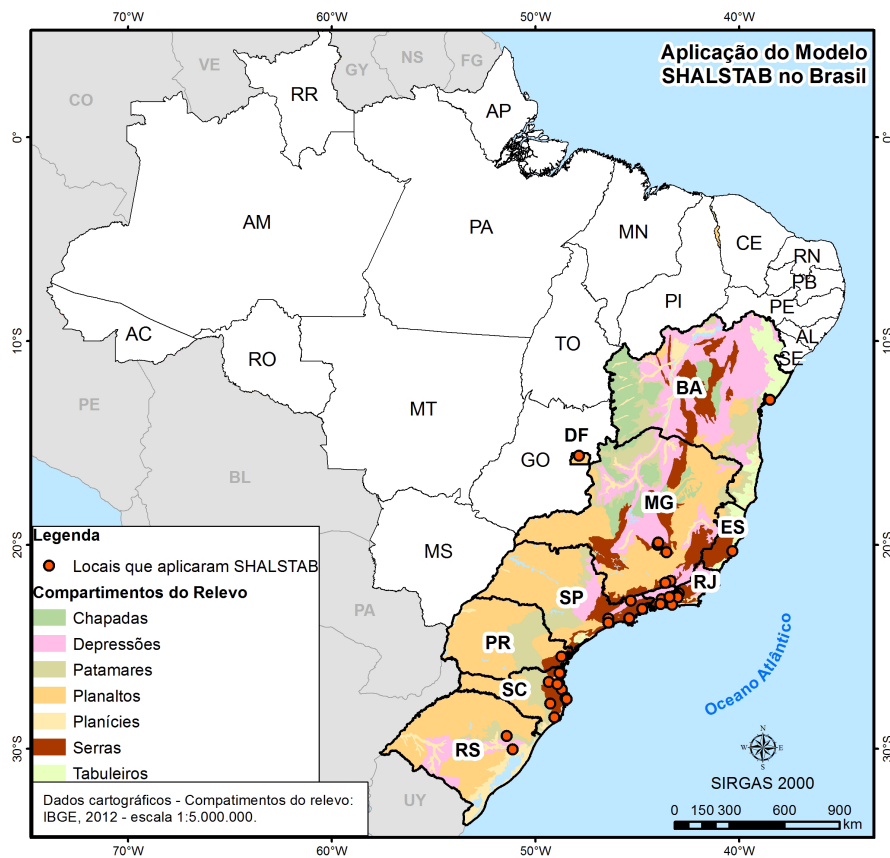


Figura 5 - Distribuição espacial dos locais que aplicaram o modelo SHALSTAB no Brasil

Com base na informação dos locais da Figura 5, os trabalhos foram categorizados por estados (Figura 6). A maior frequência de trabalhos publicados contempla áreas de estudos nos estados de SC, RJ, SP e MG. Os demais estados não ultrapassaram mais de 3 publicações. Além disto, os estados do RJ, SC e RS apresentaram maior densidade espacial, visto que alguns trabalhos abrangeram a mesma área de estudo, sendo elas: bacia do rio Quitite e Papagaio – RJ (GUIMARÃES *et al.*, 2003; GOMES *et al.*, 2005 e 2013); bacia do rio Cunha – SC (MICHEL *et al.*, 2012a e 2012b; e REGINATTO *et al.*, 2012) e bacia do rio Forromeco – RS (SCHENKEL *et al.*, 2015; RIFFEL *et al.*, 2016), respectivamente.

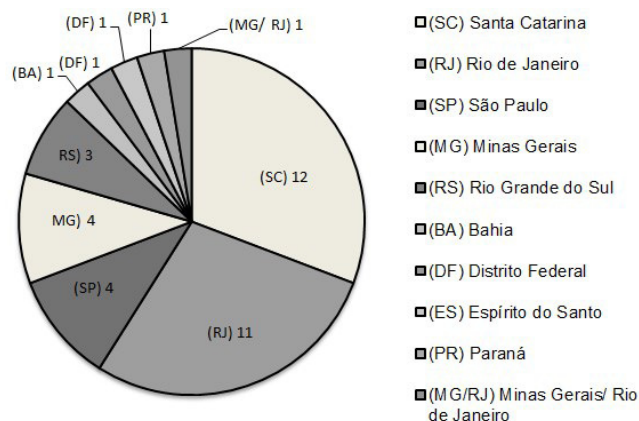


Figura 6 - Número de trabalhos por estado que aplicaram o modelo SHALSTAB

#### Avaliação de tipos de metodologia adotada

Os escorregamentos são fenômenos complexos, desencadeados por uma ampla gama de fatores, sendo, portanto, passíveis de análise sob distintos enfoques ambientais. Assim, vê-se na bibliografia, um mesmo autor com publicações diversas para uma mesma área de estudo. Apesar de o critério de pesquisa adotado no presente trabalho ter abordado a relação de autor por área de estudo, não serão aqui quantificadas as publicações por autor, mas sim, elucidadas as diferentes metodologias de aplicação do modelo SHALSTAB.

Em contrapartida, nos seguintes casos, serão quantificadas mais de uma publicação na relação apresentada: a) quando em distintas publicações são adotados diferentes métodos para obtenção dos parâmetros de entrada do modelo; b) incremento de novos parâmetros; e c) modificação do algoritmo original do SHALSTAB.

Sendo assim, a Figura 7 apresenta a distribuição espacial das áreas de estudos das publicações, associadas aos respectivos autores, que foram possíveis de serem analisadas. Ressalta-se que alguns locais estão vinculados a mais de uma publicação; neste caso, as numerações são identificadas em subníveis.

O modelo SHALSTAB necessita de seis variáveis conforme já expresso na Equação (14). Entretanto, nem todas as variáveis apresentadas por tal equação são parâmetros de entrada do modelo. Assim, de acordo com a proposta original, para aplicação do modelo são necessários os seguintes parâmetros de entrada:  $\phi$ ,  $c$ ,  $\rho_s$  e  $z$ . Embora exista a opção que desconsidera  $c$  na plataforma original do modelo (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998), muitos trabalhos já demonstraram a significativa influência deste parâmetro nos resultados. Realizando a análise de sensibilidade, que tem o intuito de auxiliar na identificação de parâmetros mais relevantes do modelo, Hammond *et al.* (1992), Borga *et al.* (2002) e Michel *et al.* (2013) demonstraram a forte sensibilidade do mesmo ao valor de  $c$ . Ramos *et al.* (2003) demonstraram que ao considerar a coesão do solo, as classes de estabilidade aumentaram, já que é um parâmetro relacionado à resistência do solo. Portanto, com base nos trabalhos analisados, 74% consideraram o parâmetro de coesão do solo, enquanto 26% não adotaram. Além disto, observou-se que as informações dos parâmetros de entrada do modelo SHALSTAB são providas, frequentemente, de três maneiras: valores propostos pelo *default* do *software*, considerando ângulo de atrito  $45^\circ$  e densidade do solo  $1,6 \text{ g/cm}^3$  (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998); e/ou valores providos de medições realizadas na própria área de estudo; e/ou valores de referência, proveniente de medições de campo realizados em outra área de estudo. Em estudo realizado por Ramos *et al.* (2003), foi observado que ao comparar as simulações derivadas de valores propostos pelo *default* e de valores de referência de outra área de estudo, os melhores resultados foram apresentados por esta última, aliada à condição de discretização espacial das características geotécnicas. Desta forma, 46% dos trabalhos analisados adotaram valores de referência de outras áreas de estudo; desta frequência, 44% adotaram os valores dos parâmetros propostos pelo *software*. Já 49% dos trabalhos utilizaram valores dos parâmetros correspondentes à própria área de estudo. Por fim, os 5% restantes, representados pelos trabalhos de Rabaco (2005) e Michel *et al.* (2015b), adotaram



concomitantemente as duas das opções mencionadas (parâmetros da área de estudo e de referência). À vista disto, observa-se que embora sejam necessários

tempo e altos investimentos financeiros para coleta de informações em campo, o percentual dos trabalhos que aderiram tais métodos foram superiores.

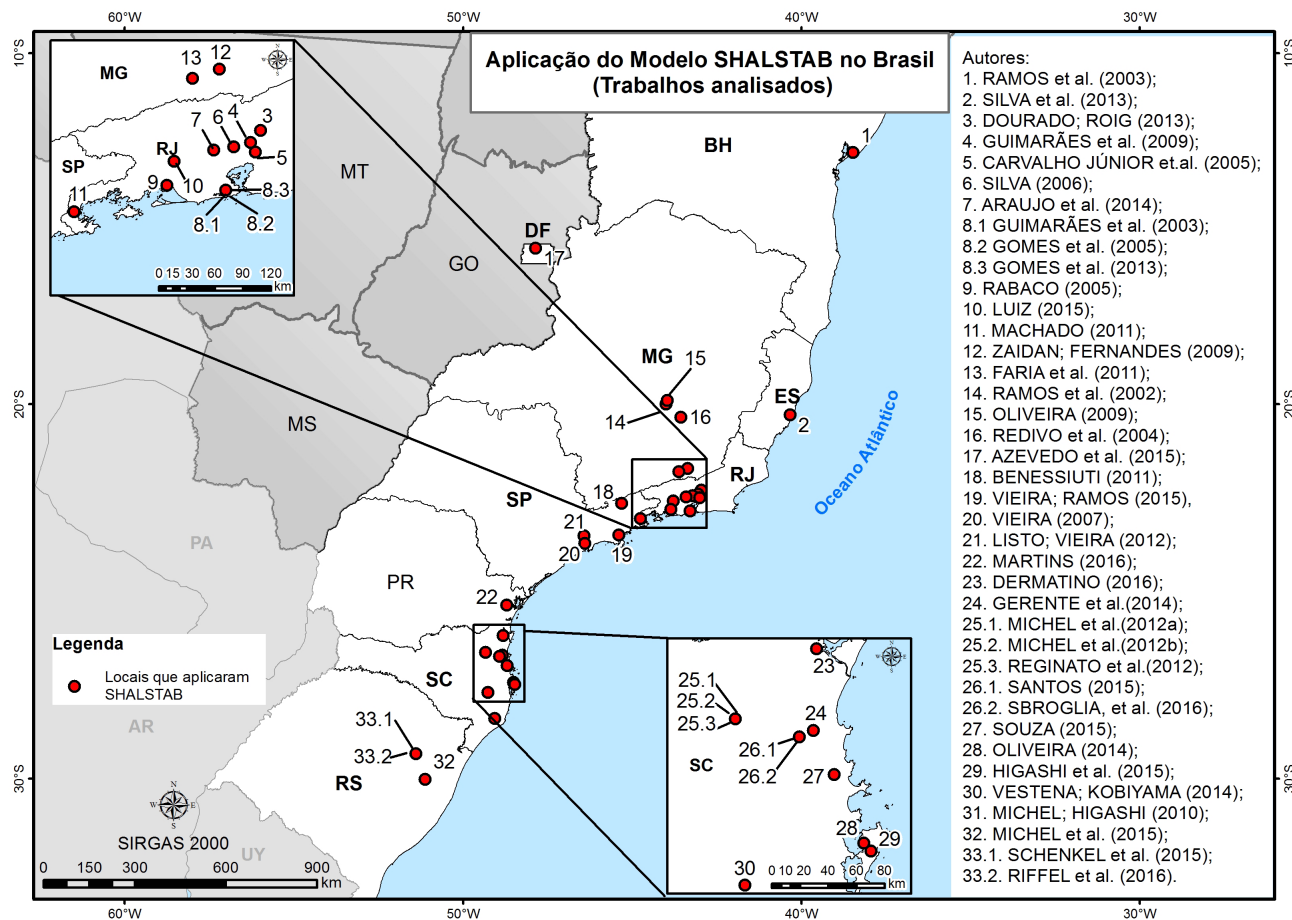


Figura 7 - Distribuição espacial dos trabalhos analisados em detalhe.

As variáveis  $a$ ,  $b$  e  $\theta$  são obtidas do MDT. Para tanto, a obtenção do MDT de qualidade torna-se importante, pois a capacidade de gerar um modelo que represente de forma mais fidedigna possível o relevo permite a indicação de onde haverá maior concentração de água, repercutindo na maior predisposição de falha (MICHEL *et al.*, 2010). Neste sentido, Gomes *et al.* (2004 e 2005) observaram, ao comparar distintas escalas na produção do MDT, a extrema importância da adoção da maior escala (1:10.000) com resolução espacial de 2 m no aumento do desempenho em áreas críticas. Os autores mencionaram a sensibilidade do parâmetro  $a$  quanto à variação da escala. Ainda comentaram que aderindo a menor escala há um avanço que vai além da análise exploratória do fenômeno de escorregamento, concluindo que a utilização da escala

menor (1:50.000) e resolução espacial de 10 m é apropriada para análises preliminares do fenômeno. De maneira similar ao trabalho anterior, Santos (2015) obteve melhores resultados, com incremento de 16% de acerto entre classes instáveis e as cicatrizes de escorregamento, na escala maior (1:10.000) quando comparada a escala menor (1:50.000). Zhang e Montgomery (1994) verificaram a influência do tamanho do *grid* na representação das zonas de saturação. Observaram que o tamanho de 10 m do *grid* apresenta melhoria significativa quando comparado com 30 m e 90 m. No entanto, não houve melhoria expressiva em comparação aos tamanhos de *grid* de 2 m e 4 m.

No Brasil, dentre os trabalhos aqui analisados, observa-se que 54% deles adotaram escala maior ou

igual a 1:10.000, enquanto 8% utilizaram escalas menores que 1:10.000, variando até 1:25.000. Aqui nota-se que os mapas cadastrais (registros de terras para fins de cobrança de taxas) são comumente produzidos em escalas que variam de 1:25.000 a 1:2.500 no Brasil (Anderson, 1982). Portanto, a escala de 1:25.000 pode ser um valor limite de diversos usos, o que justifica a atenção especial no mesmo. Já as demais escalas, menores que 1:25.000, contemplaram 36% dos trabalhos. Dentre as frequências supramencionadas, não foi incluído o trabalho de Silva (2006) em Petrópolis, RJ (bairro Quitandinha), dado que neste não consta a informação da escala adotada. Ainda que a maioria dos trabalhos tenham demonstrado qualidade na precisão do MDT, é notável a frequência significativa da dificuldade de muitos estados brasileiros obterem dados de relevo em grande escala.

Neste contexto, cabe mencionar que embora os valores de declividade e área de contribuição, derivados do MDT, sejam fornecidos evidentemente, conforme o valor de cada célula da grade, os valores dos parâmetros de solo não são apresentados nesta mesma perspectiva espacial na rotina original do SHALSTAB. O modelo original admite valores constantes para toda área. Assim sendo, ao considerar os referidos aspectos originais do modelo, muitos trabalhos no Brasil, no intuito de melhorar a metodologia, utilizaram técnicas que possibilitaram a variação dos parâmetros do solo conforme cada classe mapeada. Tais considerações apontam para os trabalhos de Ramos *et al.* (2003), Michel *et al.* (2012b), Azevedo *et al.* (2015); Higashi *et al.* (2015); Santos (2015); Souza (2015); Dermatino (2016); e Sbroglia *et al.* (2016). Outro aspecto, não menos relevante no aprimoramento do algoritmo do modelo, é a influência da vegetação na estabilidade das encostas, com a inserção de variáveis de coesão das raízes e peso da vegetação, proposto por Michel *et al.* (2012b). Aliado a isto, tais autores ainda propuseram a interface em ambiente do *software ArcGis 9.3* por intermédio da ferramenta *raster calculator*. Isto representou um significativo avanço, já que o *software ArcView 3.2*, onde o modelo era originalmente executável, apresentava poucos usuários. Ainda é importante mencionar o trabalho de Sbroglia, *et al.* (2017) que desenvolveu a ferramenta

*Automatic SHALSTAB Analysis (ASA)* que apresenta a rotina automatizada do algoritmo do SHALSTAB. Esta ferramenta é uma extensão que pode ser adicionada ao *toolbox* do *ArcGis*.

Além dos processos supracitados, há outros comumente embasados no inventário de cicatrizes: calibração e validação. Ainda que tais processos não sejam uma condição para aplicação do modelo, são frequentemente adotados quando se requer verificar a acurácia dos mapas produzidos. Logo, é a partir da calibração que o modelo poderá se aproximar da representatividade do fenômeno de escorregamento na área de estudo. A calibração é importante visto que cada região possui particularidades geotécnicas, pluviométricas e geomorfológicas que interagem de diferentes maneiras. Este processo é necessário, principalmente, quando não há obtenção direta de amostras para definição dos valores numéricos adotados aos parâmetros, situação comum em muitos trabalhos por despender tempo e recursos financeiros, conforme já observado. No caso do modelo SHALSTAB, a calibração é efetivada quando é determinado o valor do parâmetro livre  $q/T$ , embasado no enquadramento das classes instáveis e das cicatrizes de escorregamentos, podendo desta forma ser estabelecido o limiar de instabilidade. Dietrich *et al.* (1998) realizaram a calibração por intermédio da correlação das áreas de cicatrizes de escorregamentos e classes de instabilidade. Atentaram para a situação da relação de maior classe de instabilidade contemplada em menor área possível dentro da cicatriz, ser um desempenho aceitável do modelo. Isso devido à variação dos parâmetros não abranger grandes proporções de áreas instáveis que não retratam a realidade. No trabalho dos autores supramencionados, na costa da Califórnia nos EUA, o limiar de instabilidade  $\log q/T = -3,1$  foi adotado com o melhor desempenho. Com este limiar, o modelo classificou 8% da área total como instável, captando 56% dos escorregamentos.

No Brasil, 46% dos trabalhos analisados realizaram calibração, enquanto 54% não calibraram. Dos trabalhos calibrados, apoiados em inventário de cicatrizes cartografadas, 78% adotaram geometria poligonal para representação das cicatrizes, realizando análises quantitativas. No entanto, 22% adotaram

representação geométrica pontual, baseando-se em análises qualitativas (identificação visual). Levando em conta que o modelo SHALSTAB permite identificar áreas com potencial início de escorregamento (ruptura), considerou-se válido analisar o critério utilizado, nos trabalhos que realizaram calibração, para delimitar as cicatrizes de escorregamento.

Assim, observou-se que 39% contemplaram somente a zona de ruptura; 33% consideram zona de ruptura, transporte e deposição. Em 28% dos trabalhos não foram identificados com clareza o critério de delimitação. Aqui salienta-se que o SHALSTAB trata do mecanismo do rompimento de encosta, ou seja, a iniciação do movimento. Em outras palavras, o modelo avalia somente a zona de ruptura. Então, caso um estudo considere além de zona de ruptura, as zonas de transporte e deposição, o resultado de calibração pode tornar-se pior.

Nesta conjuntura de análise, foram observadas ainda, diferentes ferramentas de avaliação utilizadas para calibração. Esta etapa é realizada pelo ajuste do parâmetro livre  $q/T$  de forma que haja verificação de coincidência espacial das cicatrizes e classes de instabilidade geradas pelo modelo. Neste sentido, para compor esta verificação, grande parte dos trabalhos no Brasil adotou o método de variação de um ou mais parâmetros do modelo, geralmente optando por aquele com maior possibilidade de erro. Além deste, 17% dos trabalhos adotaram os índices desenvolvido por Gao (1993). Estes índices indicam a concentração de cicatrizes (CC) e o potencial de escorregamentos (PE). O primeiro índice aponta distribuição das cicatrizes de escorregamentos em todas as classes de instabilidade. O segundo indica esta mesma distribuição das cicatrizes, porém viabiliza verificar o potencial de representatividade de cada classe na bacia. Outro método adotado por Reginatto *et al.* (2012) é o derivado das ferramentas estatísticas *Generate Random Grid* e *Distribution Random*, inseridos no módulo SHALteste disponível no *software ArcView* (DIETRICH *et al.*, 2000; RAMOS *et al.*, 2002). Este método permite que seja verificado o desempenho do modelo a partir da geração de pontos aleatórios para serem comparados com os locais das cicatrizes de escorregamentos em cada categoria classificada pelo modelo. De maneira

geral, o intuito é que o comportamento aleatório seja diferente das cicatrizes, já que isto representa bom desempenho do modelo. Já o trabalho de Luiz (2015) adotou o índice de exatidão global onde é possível avaliar a precisão de acerto, a partir de uma matriz de confusão, de classes estimadas correlacionadas às cicatrizes. No trabalho do autor supramencionado, foram consideradas as cicatrizes de escorregamentos e as áreas circunvizinhas demarcadas por um *buffer* de igual dimensão em área, assim sendo possível verificar por intermédio de um ranque o maior índice de exatidão global. O trabalho de Riffel *et al.* (2016) adotou o índice Kappa proposto por Cohen (1960). Este índice permite comparar mapas de susceptibilidade, assim como realizar validação de modelos a partir da probabilidade de concordância observada (dados medidos) e a probabilidade de concordância esperada (considerando episódios ao acaso). Por último, cabe mencionar o índice de ajuste do modelo proposto por Guimarães *et al.* (2003) que combinou com os índices de acurácia do produtor e usuário, criados por Story e Congalton (1986). O índice proposto indica a porcentagem de classes de instabilidade preditas dentro da cicatriz de escorregamento a partir da razão entre a quantidade predita corretamente dentro da cicatriz e o número pixel inserido na mesma.

Os trabalhos ainda foram caracterizados em função da adoção do limiar de instabilidade. Logo, os trabalhos que utilizaram o limiar proposto pelo *default* do software foram distinguidos dos que adotaram outro limiar. Portanto, 83% adotaram o limiar de instabilidade proposto pelo *default* ( $\log q/T = -3,1$ ), enquanto 17% adotaram outros limiares. Esta última porcentagem se refere aos trabalhos de Michel *et al.* (2012a), que adotou o limiar  $\log q/T$  de  $-3,4$ , Schenkel *et al.* (2015) e Riffel *et al.* (2016), que adotaram diferentes limiares para mesma área de estudo, sendo eles  $\log q/T$  de  $-2,5$  e  $\log q/T$  de  $2$ , respectivamente.

Outro processo importante para a geração de mapas de suscetibilidade de escorregamento é a validação do modelo. É por intermédio desta que é possível verificar o nível de confiabilidade dos resultados apresentados pelo modelo. Beguería (2006) comenta que a validação é fundamental, pois a partir das informações que apresentem devidamente o grau

de acurácia e poder preditivo do fenômeno, é possível que sejam tomadas de decisões assertivas.

A validação de modelos de susceptibilidade de escorregamentos pode ser realizada similarmente ao processo de calibração, ou seja, analisando a coincidência espacial das amostras do inventário de cicatrizes e as classes de instabilidade. Estas amostras podem ser as mesmas utilizadas para a modelagem ou outras que sejam independentes deste processo. No entanto, esta última tem maior respaldo internacional. Isso se deve à capacidade da predição não estar embasada ao nível de ajuste do modelo aos dados (GUZZETTI *et al.*, 2006; COROMINAS *et al.*, 2014). Isto posto, com base na separação dos eventos utilizados para modelagem e para validação, é possível adotar os seguintes métodos, conforme propostos por Chung e Fabbri (2003): temporal, espacial ou aleatório. O primeiro método propõe que seja estabelecida uma data que permita a divisão dos eventos de escorregamentos em períodos distintos a partir de uma data limite que caracterizará eventos passados e futuros. Michel *et al.* (2015a) observa que caso sejam consideradas variáveis transientes (séries de chuva), é necessário que o inventário seja discretizado conforme a data (e horário) de ocorrência do escorregamento, podendo assim vincular a ocorrência de um determinado grupo de escorregamentos a uma estação chuvosa específica. Ainda, convém mencionar que de acordo com Garcia (2012), o método de validação temporalmente separado seria o mais adequado para modelos direcionados à previsão de escorregamentos rasos. Isto em função de serem geralmente desencadeados pela ocorrência de chuvas cuja distribuição, intensidade e duração são normalmente bastante distintas. Desta forma, atribuindo um período significativo entre os subconjuntos de dados, é possível que processos relacionados aos eventos de escorregamentos utilizados para validação possam diferir daqueles que são usados para calibração, evitando a polarização de eventos isolados. O segundo método considera a divisão espacial do terreno, composto pelas cicatrizes de escorregamento, em duas partes direcionadas para modelagem e para predição. Cabe observar que embora este método admita a aplicação do modelo para áreas lindeiras e com características geológicas similares, os resultados podem ser questionáveis em vista da variabilidade de

valores dos parâmetros nesse contexto (CARRARA *et al.*, 2008). Já o terceiro método, aplicado por Dietrich *et al.* (2001), é similar ao anterior, porém a divisão espacial do inventário de escorregamentos é aleatória, ou seja, irregular abrangendo toda a área de estudo (CHUNG e FABBRI, 2003). Em face ao exposto, 50% dos trabalhos calibrados verificaram a qualidade do modelo. Os mesmos adotaram o método de coincidência espacial contemplando as mesmas cicatrizes de escorregamentos utilizados para modelagem.

Diante disso, independente da escolha do método para validar o modelo, é imprescindível a determinação de uma ferramenta que possibilite avaliar a qualidade dos resultados. No Brasil, o método utilizado por Dietrich *et al.* (2001) é amplamente adotado, contemplando 44% dos trabalhos validados. Esse método relaciona as classes de estabilidade e a porcentagem cumulativa de área e escorregamento de cada classe, considerando o modelo bem sucedido quando as cicatrizes são mais comuns nas áreas menos estáveis, abrangendo simultaneamente pequena porcentagem da área da bacia. Já o segundo índice mais utilizado é o proposto por Gao (1993), que compôs 22% dos trabalhos validados. Além destes, convém mencionar o índice de acerto (*IA*) e o índice de erro (*IE*) propostos por Sorbino *et al.* (2010) e curva de validação aderidos por outros trabalhos. Michel *et al.* (2012a) adotou o *IA* e *IE*. O primeiro índice corresponde à porcentagem de área, definida como instável pelo modelo, que coincide com a área de ocorrência de escorregamentos. Já o segundo índice é a razão percentual entre as áreas, classificadas como instáveis pelo modelo, que não coincidem com o inventário de cicatrizes e áreas da bacia que não foram afetadas por escorregamentos. Sbroglia *et al.* (2016) adotou a curva de validação. Esta curva é gerada a partir da correlação entre a porcentagem acumulada de cicatrizes de escorregamentos e as classes de suscetibilidade, abrangendo a área de cada classe até perfazer a totalidade percentual da bacia. Ainda, neste contexto, cita-se o índice Kappa e acurácia do produtor aplicado por Riffel *et al.* (2016) para validação do modelo SHALSTAB.

Por fim, todas as análises realizadas até o presente momento se encontram representadas espacialmente pela Figura 8.

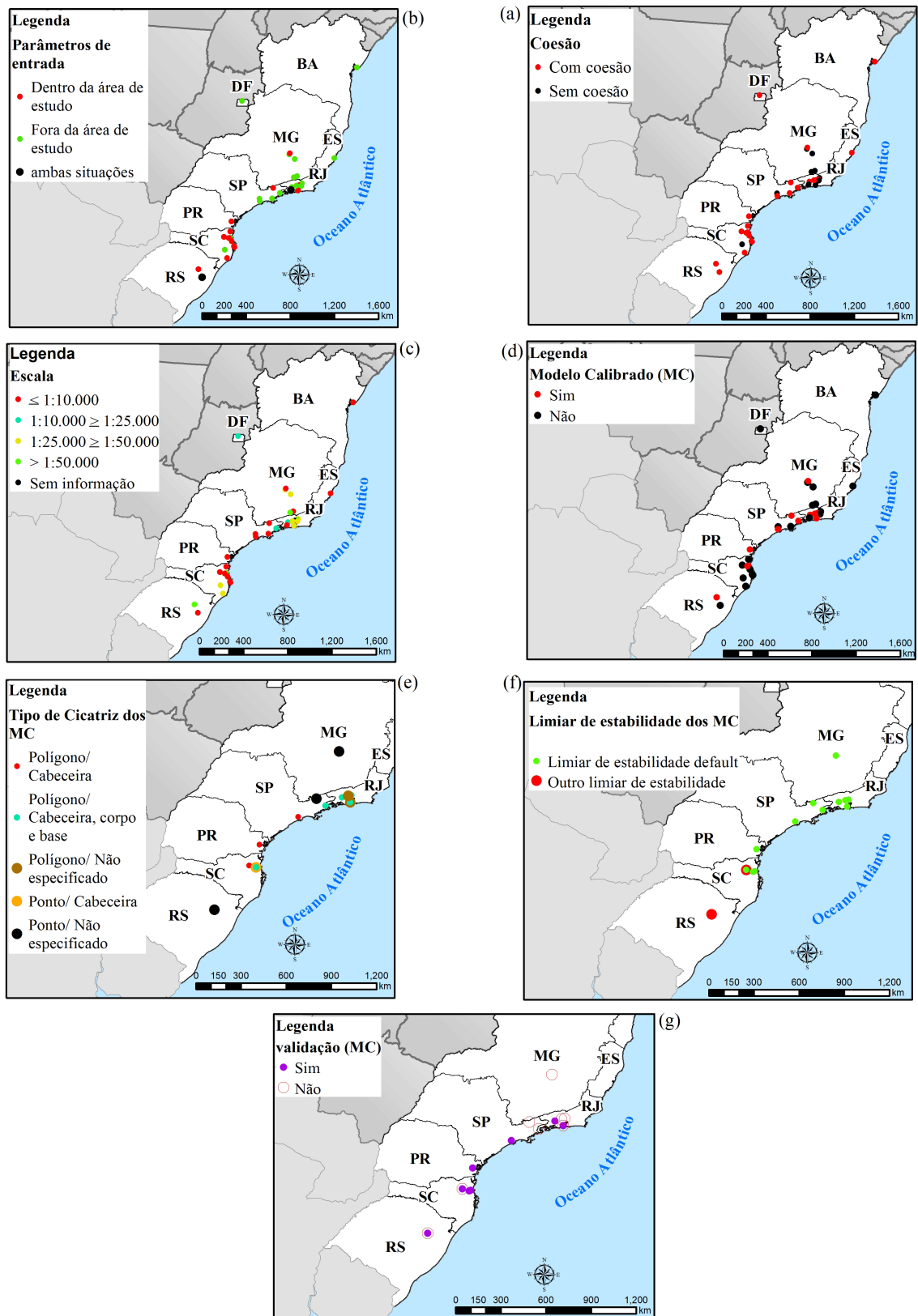


Figura 8 - Representação espacial associada às metodologias adotadas na aplicação do modelo SHALSTAB. (a) Origem dos parâmetros de entrada dos trabalhos; (b) Trabalhos que adotaram o parâmetro coesão; (c) Enquadramento dos trabalhos em faixas de escalas; (d) Trabalhos calibrados; (e) Tipologia do método adotado para representação das cicatrizes de escorregamento; (f) Limiar de estabilidade adotado; e (g) Trabalhos calibrados que realizaram validação

## Conclusões

O modelo SHALSTAB vem viabilizando a obtenção de resultados confiáveis para predição de escorregamentos. Isso se deve ao seu embasamento em leis físicas, as quais permitem a diminuição da subjetividade à previsão de escorregamento, ao acesso gratuito na internet, e à fácil interface com SIGs.

No Brasil, a partir do trabalho precursor da tese de doutorado de Guimarães (2000), e artigos científicos derivados, trabalhos com o modelo SHALSTAB se expandiram por vários estados devido a suas vantagens. No entanto, embora estes aspectos sejam positivos, há que atentar para a complexidade do fenômeno. Diante dos fatores topográficos, geotécnicos e hidrológicos envolvidos, os bons resultados do modelo estão associados à quantidade (e.g., pontos amostrais para análises geomecânicas) e qualidade espacial (e.g., tamanho da grade do MDT) destas informações.

Além disso, percebe-se que a tênue conscientização da importância dos processos de calibração e validação do modelo acabam por limitar a assertividade adequada de aplicação dos mapas gerados. Aliado a isto, a falta de padronização na literatura da representação das cicatrizes nos inventários tendem a propagar a imprecisão destes mapas. Visto que dependente do critério adotado, dimensões dos locais afetados podem ser superestimadas ou subestimadas, o que pode comprometer recursos humanos e financeiros.

## Agradecimentos

Os autores agradecem aos professores Dr. Renato Fontes Guimarães, Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes e Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior (Universidade de Brasília) pelas valiosas informações sobre primeiros trabalhos brasileiros com o SHALSTAB.

## Referências Bibliográficas

ANDERSON, P.S. **Princípios de cartografia básica. Vol. 1.** Rio de Janeiro: FIBGE, 1982. 83p.

ARAÚJO, J.P.C.; SILVA, L.M.; SILVA, F.A.D.; FERNANDES, N.F. Previsão de escorregamentos translacionais rasos e área de dutos: estudo de caso do maciço do Tinguá na reserva biológica federal do Tinguá (RJ). **Revista Geonorte**, Edição Especial 4, v. 10, n. 1, p. 224–229, 2014.

AZEVEDO, G.F.; CARVAJAL, H.E.M.; SOUZA, N.M. Avaliação determinística e probabilística da susceptibilidade a ocorrência de deslizamentos pela aplicação do modelo SHALSTAB. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 17, 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa – PB: INPE. 2015. 8p.

BARREDO, J.I.; BENAVIDES, A.; HERVÁS, J.; WESTEN, C.J. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. **JAG: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 2, p. 9–23, 2000.

BEGUERÍA, S. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. **Natural Hazards**, v. 37, p. 315–329, 2006.

BENESSIUTI, M.F. **Estudo dos mecanismos de instabilidade em solos residuais de biotita-gnaise da bacia do Ribeirão Guaratinguetá.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental; área de concentração: geotecnia ambiental) UNESP – Universidade Estadual Paulista, Bauri – São Paulo. 2011. 128p.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/ Un modèle à base physique de zone d'apple variable de l'hydrologie du basin versant. **Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology**, v. 24, n. 1, p. 43–69, 1979.

BORGA, M.; FONTANA, G.D.; GREGORETTI, C.; MARCHI, L. Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability. **Hydrological Processes**, v. 16, p. 2833–2851, 2002.

CARRARA, A.; CROSTA G.; FRATTINI, P. Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. **Geomorphology**, v. 94, p. 353–378, 2008.

CARVALHO JUNIOR, O.A.; BLOISE, G.L.F.; GOMES, R.A.T.; RAMOS, V.M.; GUIMARAES, R.F. Previsão de escorregamentos em rodovias a partir do uso do modelo SHALSTAB. In: IX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 9, 2015, São Paulo. **Anais...**São Paulo: 2005. p. 3011–3024.

CHUNG, C.F.; FABRI, A.G. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. **Natural Hazards**, v. 30, p. 451–472, 2003.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37–46, 1960.

COROMINAS, J.; VAN WESTEN, C.; FRATTINI, P.;

- CASCINI, L.; MALET, J.-P.; FOTOPOULOU, S.; CATANI, F.; VAN DEN EECKHAUT, M.; MAVROULI, O.; AGLIARDI, F.; PITILAKIS, K.; WINTER, M.G.; PASTOR, M.; FERLISI, S.; TOFANI, V.; HERVÁS, J.; SMITH, J.T. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 73, p. 209–263, 2014.
- DERMATINO, N.M. **Aplicação do modelo SHALSTAB no mapeamento de deslizamentos rasos na sub-bacia do Rio Comprido – Joinville/SC**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2016. 88p.
- DIETRICH, W.E.; MONTGOMERY, D.R. **SHALSTAB: A digital terrain model for mapping shallow landslide potential**. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), Technical Report, 1998. 29p.
- DIETRICH, W.E.; REISS, R.; HSU, M.L.; MONTGOMERY, D.R.A. **A validation study of the shallow slope stability model, SHALSTAB, in forested lands of Northern California**. Berkeley: Stillwater Ecosystem, Watershed and Riverine Sciences, 1998. 59p.
- DIETRICH, W. E.; BELLUGI, D.; ASUA, R. R. de.; STANZIANO, L. **Using SHALSTAB Tools to map shallow landslide potential**. 2000. Disponível em: <http://soctates.berkeley.edu/~geomorph/shalstab/>. Acessado em outubro 2016
- DIETRICH, W.E.; BELLUGI D.; REAL DE ASUA R. (2001). Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management. In WIGMOSTA, M.S.; BURGESS, S.J. Burgess (org.) **Land Use and Watersheds: Human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas**. American Geophysical Union, Washington: p.195–227.
- DOURADO, F; ROIG, H. Mapas de susceptibilidade a escorregamentos rasos, usando os modelos SHALSTAB e SINMAP, da bacia do rio Paquequer -Teresópolis – RJ. **Caderno de Estudos Geoambientais**, v. 4, p. 56–66, 2013.
- FARIA, R.L.; OLIVEIRA, D.C.G; ZAIDAN, R.T. Zoneamento de áreas susceptíveis a ocorrência de escorregamentos na bacia do rio Paraibuna – MG/RJ. **Revista Principia**, v. 15, p. 57–64, 2011.
- FERNANDES, N.F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51–71, 2001.
- FIORI, A.P.; CARMIGNANI, L.; **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas. Aplicações na Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 139p.
- GAO, J. Identification of topographic settings Nelson County, Virginia, U.S.A. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 18, p. 579–591, 1993.
- GARCIA, R.A.C. **Metodologias de avaliação de perigosidade e risco associado a movimentos de vertente: aplicação na Bacia da Ribeira de Alenquer**. Tese (Doutorado, Departamento de Geografia). Universidade de Lisboa, Portugal. 2012. 437p.
- GERENTE, J.; LUIZ, E.L; SANTO, M.A.D. Utilização do SHALSTAB como ferramenta para o diagnóstico preliminar da suscetibilidade a deslizamentos rasos no baixo vale do rio Luís Alves – SC. **Revista Ambientia**, v. 10, p.333–350, 2014.
- GOMES, R.A.T.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; FERNANDES, N.F. Análise da influência da escala cartográfica no resultado de um modelo de previsão de áreas críticas a deslizamentos. **Ciência e Natura**, p. 269–286, 2004.
- GOMES, R.A.T.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; FERNANDES, N.F. Análise de um modelo de previsão de deslizamentos (SHALSTAB) em diferentes escalas cartográficas. **Revista Solos e Rochas**, v. 28, p.85–97, 2005.
- GOMES, R.A.T.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; FERNANDES, N.F.; AMARAL JÚNIOR, E.V. Combining spatial models for shallow landslides and debris-flows prediction. **Remote Sensing**, v. 13, p. 2219–2237, 2013.
- GUIMARÃES, R.F. **A modelagem matemática na avaliação de áreas de risco a deslizamentos: o exemplo das bacias dos rios Quitite e Papagaio (RJ)**. Tese (Doutorado em Geologia). Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2000. 150p.
- GUIMARÃES, R.F.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; FERNANDES, N.F. Aplicação do modelo SHALSTAB para a determinação de áreas de risco a escorregamentos rasos em regiões tropicais. In: IX Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 1999, São Pedro – SP. **Anais...** 1999a. Meio Digital.
- GUIMARÃES, R.F.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H.; GOMES, R. A.T.; FERNANDES, N.F. Application of a model for the topographic control on shallow landslides to catchments near Rio de Janeiro. In: 5th Annual conference of the International Association for Mathematical Geology, 1999, Trondheim. **Proceedings..** v. 1, 1999b. p. 349–354.
- GUIMARÃES, R.F.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG,

- H.M.; FERNANDES, N.F.; GOMES, R.A.T.; DE CARVALHO JÚNIOR, O.A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v. 69, n. 1, p. 99–108, 2003.
- GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; MARTINS, E.S.; OLIVEIRA, S.N.; FERNANDES, N.F. Análise temporal das áreas susceptíveis a escorregamentos rasos no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (RJ) a partir de dados pluviométricos. **Revista Brasileira de Geociência**, v. 39, p.190–198, 2009.
- GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P.; ARDIZZONE, F.; CARDINALI, M.; GALLI, M. Estimating the quality of landslide susceptibility models. **Geomorphology**, v. 81, p.166–184, 2006.
- HAMMOND, C.; HALL, D.; MILLER, S.; SWETIK, P. **Level I Stability Analysis (LISA) Documentation for Version 2.0**. General Technical Report INT-285, USDA Forest Service Intermountain Research Station, 1992.
- HIGASHI, R.A.R.; GUESSER, L.H.; STEFFENS, A.H.D.; SAKAMOTO, M.Y.; OLIVEIRA, M.C.G.; CONTESSI, R.J.; ABREU, R.P. **Mapeamento geotécnico da suscetibilidade a movimento de massa na bacia do Itacorubi**. Relatório final das atividades do Laboratório de Gestão de Riscos de Desastres. Florianópolis: UFSC, 2015. 199p. Anexo 3.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa de Informações Básicas Municipais 2013**. Rio de Janeiro, 2014.
- LISTO, F.L.R.; VIEIRA, B.C. Suscetibilidade e risco a escorregamentos rasos na Bacia do Rio Aricanduva (SP). In: IX Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2012. 5p.
- LUIZ, A.S. **Utilização da modelagem matemática para identificação de áreas susceptíveis a escorregamentos na Serra das Araras - RJ**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade de Brasília, 2015. 52p.
- MACHADO, W.P. **Análise do comportamento da coesão crítica relacionada à instabilidade de encosta utilizando dados de chuva do sensor TRMM no município de Paraty (RJ)**. Dissertação (Mestrado em Geografia) Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, 2011. 83p.
- MICHEL, G.P.; HIGASHI, R.A.R. Uso do SHALSTAB na análise espacial da estabilidade de encostas visando a implantação de vias – aplicação em sub-bacias do rio Tubarão. In: 6º Seminário Nacional Modernas Técnicas Rodoviárias, 2010, Florianópolis. **Anais...** 2010. ABMS. v.4 p. 1245–1252.
- MICHEL, G.P.; KOBİYAMA, M.; GOERL, R.F. Análise comparativa entre os modelos SHALSTAB e SINMAP na identificação de áreas susceptíveis a escorregamentos translacionais. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2012, Foz do Iguaçu – PR. **Anais...** 2012a. 21p.
- MICHEL, G.P.; KOBİYAMA, M.; GOERL, R.F. Avaliação do papel da vegetação na estabilidade de encostas através do modelo SHALSTAB modificado. In: IX Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2012, Rio de Janeiro – RJ. **Anais...** 2012b. 4p.
- MICHEL, G.P.; KOBİYAMA, M.; GOERL, R.F. Formulação do fator de segurança considerando a presença de vegetação. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** 2013. 8p.
- MICHEL, G.P.; KOBİYAMA, M.; GOERL, R.F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1266–1277, 2014.
- MICHEL, G.P.; GOERL, R.F.; KOBİYAMA, M. Critical rainfall to trigger landslides in Cunha River basin, southern Brazil. **Natural Hazards**, v. 75, p. 2369–2384, 2015a.
- MICHEL, G.P.; KOBİYAMA, M.; GOERL, R.F.; MICHEL, R.D.L. Metodologia de mapeamento de escorregamentos e fluxos de detritos. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília. **Anais...** 2015b. 8p.
- MONTGOMERY, D.R.; DIETRICH, W.E. A physically-based model for topographic control on shallow landsliding, **Water Resources Research**, v. 30, p. 1153–1171, 1994.
- OLIVEIRA, F.P. **Mapeamento geotécnico preliminar e aplicação do modelo SHALSTAB na análise de escorregamentos da bacia de Santo Antônio de Lisboa – Florianópolis/SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2014. 191p.
- OLIVEIRA, M.T. **Estudo de movimentos de massa gravitacionais no município de Belo Horizonte, MG**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal Viçosa. 2009. 279p.
- O'LOUGHLIN, E.M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v. 22, p. 794–804, 1986.
- RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; REDIVO, A.L.; CARVALHO JUNIOR, O.A. Mapeamento das áreas susceptíveis a escorregamentos rasos no subúrbio ferroviário de Salvador (BA), utilizando os parâmetros físicos diferenciados para cada



- classe de solo. In: X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** v. especial, 2003. p. 1966–1976.
- RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; REDIVO, A.L.; GOMES, R.A.T; FERNANDES, N.F.; CARVALHO JUNIOR, O. A. Aplicação do modelo SHALSTAB, em ambiente Arcview, para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento raso na região do Quadrilátero Ferrífero (MG). **Revista Espaço & Geografia**, v. 5, n. 1, p. 49–67, 2002.
- RABACO, L.M.L. **Avaliação de modelos de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa numa faixa de dutos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação – Área de Concentração Geomática), Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 2005. 162p.
- REDIVO, A.L.; RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R. F.; JUNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T. Determinação de áreas susceptíveis a escorregamentos na BR356 no município de Ouro Preto – MG. In: V Simpósio Nacional de Geomorfologia. I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia, 2004, Santa Maria. **Anais...** 2004. 14p.
- REGINATTO, G.M.P; MACCARINI, M.; KOBAYAMA, M.; HIGASHI, R.A.R.; GRANDO, A.; CORSEUIL, C.W.; CARAMEZ, M.L. SHALSTAB application to identify the susceptible areas of shallow landslides in Cunha river watershed, rio dos Cedros city, SC, Brazil. In: 4th Conference on Geographic Object-Based Image Analysis, 2012. Rio de Janeiro. **Proceedings...** 2012. p.108.
- RIFFEL, E.S.; RUIZ, L.F.C, GUASSELLI, L.A. Mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos a partir de mineração de dados e do modelo SHALSTAB. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 68, p. 1805–1818, 2016.
- SANTOS, V. **Influência da escala no mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa com o SHALSTAB na microbacia do Ribeirão do Baú, Ilhota/SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2015. 126p.
- SBROGLIA, R.M.; PORATH, P.H.M HIGASHI, R.A.R.; OLIVEIRA, F.H Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Translacionais com o Uso da Ferramenta ASA - Automatic Shalstab Analysis. **COBRAE 2017 - XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**. -, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. 2017. 8p.
- SBROGLIA, R.M.; HIGASHI, R.A.R.; TOMAZZOLI, E.R.; GUIMARÃES, R.F. Mapeamento de áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC, com o uso de modelagem matemática. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 68/2, p. 339–354, 2016.
- SCHENKEL, J.C; MICHEL, G. P; KOBAYAMA, M. Mapeamento das áreas de risco de escorregamentos translacionais na bacia do arroio Forromeco – RS. In: 1º Congresso Internacional de Hidrossedimentologia, 2015, Porto Alegre. **Anais...** 2015. p. 1–3.
- SELBY, M. **Hillslope Materials and Processes**. Oxford: Oxford University Press,. 1993. 289p.
- SILVA, D.C.O. **Aplicação do Modelo SHALSTAB na Previsão de Deslizamentos em Petrópolis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006. 132p.
- SILVA, E.L.; GOMES, R.A.T; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JUNIOR, O.A. Emprego de modelo de susceptibilidade a escorregamentos rasos para gestão de riscos de desastres no município de Vitória-ES. **Revista Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 1, p.119–132, 2013.
- SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI L. Susceptibility analysis of shallow landslides source áreas using physically based models. **Natural Hazards**, v. 53, p. 313–332, 2010.
- SOUZA. A.M.S. **Mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos na região da bacia do rio Camboriú**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, . 2015. 117p.
- STORY, M.; CONGALTON, R.G. Accuracy assessment - A user’s perspective. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, p. 397–399, 1986.
- VESTENA, L.R.; KOBAYAMA, M. Potential fragility of the Caeté catchment, municipality of Alfredo Wagner, Santa Catarina State, Brazil, to landslides occurrence. **Acta Scientiarum**, v. 36, n. 1, p. 101–109, 2014.
- VIEIRA, B.C. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 193p.
- VIEIRA, B.C.; MARTINS, T.D. Modelos em geografia física: conceitos e aplicações na previsão de escorregamentos. **Geosp – Espaço e Tempo**, v. 20, n. 1, p. 194–206, 2016. Disponível: <http://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/102616>.
- VIEIRA, B.C.; RAMOS. H. Aplicação do modelo SHALSTAB para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 29, p. 161–174, 2015.

VIEIRA, B.C.; FERNANDES, N.F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T. Análise Qualitativa de Fatores Condicionantes de Escorregamentos Rasos a Partir de um Modelo de Previsão de Áreas de Risco. In: 9 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 1999, São Pedro – SP. **Anais...** 1999. Meio Digital.

WESTEN, C.J.; RENGERS, N.; TERLIEN, M.T.J.; SOETERS, R. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. **Geologische Rundschau**, v. 86, n. 2, p. 404–414, 1997.

ZAIDAN, R.T; FERNANDES, N.F. Zoneamento de Susceptibilidade a Escorregamentos em Encostas Aplicado à Bacia de Drenagem Urbana do Córrego do Independência - Juiz De Fora (Mg). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, p. 57–76, 2009.

ZHANG, W.; MONTGOMERY, D.R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **Water Resources Research**, 30(4), 1019–1028, 1994.