

Avaliação determinística e probabilística da susceptibilidade a ocorrência de deslizamentos pela aplicação do modelo SHALSTAB

George Fernandes Azevedo ¹
Hernán Eduardo Martínez Carvajal ¹
Newton Moreira de Souza ¹

¹Universidade de Brasília - UnB
CEP 70910-900 - Brasília - DF, Brasil
gfernandesazevedo@yahoo.com
{carvajal, nmouza}@unb.br

Abstract. In situations related to events of landslides, the mapping of susceptibility and risk is required to support the emergency management and to identify new areas with high potential to be hit by serious damage from this type of phenomenon. This work focuses on identifying the sites with the highest rates of susceptibility to occurrence of landslides by using SHALSTAB model in a study area located in the northern portion of the Federal District, Brazil. The methodology developed here was based on the use of a tool to assess the susceptibility of the land to the triggering of shallow landslides, confronting, in this context, the traditional deterministic approach to a probabilistic alternative. The model called SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability Model) was used in this research and it is based on the combination of theories of an infinite slope stability model together with a hydrological model of steady state recharge, implemented in its deterministic original form and associated the probabilistic method called PEM (point estimates method) with the aid of geographical information system SPRING and Matlab software. As a result, there was obtained the spatial setting indicative of stability of the slopes in the form of maps provided by the used approaches, allowing the understanding of important aspects of ground which determine this distribution. The main conclusion indicates that the methodology used provides a different perspective on traditional assessment promoted by SHALSTAB model by considering the statistical variability of the parameters involved.

Palavras-chave: slope stability, landslides, probabilistic methods, estabilidade de taludes, movimentos de massa, métodos probabilístico.

1. Introdução

Os desastres naturais constituem um dos maiores problemas socioeconômicos mundiais, sendo que, dentro das diversas possibilidades de ocorrências, os eventos relacionados a terremotos, inundações e movimentos de massa são os que apresentam maior notoriedade (Gomes et al., 2013). Deslizamentos e instabilidades de taludes apresentam-se como grandes problemas para as atividades humanas, provocando danos às propriedades, perdas econômicas e altos custos de manutenção, assim como ocasionando lesões ou mortes (Das et al., 2010).

Van Den Eeckhaut et al. (2012) destacam que em situações relacionadas à eventos de desastres proporcionados por deslizamentos, mapeamentos relativos à susceptibilidade e ao risco são requeridos urgentemente no sentido de apoiar o gerenciamento emergencial e para identificar novas áreas com alto potencial de serem atingidas por sérios danos causados por este tipo de fenômeno.

Conforme Vanacôr e Rolim (2012), para mitigar efetivamente áreas que possuem uma maior disposição à ocorrência de deslizamentos e reduzir as consequências negativas definidas por estes eventos na sociedade, deve-se concretizar em primeiro lugar o mapeamento de susceptibilidade, sendo que uma das dificuldades encontradas nesta execução consiste em avaliar um grande montante de dados, em virtude da complexidade dos processos presentes.

No sentido de transpor este obstáculo e tornar mais fácil os métodos de análise, utilizam-se, como abordagens de estudo, técnicas que envolvem interpretação de imagens, bem como o tratamento e manipulação de dados por intermédio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Modelos geotécnicos vêm sendo criados mundialmente na tentativa de auxiliar a identificação de áreas sujeitas a eventos de movimentos de massa, sendo amplamente utilizados no estudo de estabilidade de taludes pela engenharia civil e geologia de engenharia (Reginatto et al., 2012; Safei et al., 2013).

Neste contexto, a presente pesquisa tem como foco identificar os locais com maiores índices de susceptibilidade a ocorrência de deslizamentos pela utilização do modelo SHALSTAB em uma área de estudo situada na porção norte do Distrito Federal. Adicionalmente, promoveu-se uma modificação no enfoque original proposto, incorporando a variabilidade intrínseca presente em alguns dos elementos que constituem o modelo pelo uso do método probabilístico das estimativas pontuais. Isto possibilitou uma interpretação alternativa dos resultados frente à luz da mensuração das probabilidades das áreas se tornarem instáveis, com a consequente confrontação destas medidas com as implicações determinísticas.

2. Metodologia de Trabalho

A metodologia aqui desenvolvida pautou-se na utilização de uma ferramenta que permite avaliar a susceptibilidade do terreno ao desencadeamento de escorregamentos rasos, confrontando, neste contexto, a perspectiva tradicional determinística com uma alternativa probabilística.

Utilizou-se nesta pesquisa o modelo denominado SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*) proposto a Montgomery e Dietrich (1994), o qual se baseia na associação de teorias de um modelo de estabilidade de talude infinito em conjunto com um modelo hidrológico de estado uniforme de recarga descrito por Beven e Kirkby (1979) e O’loughlin (1986). A formulação resultante da integração dos dois métodos mencionados correspondem à Equação 1.

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

Onde:

q = quantidade de chuva, com unidade de m/dia;

T = valor da transmissividade do solo, dada em m²/dia;

θ = declividade, em graus (°);

a = área de contribuição, em m²;

b = comprimento de contorno da fronteira inferior de cada elemento, em m;

c = coesão efetiva do solo, em N/m²;

ρ_s = densidade do solo, em kg/m³;

ρ_w = densidade da água, igual a 1000 kg/m³;

g = aceleração da gravidade, igual a 9,8 m/s²;

z = espessura do solo, em m;

φ = ângulo de atrito efetivo do solo, em graus (°);

Destacam-se duas condições extremas previstas pelo modelo. A primeira refere-se quando o solo está seco, com ausência de coluna d’água, na qual se observa que o ângulo de atrito é incapaz de compensar a elevada declividade da encosta, segundo a Equação 2.

$$\tan \theta \geq \tan \phi \quad (2)$$

Neste caso, estas regiões são consideradas como incondicionalmente instáveis. De outra maneira, mesmo se a camada de solo esteja completamente saturada, se a tanθ for menor ou

igual à $\tan[1-(\rho_w/\rho_s)]$, o talude será tomado como incondicionalmente estável, já que não existem condições propícias para desencadear escorregamentos rasos.

Conforme mencionado por Reginatto et al. (2012), a instabilidade de uma área é diretamente proporcional a relação q/T , razão entre a quantidade de chuva e a transmissividade do solo requerida para estabelecer uma situação contrária a estabilidade, a qual pode ser empregada para qualificar a região avaliada em um dos níveis de susceptibilidade citados por Gerente et al. (2013) e mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Classes de estabilidade segundo modelo SHALSTAB.

| Classes de Estabilidade | Qualificação |
|--------------------------|-----------------------------|
| Instabilidade crônica | Incondicionalmente instável |
| $\log q/T < -3,1$ | Muito instável |
| $-3,1 < \log q/T < -2,8$ | Medianamente instável |
| $-2,8 < \log q/T < -2,5$ | Pouco instável |
| $-2,5 < \log q/T < -2,2$ | Pouco estável |
| $\log q/T > -2,2$ | Medianamente estável |
| Estável | Incondicionalmente estável |

Para a implementação do modelo valeu-se de uma relação conjunta entre instrumentos computacionais capazes de organizar e processar os dados espaciais requeridos. No sentido de estruturar estas informações, fez-se necessário o uso de uma plataforma baseada em sistemas de informação geográfica. A opção utilizada refere-se ao *software* SPRING 5.2, desenvolvido pelo INPE (Câmara et al., 1996).

Em relação à ferramenta responsável por concretizar os cálculos concernentes à formulação do modelo SHALSTAB, a opção elegida está representada pelo *software* Matlab (*Matrix Laboratory*), próprio para a manipulação e cálculos matriciais, forma como se apresentam as informações bidimensionais do terreno. Uma vez procedidas às análises, a matriz resultante do SHALSTAB foi transferida para o SIG, havendo a possibilidade de fatiamento e associação com as classes temáticas apresentadas na Tabela 1 considerando o atributo de qualificação.

Somando-se a abordagem determinística, uma vertente probabilística denominada método das estimativas pontuais (MEP), proposto por Rosenblueth (1975), foi introduzido como uma modificação do modelo original capaz de inserir parâmetros de variabilidade em algumas variáveis independentes que constituem o modelo SHALSTAB. O MEP leva em consideração no emprego da Equação 1, para cada pixel, as combinações das estimativas pontuais máximas ($\overline{X}_i + \sigma_i$) e mínimas ($\overline{X}_i - \sigma_i$) em relação a cada uma das i variáveis ponderadas com natureza randômica, tomando, para isto, o seu valor médio \overline{X}_i e seu desvio padrão σ_i . Isto permite compor uma amostra com 2^i elementos de $\log q/T$, da qual se pode obter uma média e um desvio padrão da variável dependente, associados a uma dada posição do terreno, e, portanto, uma distribuição de probabilidade, aqui representada como normal. O processo é realizado de maneira contínua para todas as células que representam a área de estudo, sendo que, ao final, os dados com as médias e desvios padrões de $\log q/T$ são armazenados em grades distintas.

Foi definida como limite crítico de estabilidade a medida a partir da qual as áreas são categorizadas como muito instáveis ($\log q/T < -3,1$). Desta maneira, a probabilidade relacionada ao MEP está ligada à área a qual se encontra sob a curva unitária da função densidade de probabilidade definida para valores inferiores ao limite de $-3,1$. A quantificação das probabilidades foi alcançada por meio do uso de integração numérica, sendo guardadas

em uma grade específica, permitindo sua avaliação e comparação com o resultado determinístico.

As variáveis independentes consideradas estatísticas correspondem às características do solo referentes à coesão efetiva, ao ângulo de atrito efetivo e à densidade do solo, com coeficientes de variação (CV), fixados segundo Assis et al. (2012), em 40%, 10% e 3%, respectivamente. O desvio padrão de cada variável estatística, com base no valor de CV, é dado segundo a Equação 3.

$$\sigma_i = \bar{X}_i \frac{CV}{100} \quad (3)$$

A área de estudo escolhida situa-se na bacia do Ribeirão Contagem, localizada na porção norte do Distrito Federal e pertencente à região administrativa de Sobradinho. Conforme Braga (2013), este local já foi alvo de estudos anteriores que comprovaram a perda laminar de solo em volumes significativos em virtude das altas declividades presentes no local, sendo palco de registros de episódios abrangendo feições erosivas e movimentos de massa. O projeto específico criado no SPRING 5.2 tem como principais atributos os seguintes pontos:

- Projeção e datum utilizados: UTM/ SIRGAS2000, zona 23;
- Retângulo envolvente definido em coordenadas planas:
- X1 = 188.000 m; Y1 = 8.268.000 m;
- X2 = 194.000 m; Y2 = 8.270.850 m;

Os planos de informação apresentam resolução espacial de 5 m, valor empregado para representar a medida do comprimento de contorno da fronteira inferior de cada elemento. Os dados referentes ao meio físico que são exigidos pelo modelo SHALSTAB foram importados para a plataforma SPRING 5.2 e organizados em categorias específicas e planos de informação distintos sob o formato matricial. Dentre eles, figura-se o modelo numérico de terreno (MNT), do qual foram derivadas as grades de declividade e de fluxo acumulado.

Destaca-se, também, que o mapa pedológico aqui utilizado advém do processo de atualização da carta de solos digital do Distrito Federal fornecido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (Reatto et al., 2004). Nesta configuração, aparecem presentes os tipos pedológicos explicitados pela Tabela 2 em conjunto com suas respectivas características de resistência, em termos de valores médios, aplicadas ao trabalho.

Tabela 2. Tipos de solo encontrados na área de estudo classificados conforme Roque e Souza (2008).

| Pedologia | Características | | |
|----------------------------|------------------------------------|----------------------|---------------|
| | Coesão efetiva (N/m ²) | Ângulo de Atrito (°) | Espessura (m) |
| Latossolo vermelho | 10000 | 20 | 3 |
| Latossolo vermelho amarelo | 10000 | 20 | 3 |
| Cambissolo háplico | 5000 | 25 | 0,7 |
| Espodossolo ferrilúvico | 20000 | 10 | 4 |

A densidade para todas as classes de solo citadas foi considerada igual a um valor médio de 1500 kg/m³ em épocas chuvosas, seguindo a mesma consideração proposta por Roque e Souza (2008).

Definidas as cartas temáticas oriundas dos métodos adotados, passou-se a analisar e realizar inferências sobre as informações geradas, as quais s encontram explanadas na seção seguinte.

3. Resultados e Discussão

Por meio da metodologia aplicada, obteve-se a geração de resultados pertinentes à pesquisa, os quais se traduzem na distribuição espacial correspondente ao indicativo de estabilidade das encostas em termos do método utilizado, bem como no comparativo efetivado entre as abordagens referentes a este artifício. A Figura 1 traz a carta resultante à utilização do modelo SHALSTAB para a área de estudo.

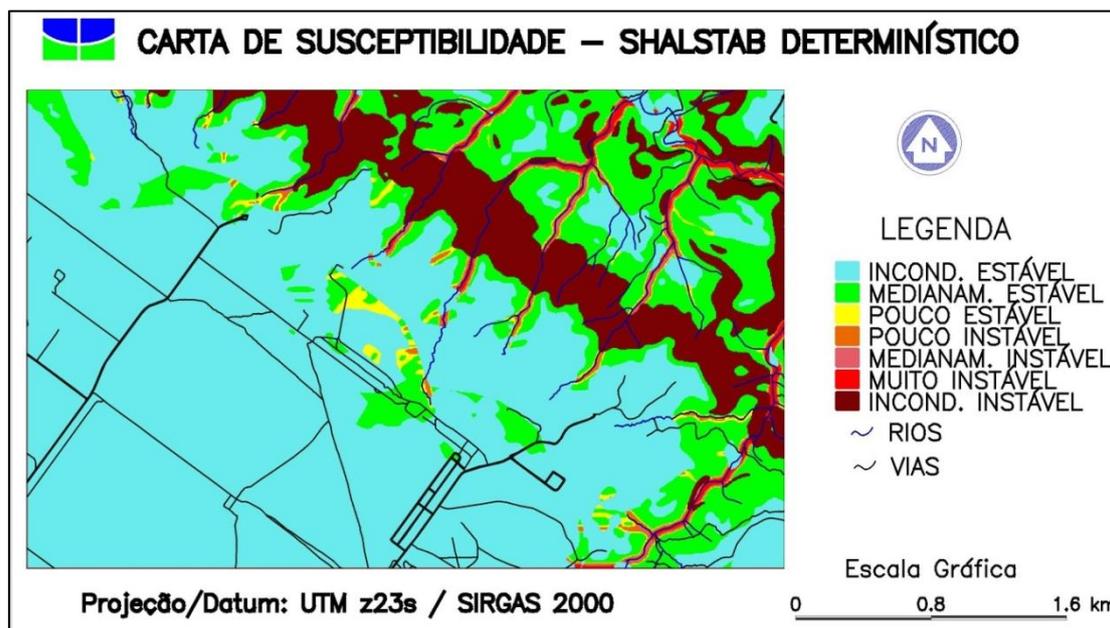


Figura 1. Carta de susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos pelo uso do modelo SHALSTAB.

Por intermédio da carta apresentada, a predominância das regiões consideradas como críticas do ponto de vista da estabilidade, categorizadas como incondicionalmente instáveis pelo modelo, estão situadas na zona intermediária entre as quebras de relevo positiva e negativa, a partir de declividades com valores superiores a 10° . Esta classe culmina, em termos de maior número de pixels assim classificados, para o intervalo de 30° a 40° . Neste sentido, é possível verificar que a predição estabelecida pelo SHALSTAB é fortemente influenciada pela distribuição das inclinações das vertentes.

Na Tabela 3 encontra-se a distribuição da região analisada em função da qualificação de estabilidade prevista pelo método.

Tabela 3. Classificação da área de estudo entre as categorias de estabilidade previstas pelo SHALSTAB.

| Classes de qualificação | Porcentagem da área de estudo |
|-----------------------------|-------------------------------|
| Incondicionalmente instável | 16,60% |
| Muito instável | 1,27% |
| Medianamente instável | 0,82% |
| Pouco instável | 1,04% |
| Pouco estável | 1,57% |
| Medianamente estável | 26,30% |
| Incondicionalmente estável | 52,40% |

Conforme os dados mostrados na tabela anterior, um pouco mais que a metade da área avaliada encontra-se estabelecida na situação incondicionalmente estável, exatamente nos pontos onde o terreno possui declividades que não ultrapassam 15°.

No limite inferior, uma porcentagem de 16,6% representa os locais onde o valor da tangente da inclinação do talude suplanta a tangente do ângulo de atrito do solo.

Dentre as classes que não correspondem a uma das condições extremas previstas, aquela que mais se destaca está relacionada à característica medianamente estável, congregando um percentual considerável de 26,3% relativos a 4,5 km² dos 17,1 km² totais analisados. As demais categorias mostram-se de forma mais modesta no que diz respeito à participação na composição da distribuição espacial, sendo que, juntas, somam 4,7%.

Observa-se que as regiões muito instáveis coincidem substancialmente com as áreas próximas de cursos d'água presentes na região, mostrando que as vertentes dos rios, com maiores inclinações, apresentam-se como localidades com alta susceptibilidade a escorregamentos rasos. De forma geral, maiores declividades combinadas a concentrações de linhas de fluxo proporcionam menor grau de estabilidade, o que é exatamente observado para esta classe.

O que foi mencionado anteriormente é ratificado ao se proceder a uma análise da tabulação cruzada entre os planos de informações que contém as grades de susceptibilidade e declividade alcançadas. Declividades baixas, varando de 0° a 5°, são mais bem representadas pelo nível de susceptibilidade denominado incondicionalmente estável. Este intervalo de declividade não sustenta regiões definidas com as duas maiores medidas de instabilidade.

Apesar de se constatar a presença de todas as classes de susceptibilidade no intervalo compreendido entre 10° a 30°, a categoria medianamente estável é aquela que predomina. Acima de 30°, encontram-se exclusivamente áreas incondicionalmente instáveis.

Já o procedimento probabilístico visou comparar este tipo de análise com o resultado atingido de maneira determinística, por meio do panorama gerado pela imposição de um limite para o parâmetro log q/T considerado como crítico. Na Figura 2 está exposta a carta alcançada na aplicação da proposta probabilística do modelo SHALSTAB.

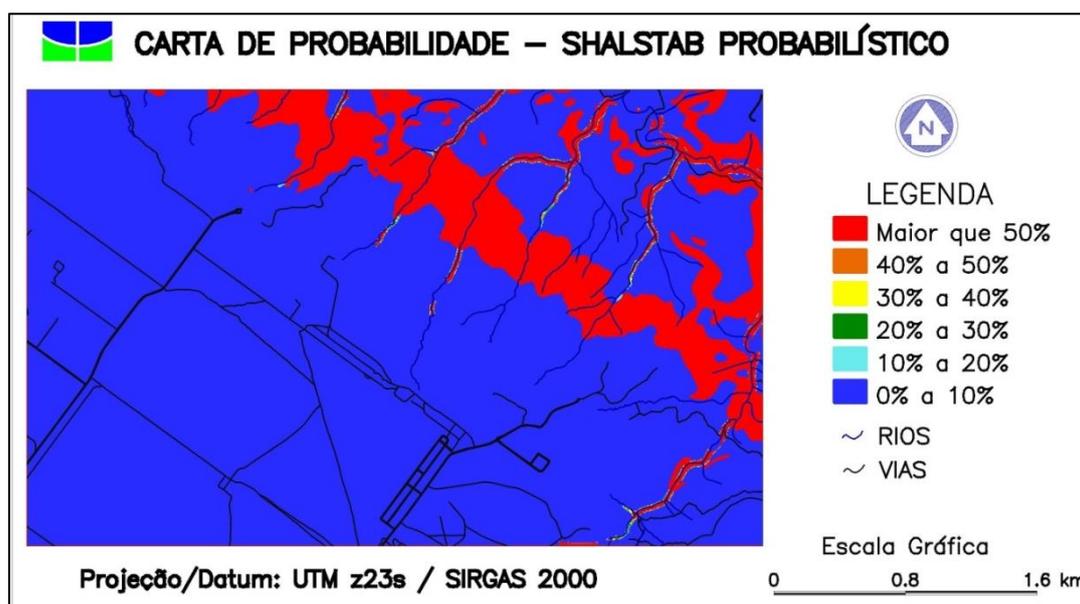


Figura 2. Carta de probabilidade de classificação de áreas muito instáveis obtida pela aplicação do método de Rosenblueth.

As porcentagens da distribuição para a probabilidade de que um dado pixel seja classificado na categoria de muito instável encontram-se expressas na Tabela 4.

Tabela 4. Distribuição da região avaliada pelas classes de probabilidade para a condição muito instável.

| Probabilidade de $\log q/T < -3,1$ | Porcentagem da área de estudo |
|------------------------------------|-------------------------------|
| 0% a 10% | 81,56% |
| 10% a 20% | 0,19% |
| 20% a 30% | 0,12% |
| 30% a 40% | 0,10% |
| 40% a 50% | 0,11% |
| Maior que 50% | 17,92% |

A tabulação cruzada efetuada entre os enfoques probabilístico e determinístico forneceu subsídios para embasar as comparações entre análises.

A classe 0% a 10% representa mais que 80% do território, uma vez que também engloba neste intervalo as áreas consideradas como incondicionalmente estáveis pela versão determinística e cujo valor de $\log q/T$, portanto, possui baixíssima possibilidade de ser inferior ao limite crítico definido.

Nenhum pixel definido como muito instável ou incondicionalmente instável faz parte desta categoria de probabilidade. Para estas duas condições de susceptibilidade, as probabilidades que as contemplam referem-se às medidas superiores a 50%. Em contrapartida, verifica-se que elementos com condição de estabilidade igual ou superior a classe pouco instável concentram-se exclusivamente no intervalo de probabilidade considerada de 0% a 10%.

A classe medianamente instável é a única que se encontra distribuída por todos os intervalos propostos de probabilidade para $\log q/T < -3,1$. Por meio desta observação, averigua-se que diferentes elementos, por mais que estejam classificados com um mesmo nível de estabilidade frente à susceptibilidade, podem apresentar uma maior ou menor tendência, em virtude da variabilidade de suas características, de transporem o limite que distingue o patamar de muito instável. Por exemplo, 0,0432 km² da área medianamente instável têm chances que variam de 0% a 10% de transpor o limiar proposto para muito instável, enquanto 0,0087 km² da mesma classe já apresentam probabilidade muito maior, iguais ou superiores a 50%, do índice de susceptibilidade ser inferior a -3,1.

4. Conclusões

Diante do exposto até aqui, pode inferir algumas considerações sobre o presente trabalho. Esta pesquisa fornece uma óptica diferenciada sobre os alcances tradicionais promovidos pelo modelo SHALSTAB ao incorporar considerações a cerca da variabilidade dos parâmetros que o compõe, possibilitando, assim, uma avaliação mais ampla de quão tão susceptível uma região se encontra.

Em outras palavras, o resultado do método de Rosenblueth permite indicar qual a probabilidade apresentada por um pixel de ser classificado como um elemento muito instável.

Em aplicações futuras da metodologia proposta, alternativamente aos valores retirados da literatura para os coeficientes de variação empregados nas variáveis com características probabilísticas, podem-se utilizar informações oriundas de campanhas de investigação que caracterizem mais satisfatoriamente a dispersão inerente a estes dados. A incorporação da natureza probabilística de outras variáveis independentes do modelo, que possam melhor representar o comportamento do fenômeno, também pode ser um aspecto considerado.

Referências Bibliográficas

Assis, A.P.; Espósito, T.J.; Gardoni, M.G.; Silva, P.D.E.A.; Maia, J.A. **Métodos estatísticos aplicados a geotecnica**. Brasília: Universidade de Brasília, 2012. 278 p. (G.AP-002/12).

Beven, K.J.; Kirkby, M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Bulletin of Hydrological Sciences**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.

Braga, L. **Mapeamento de Feições Erosivas e Análise de Fatores Controladores da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Contagem-DF**. 2013. 70 p. Monografia (Programa de Graduação em Geografia) – Universidade de Brasília, Brasília. 2013.

Câmara, G.; Souza, R.C.M.; Freitas, U.M.; Garrido, J. SPRING: Integrating Remote Sensing and Gis by Object-oriented Data Modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

Das, I.; Sahoo, S.; van Westen, C.; Stein, A.; Hack, R. Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). **Geomorphology**, v. 114, n. 4, p. 627-637, 2010.

Gerente, J.; Luiz, E.L.; Dal Santo, M.A. Utilização do SHALSTAB como ferramenta para o diagnóstico preliminar da suscetibilidade a deslizamentos rasos no baixo vale do rio Luís Alves – SC. **Ambiência Guarapuava**, v. 10, n. 1, p. 333-350, 2014.

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. 5, n. 5, p. 2219-2237, 2013.

Montgomery, D.R.; Dietrich, W.E. A Physically-Based Model for Topographic Control on Shallow Landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 1, p. 1153-1171, 1994.

O'loughlin, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v. 22, n. 1, p. 794-804, 1986.

Reatto, A.; Martins, E.S.; Farias, M.F.R.; Silva, A.V.; Carvalho Jr., O.A.C. **Mapa Pedológico Digital – SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo**. Planaltina: Embrapa, 2004. 29 p.

Reginatto, G. M. P.; Maccarini, M.; Kobiyama, M.; Higashi, R. A. R.; Grando, A.; Corseuil, C.W.; Caraméz, M.L. Shalstab Application to Identify the Susceptible Areas of Shallow Landslides in Cunha River Watershed, Rio dos Cedros City, SC, Brazil. In: Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA), 4., 2012, Rio de Janeiro. **Proceedings of the 4th International Conference on Geographic Object-Based Image Analysis**. São José dos Campos: INPE, 2012. Artigos, p. 108-113. Pen-drive, On-line. ISBN 978-85-17-00059-1. Disponível em: < <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18/2012/05.16.20.05/doc/034.pdf>>. Acesso em: 29 jul. 2014.

Roque, W.V.; Souza, N.M. (2008). Análise da Estabilidade de Taludes pelo Método Racional na Região do Taquari (DF). In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 12., 2008, Porto de Galinhas. **Anais do 12º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**, Porto de Galinhas: ABGE, 2008. Artigos, p. 1-9. CD-ROM.

Rosenblueth, E. Point estimates for probability moments. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 72, n.1, p. 3812-3814, 1975.

Safaei, M.; Omar, H.; Yousof, Z.B.M.; Motevalli, A. Application of a Physically Based Model for Terrain Stability Mapping in Northern Iran. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 18, n. 1, p. 2443-2454, 2013.

Vanacôr, R.N.; Rolim, S.B.A. Mapeamento da Suscetibilidade a Deslizamentos Usando Técnicas de Estatística Bivariada e Sistema de Informações Geográficas na Região Nordeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 1, p. 15-28, 2012.

Van Den Eeckhaut, M.; Hervás, J.; Jaedicke, C.; Malet, J.-P.; Montanarella, L.; Nadim, F. Statistical modelling of Europe-wide landslide susceptibility using limited landslide inventory data. **Landslides**, v. 9, n. 1, p. 357-369, 2012.