

MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS NO MUNICÍPIO DE PATO BRANCO, PARANÁ COM A APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB.

Ney Lyzandro Tabalipa ¹; Leonardo Disperati ²; Alberto Pio Fiori ³

Resumo – Este trabalho compara modelos matemáticos de estabilidade de encostas associados a técnicas de mapeamento temático em SIG. O objetivo principal foi avaliar a aplicação do modelo SHALSTAB no mapeamento de áreas suscetíveis à ocorrência de escorregamentos na região de Pato Branco, Paraná, buscando determinar a quantidade de chuva necessária para desencadear estes eventos extremos e comparar com resultados de trabalhos anteriores que determinaram os fatores de segurança das encostas dessa área. Os resultados obtidos demonstraram que ambas metodologias analisadas mostraram-se aptas como ferramenta para identificar zonas de susceptibilidade à ocorrência de escorregamento raso, uma vez que os deslizamentos ocorridos na cidade estão localizados em áreas consideradas instáveis pelos dois métodos.

Abstract – This paper compares mathematical models of slope stability associated with thematic mapping techniques in GIS. The main objective was to evaluate the application of SHALSTAB model in the susceptible mapping areas to the occurrence of landslides in Pato Branco, Paraná State, aiming to determine the needed amount of rain to trigger these extreme events and to compare, with previous studies results, what have determined the security factors of the slopes in this area. The results showed that both analyzed methodologies proved suitable as a tool for identifying susceptibility to the occurrence of slip shallow areas, once the slips occurred in the city are located in areas considered unstable by both methods.

Palavras-Chave – Escorregamentos, SHALSTAB, Fator de Segurança.

¹ Prof., Dr, Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Pato Branco - PR, (46) 9911-2898, ntabalipa@gmail.com

² Prof., Dr, Università Degli Studi di Siena - UNISI, Siena (TO), Itália, disperati@unisi.it

³ Prof., Dr, Universidade Federal do Paraná: Curitiba- PR, (41) 3361-3128, fiori@ufpr.br

1. INTRODUÇÃO

Em Pato Branco, PR, como na maioria das cidades brasileiras, o uso e a ocupação do solo vêm ocorrendo sem a adequada consideração dos condicionantes geológicos, acarretando inúmeros desastres. Esse uso indiscriminado do solo, sem levar em conta os limites impostos pela natureza, alterando as características originais dos terrenos, tem sido responsável pelo surgimento de processos de escorregamentos na cidade, causando prejuízos econômicos e comprometendo a qualidade de vida da população.

Os escorregamentos são processos naturais e estão associados à dinâmica externa da Terra, sendo um dos responsáveis pela modelagem da paisagem da superfície. Neste sentido, Guidicini & Nieble (1983) afirmam que os movimentos de massa em princípio decorrem da própria dinâmica de evolução das encostas, quando as massas de solo, formadas a partir da progressiva alteração das rochas que compõem tais vertentes, atingem espessuras que podem ser consideradas críticas para a estabilidade.

Diversas metodologias vêm sendo desenvolvidas com o intuito de entender os fatores que condicionam o processo de movimento de massa. Estes modelos têm como referencial a modelagem matemática utilizando equações baseadas na combinação de modelos hidrológicos com modelos de estabilidade de encostas, sendo necessário o levantamento de dados pedológicos, geomorfológicos, climáticos e hidrológicos da área estudada.

No ano de 2008 foi aplicado um modelo matemático nas vertentes da bacia hidrografia do rio Ligeiro, onde está localizada a área urbana do município de Pato Branco – PR para analisar a estabilidade dessas vertentes, voltado a encontrar os fatores de segurança dessa área. Esta análise foi efetuada através de método determinístico, baseado no conceito de equilíbrio limite. O modelo matemático adotado, descrito em Fiori & Carmignani (2009), baseia-se na distribuição das forças atuantes em uma vertente infinita, considerando a influência da cobertura vegetal sobre as encostas, a inclinação e orientação das vertentes, a presença de água no solo, bem como, os índices físicos e as propriedades mecânicas de cada solo.

Como resultado desta pesquisa, vários mapas foram gerados, com o objetivo de comparar os índices de segurança das vertentes, com diferentes estados de saturação, permitindo uma visualização das áreas de risco em relação à instabilidade das encostas.

A metodologia que foi adotada não permite conhecer quais são os valores de precipitação máxima para o surgimento dos deslizamentos. Assim surgiu a necessidade de testar outros modelos, em particular o modelo SHALSTAB - *Shallow Landsliding Stability*, que objetiva mapear encostas instáveis e susceptíveis a ocorrência de escorregamentos, indicando essas áreas em relação a valores de precipitação máxima diária.

Esse modelo apresenta como resultado, valores de precipitação máxima para o surgimento de deslizamentos rasos, e assim complementando o estudo anterior, que numa perspectiva de gestão de riscos se torna extremamente útil.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação do modelo SHALSTAB no mapeamento de áreas suscetíveis à ocorrência de escorregamentos na região de Pato Branco, Paraná, buscando determinar a quantidade de chuva necessária para desencadear estes eventos extremos e comparar com resultados de trabalhos anteriores que determinaram os fatores de segurança das encostas dessa área.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

Localizada na porção sudoeste do Estado do Paraná (Figura 1), a área de estudo está inserida na bacia hidrográfica do rio Ligeiro no perímetro urbano do município de Pato Branco, entre as coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator), em quilômetros, 7.092 a 7.104N e 328 a 338E.



Figura 1. Localização do município de Pato Branco no Estado do Paraná e na região Sudoeste.
 FONTE: Tabalipa (2008)

Essa bacia possui altimetria variando entre 600 e 1000m, apresenta uma topografia de relevo ondulado, respeitando a seguinte distribuição: 21,78% plano; 22,60%, suavemente ondulado; 42,64% ondulado; e 12,33%; forte ondulado e 0,65% montanhoso (Tabalipa, 2008).

A média de precipitação anual para o período de 1979 a 2014 na bacia é de 2.084mm/ano (estação Pato Branco - código ANELL 26075241 - ponto de coordenadas geográficas 26° 06' 59" de latitude Sul e 52° 40' 59" de longitude Oeste e altitude de 721,80m).

A constituição geológica da região é representada por rochas basálticas da Formação Serra Geral, que recobrem inteiramente a área mapeada.

Conforme o CPRM (1996), a geologia da região Sudoeste do Paraná se compõe de rochas basálticas do Grupo São Bento, Formação Serra Geral. As rochas são efusivas básicas toleíticas com basaltos maciços e amigdalóides, com intercalações de arenito e rochas vulcânicas ácidas, ambas atravessadas por diques e sills de diabásio.

Em relação à pedologia, segundo o Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Sudoeste do Estado do Paraná, EMBRAPA (1974), adaptado para a nova classificação adotada pela Embrapa (1999), na bacia estudada ocorrem solos das ordens Latossolo (69%), Nitossolo (5,82%), Cambissolo (5,8%), Neossolo (1,14%) e Gleissolos (4,14%).

2.1. Determinação do Fator de Segurança (FS)

O método utilizado por Tabalipa (2008), para a determinação da susceptibilidade a deslizamentos nas vertentes estudadas segue a proposta apresentada por Fiori & Carmignani (2009), efetuada por meio do método determinístico, baseado no conceito de equilíbrio-limite.

Este modelo matemático tem por base a distribuição das forças atuantes em um talude de extensão infinita, considerando como variáveis, a inclinação do terreno, os índices físicos e propriedades mecânicas do solo (coesão, ângulo de atrito, pesos específicos), a presença da água (peso do solo saturado e altura do lençol freático) avaliando a influência da vegetação. O Fator de Segurança resultante representa a razão das forças favoráveis ao movimento pelas forças resistentes.

A equação (1) apresenta a expressão empregada e a Figura 2 abaixo representa, de modo esquemático, as variáveis consideradas.

$$F_S = \frac{(C_s + S_r) + [(Z \cdot \gamma_{sub} + P_a) \cdot \cos^2 i + T \cdot \text{sen} \theta] \cdot \text{tg} \phi + T \cdot \cos \theta}{[(Z \cdot \gamma_{sub} + Z \cdot \gamma_a + P_a) \cdot \text{sen} i + F_{ve}] \cdot \cos i} \quad (1)$$

onde:

C_s = coesão;

S_r = contribuição da raiz para a coesão do solo;

h_1 = espessura do solo não saturado;

γ_{nat} = peso específico natural do solo;

h_2 = espessura do solo saturado;

γ_{sub} = peso específico do solo submerso;

P_a = peso das árvores sobre o solo;

γ_a = peso específico da água;

i = ângulo de inclinação da vertente;

F_{ve} = força exercida pelo vento nas árvores;

ϕ = ângulo de atrito interno do solo.

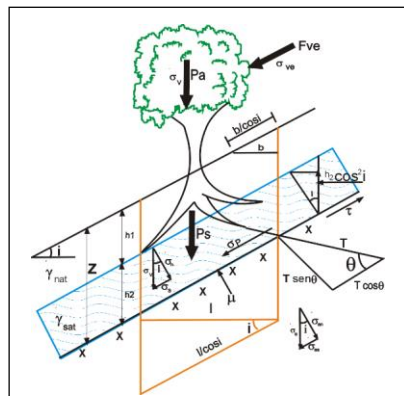


Figura 2. Principais fatores que influenciam na análise de vertentes e forças atuantes
Fonte: Fiori & Carmignani (2009)

2.2. Modelo Shalstab

O SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*) foi desenvolvido por Montgomery & Dietrich (1994), onde propuseram um modelo digital de terreno para mapear o padrão de potencial instabilidade de taludes (Dietrich et al. 1992, Dietrich et al. 1993, Montgomery & Dietrich, 1994), construído sobre o modelo hidrológico, TOPOG, desenvolvido por O'Loughlin (1986).

O modelo de estabilidade de deslizamentos rasos ou SHALSTAB é um modelo matemático baseado na combinação de um modelo de estabilidade de encosta e um modelo hidrológico para calcular a quantidade de chuva necessária para romper o equilíbrio da encosta.

Montgomery & Dietrich (1994), afirmam que o modelo SHALSTAB baseia-se na teoria de encosta infinita da lei de ruptura Mohr-Coulomb, em que o componente descendente do peso do

solo representada pela resistência ao cisalhamento, é igual à força de resistência causada pela coesão e pela resistência de atrito, devido à tensão normal eficaz no plano de ruptura.

Para modelar os controles hidrológicos, Montgomery & Dietrich (1994), usaram um fluxo de subsuperfície raso em estado estacionário com base no trabalho de O'Loughlin (1986) e que tem semelhanças com TOPOG (Beven & Kirkby, 1979) que mostram que a saturação do solo tem relação direta com a razão entre a área de drenagem a montante de um ponto dividida por uma unidade de comprimento de contorno e a declividade.

Combinando o modelo de estabilidade de taludes e o modelo hidrológico encontramos a equação de estabilidade hidrológica da encosta utilizada por SHALSTAB que pode ser expresso em termos de precipitação crítica Q_c (equação 2):

$$Q_c = \frac{T \cdot \sin \theta}{(a/b)} \left[\frac{C}{\rho_w \cdot g \cdot Z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right] \quad (2)$$

que tornam o declive instável, usando a relação onde Q_c é a precipitação estacionário eficaz (m/dia), T é a transmissividade (m^2/dia) do solo, a saturação é em relação da condutividade hidráulica K_s multiplicada pela profundidade Z do solo, θ a inclinação ($^\circ$), a é a área contribuinte da célula examinada (m^2), b a largura da sua secção de saída (correspondente ao tamanho do pixel - m), C a coesão, ρ_s densidade do solo (kg/m^3), ρ_w a densidade da água (kg/m^3), g a aceleração da gravidade (m/s^2), Z a profundidade do solo, ϕ o ângulo de atrito ($^\circ$).

3. RESULTADOS

Os parâmetros das propriedades do solo da área de estudo foram encontrados a partir de levantamentos de campo e ensaios de laboratório realizados por Tabalipa (2008). No referido estudo foram executados coleta e descrição de solos em 16 pontos pré-determinados para levantar aspectos gerais do afloramento, localização na área, relevo, drenagem, existência ou não de erosão, situações de risco, além do uso atual do solo.

Com as amostras de solo desses pontos, determinou-se a permeabilidade do solo (K), através do método de Carga Variável baseado na lei de Darcy.

Com as informações sobre os solos e a declividade da área de estudo, foram gerados mapas de fatores de segurança, indicando a estabilidade das encostas. Foram consideradas como instáveis todas as áreas com fator de segurança menor do que 1,5.

Para realizar a comparação dos resultados de fatores de segurança com o modelo SHALSTAB, adotou-se o mapa de fatores de segurança para solos saturados (Figura 3), sem considerar a influência da vegetação.

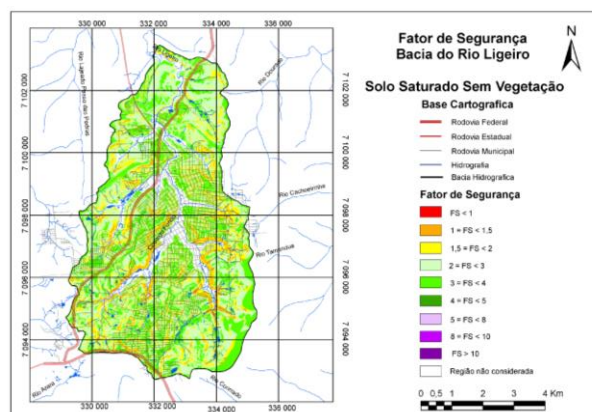


Figura 3. Mapa de Fator de Segurança do solo saturado, sem a influência da vegetação.

Fonte: Tabalipa (2008)

No mapa de Fator de Segurança descrito anteriormente as áreas instáveis totalizaram 2,86 km² representando 6,27% do total.

Para a aplicação de SHALSTAB inicialmente foi confeccionado o Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de estudo, no *software ArcGis 9.3*, utilizando curvas de nível de intervalo de 1 m, obtidas através da base planialtimétrica do perímetro urbano de Pato Branco na escala 1:10.000 onde gerou-se um *raster* de grade regular com resolução de 1 m.

Os resultados finais do SHALSTAB geram sete classes de estabilidade, sendo cinco classes intermediárias em função da variável Q/T. As duas classes extremas representam áreas incondicionalmente instáveis e incondicionalmente estáveis, respectivamente.

Para melhor entendimento dos processos envolvidos no desencadeamento de escorregamentos, estas sete classes foram reduzidas a quatro, conforme Tabela 1, tendo em vista os dados de precipitação diária ocorridas na área de estudo.

Tabela 1. Reclassificação das classes geradas por SHALSTAB no estudo realizado.

Nº. de Classes	Classes SHALSTAB	Classes adotadas
1	Instabilidade	Incondicionalmente instável
2	0 - 50	
3	50- 100	Instável
4	100 - 200	
5	200 - 400	
6	400 - 872	Estável
7	Estabilidade	Incondicionalmente estável

Na área total estudada (44 km²) SHALSTAB encontrou um total de 0,195 km² de áreas instáveis e incondicionalmente instáveis, contra os 2,86 km² encontrados no trabalho anterior.

A Figura 4 mostra o mapa de susceptibilidade a ocorrência de escorregamentos gerados por SHALSTAB, sem especificar os diferentes valores de pluviosidade, devido a difícil a visualização na escala utilizada e considerando o pequeno tamanho da área instável, vez que a maior parte da bacia é classificada como incondicionalmente estável.

Os resultados encontrados pelos dois métodos apresentaram grande diferença em relação a quantidade de áreas instáveis.

Esses resultados podem ser devido ao fato de que para calcular o Fator de Segurança em Tabalipa, (2008), estimou-se que todo o solo estaria saturado, o que na realidade não ocorre, devido a declividade da encosta, propriedades do solo e movimentação da água no solo. SHALSTAB ao invés, inclui as características da movimentação da água no solo e assim, calcula de forma mais precisa.

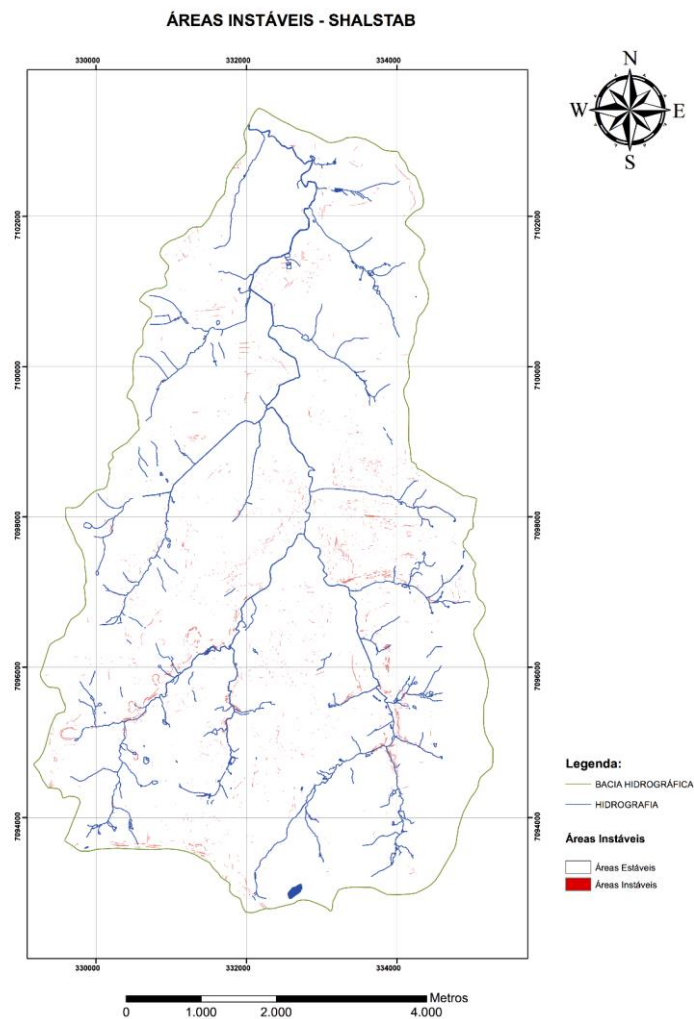


Figura 4. Mapa de Áreas Instáveis gerados por SHALSTAB.

Foi constatado uma satisfatória correlação entre os dois modelos, uma vez que ambas metodologias, registraram esses locais como áreas instáveis.

Na Figura 5 é possível ver um detalhe do mapa gerado mostrando diferentes níveis de estabilidades em relação a intensidade de chuva, conforme as classes geradas por SHALSTAB.

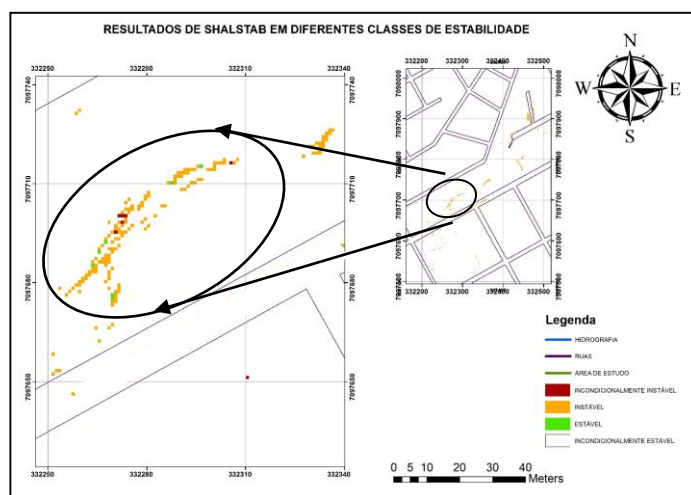


Figura 5. Detalhe de área considerada instável pelos resultados encontrados de SHALSTAB localizados no bairro Centro, mostrando diferentes estabilidades em relação a intensidade de pluviosidade.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram que ambas metodologias mostraram-se aptas como ferramenta para identificar zonas de susceptibilidade à ocorrência de escorregamento raso.

A partir dos mapeamentos realizados observou-se que o modelo SHALSTAB, apresentou um melhor desempenho nas diversas simulações realizadas, uma vez que o tamanho as áreas instáveis geradas, apresentam valores muito próximo ao tamanho dos escorregamentos ocorridos. Além disso, SHALSTAB permite a geração de mapas que representam a intensidade de chuva necessária para o rompimento de determinada encosta.

Esse tipo de informação é essencial a fim de desenvolver planos de gestão de riscos para os locais que estão representados como instáveis.

Portanto a modelagem permite reduzir e prever os efeitos dos escorregamentos, tanto em termos de prejuízos materiais quanto em termos de perdas de vidas humanas, levando a uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IAPAR pela concessão dos dados pluviométricos. Agradecimentos também a UNISI – Università Degli Studi Siena, Itália, pela disponibilização do laboratório de Geomática para execução dos trabalhos.

REFERÊNCIAS

- BEVEN, K.J. & KIRKBY, M.J. 1979. "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology". Bulletin of Hydrological Sciences, v. 24, pp. 43-69.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. (1996) *Mapa Hidrogeológico da América do Sul – Escala: 1:5.000.000: texto explicativo/UNESCO*, Departamento Nacional de Produção Mineral. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Brasília: CPRM.
- DIETRICH W.E., Wilson C.J., Montgomery D.R., McKean J. (1993) *Analysis of Erosion Thresholds, Channel Networks and Landscape Morphology Using a Digital Terrain Model*. The Journal of Geology, v. 101, pp. 259-278.
- DIETRICH W.E., Wilson C.J., Montgomery D.R., McKean J., Bauer R. (1992) *Channelization Thresholds and Land Surface Morphology*, *Geology*, v. 20, p. 675-679,.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. (1974) *Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Sudoeste do Estado do Paraná*. Curitiba: EMBRAPA-SNLCS/SUDESUL/IAPAR, 79 p. (Boletim Técnico n. 40)
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. (1999) *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 412 p.
- FIORI A. P. & CARMIGNANI L. (2009) *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. Aplicação na estabilidade de taludes*. 2ª edição revisada e ampliada. Editora da UFPR, Oficina de Textos, 602p.
- GUIDICINI G. & NIEBLE C. M. (1983) *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. São Paulo: Edgard Blücher, 196 p.
- MONTGOMERY D. R. & DIETRICH W. E. (1994) *A physically based model for the topographic control on shallow landsliding*. Water Resources Research, v.30, n.4, p.1153-1171
- O'LOUGHLIN E.M. (1986) *Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis*. Water Resources Research, v. 22, n. 5, p. 794-804.

TABALIPA N.L. (2008) *Mapeamento geoambiental do Município de Pato Branco, Paraná, como ferramenta para o planejamento territorial e ambiental*. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Paraná, CAPES. Orientador: Alberto Pio Fiori.