

APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB PARA ANÁLISE DE DESLIZAMENTOS EM UMA MICROBACIA DA ZONA OESTE DO RECIFE-PE.

Ana Cláudia Almeida Calado ¹
Bruno Diego de Moraes ²
Betânia Queiroz da Silva ³
Roberto Quental Coutinho ⁴

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional acelerado gera problemas em seu uso e ocupação do solo, em áreas de declividades mais acentuadas essa aceleração aumenta a suscetibilidade a deslizamentos em encostas urbanas, devida à falta de planejamento estrutural do espaço. Dessa forma, a maneira com que essa população se estabelece e modifica o espaço, como: modificação da geometria das encostas, remoção da vegetação, construções de edificações sem estrutura adequada, leva ao aumento da suscetibilidade, que é potencializada em decorrências de eventos climáticos extremos.

Em meio a tudo isso, surge a necessidade do uso de modelos matemáticos, que tem como finalidade, aperfeiçoar o sistema de monitoramento e alerta de suscetibilidades e risco desastres naturais. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi utilizar o modelo matemático SHALSTAB, para analisar a suscetibilidade a deslizamentos, em uma microbacia hidrográfica na Região Metropolitana do Recife (RMR) e validar esse modelo através método LR class - Landslide Ratio of each FS Class – traduzido como taxa de deslizamento para cada classe de FS.

A utilização de modelos matemáticos de previsão de áreas susceptíveis a deslizamentos depende, diretamente, de uma melhor compreensão dos diferentes mecanismos e fatores condicionantes envolvidos, o que requer ensaios de campo e o monitoramento desses processos, principalmente no que se refere à caracterização da dinâmica hidrológica superficial e subsuperficial das encostas (Fernandes et al., 2001).

¹ Mestranda do Curso de **Engenharia Civil** da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, claudiacallado9@gmail.com;

² Doutorando do Curso de **Engenharia Civil** da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, bruno.diegom@ufpe.br;

³ Doutoranda em **Engenharia Civil** da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, betania.queiroz@ufpe.br;

⁴ Professor orientador: Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, roberto.coutinho@ufpe.br.

SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability Model) é um modelo determinístico usado para identificar locais suscetíveis a escorregamentos translacionais. Ele calcula a instabilidade do terreno com base na quantidade de chuva crítica efetiva necessária para desencadear a instabilidade (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

O modelo incorpora parâmetros topográficos, como o ângulo da encosta e a área de contribuição, obtidos a partir de um Modelo Digital do Terreno, e as propriedades físicas do solo, incluindo coesão, ângulo de atrito interno, espessura do solo e peso específico (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994). Esse modelo segue os princípios do TOPOG, uma abordagem desenvolvida por O'Loughlin (1986), que é um modelo hidrológico baseado na topografia, que pressupõe a saturação do solo quando o excedente de vazão proveniente à montante supera o produto da inclinação local com a transmissividade do solo.

O SHALSTAB calcula o fator de segurança (FS) aplicando o método do talude infinito. Nesse método, a análise de equilíbrio-limite considera que as forças que tendem a provocar a ruptura em encostas são balanceadas pelas forças resistentes. Assim, a relação entre as forças de resistência e as forças que favorecem o deslocamento do material em uma encosta é expressa pelo FS, tendo como base a teoria de estabilidade de encosta infinita a equações desenvolvidas por Selby (1993). A combinação do modelo de encosta infinita e do modelo hidrológico de estado uniforme é gerada a partir do rearranjo das equações de Selby (1993).

Assim sendo, o SHALSTAB expressa a estabilidade do talude como a razão da precipitação efetiva e transmissividade do solo ($\log q/T$), em vez do fator de segurança (FS). A estabilidade é classificada em sete categorias, conforme mostrado na Tabela 1 (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

Melo e Kobiyama (2018) realizaram um levantamento dos trabalhos técnico-científicos que aplicaram SHALSTAB no mapeamento de escorregamentos no Brasil, caracterizando-os em função da adoção do limiar de instabilidade. Dos trabalhos revisados, 83% adotaram o limiar de instabilidade proposto pelo padrão do software ($\log q/T = -3,1$), enquanto 17% adotaram outros limiares. Esta última porcentagem inclui os trabalhos de Michel et al. (2012), que utilizaram o limiar $\log q/T$ de $-3,4$, enquanto Riffel et al. (2016), adotou $\log q/T$ de -2 . Este trabalho adotará o limiar de instabilidade padrão do programa SHALSTAB, ou seja, $\log q/T = -3,1$. Portanto, todas as áreas com valores de $\log q/T < -3,1$ serão consideradas instáveis.

Tabela 1 - Classes de estabilidade de taludes de acordo com o modelo SHALSTAB.

Log(q/T)	Características
9,9 – 10 (Incondicionalmente Estável)	O talude é estável mesmo quando o solo está completamente saturado ($h/z=1$)
9,9 – -2,2 (>-2,2)	Quanto mais próximo o $\log(q/T)$ estiver de -9,9, menor será a relação h/z , indicando uma elevação significativa do
-2,2 – -2,5	

-2,5 – -2,8	lençol freático acima da superfície de ruptura, o que pode desencadear deslizamentos de terra.
-2,8 – -3,1	
-3,1 – -9,9 (<-3,1)	
-9,9 – -10 (Incondicionalmente Instável)	O talude pode romper mesmo em condições não saturadas ($h/z=0$)

Fonte: Pinho e Augusto Filho (2022) baseado em Montgomery e Dietrich (1994).

A metodologia LR Class foi proposta por Park, Nikhil e Lee (2013) e representa a relação entre a porcentagem de deslizamentos dentro de uma classe específica de suscetibilidade em comparação com o registro de ocorrência de movimento gravitacional de massa (MARIN; VELASQUEZ; SÁNCHEZ, 2021).

Esse método surgiu como uma alternativa a outros índices de desempenho, como a curva ROC (Receiver Operating Characteristic Curve), que necessita da área precisa dos deslizamentos para fornecer resultados confiáveis (PARK; NIKHIL; LEE, 2013). Em outras palavras, este índice foi desenvolvido para verificação do desempenho de modelos matemáticos aplicados em regiões onde o registro do evento é composto por pontos, ou seja, os locais são conhecidos, mas os limites das cicatrizes do deslizamento não foram mapeados (TRAN et al., 2017).

Pode-se calcular o LR Class para uma determinada faixa (classe) utilizando a equação em que: c é a porcentagem dos deslizamentos contidos dentro da área de uma determinada classe em relação ao número total de eventos; e d é a porcentagem da área da respectiva classe, prevista pelo modelo, em relação a área total da área de estudo. O resultado quantitativo em porcentagem de cada classe (% LR) é dado pela razão entre o LR de uma classe de interesse específica pelo somatório das demais LR class calculadas para outras classes.

As equações mostram que quanto maior a porcentagem de ocorrências localizadas dentro da área classificada como instável, maior será a % LR. Entretanto, os resultados também são influenciados pelo tamanho relativo da área prevista como instável, de modo que, quanto menor a área prevista, maior será LR, e, conseqüentemente, a precisão do mapa de suscetibilidade gerado. Por fim, conclui-se que a %LR class indica a chance em porcentagem de um deslizamento ocorrido na área de estudo estar incluído na área prevista como instável ($FS \leq 1,00$).

METODOLOGIA

O Modelo SHALSTAB necessita em suas análises de parâmetros geotécnicos e topográficos. Os parâmetros topográficos, são representados pelo MDT na escala espacial de

1:1000, com resolução de 10cm, concedidos pelo projeto PE3D. Os parâmetros geotécnicos: c , ϕ , γ . Os parâmetros topográficos são: A , θ , z . Sendo A , θ extraídos do MDT e z estimado.

Para a realização das análises de suscetibilidade, foi elaborado um cenário na profundidade de 3 metros, em que os parâmetros geotécnicos utilizados são constantes em toda a área que lhe compete, definidos por meio de ensaios laboratoriais. Essa variação tem como objetivo analisar a influência da profundidade do solo no aparecimento de áreas instáveis, além de verificar as possíveis profundidades das superfícies de ruptura.

Inicialmente, foram definidas as áreas utilizando as curvas de níveis extraídas do MDT/PE3D, para poder separar com facilidade as camadas de material pelas cotas, baseando-se pelos parâmetros obtidos a partir das coletas e dos resultados que as autoras Bandeira (2010) e Magalhães (2013) obtiveram nessa área de estudo.

A escolha dos parâmetros de ambas as autoras se justifica por serem dentro da área de estudo, e seus parâmetros demonstraram coerência com o material encontrado em campo. Porém, visto que a microbacia apesar de fazer parte da Fm. Barreiras, existe uma diferença dos materiais encontrados na área sudeste do restante, dessa forma utilizou-se os dados de Bandeira que foram realizados a sudeste, e os de Magalhães, que foram realizado a oeste da microbacia, visando obter a melhor resposta do modelo matemático.

Os parâmetros da camada de topo entre 60 e 100m de altura, foi definido através dos dados de Bandeira, visto que tinha maior representatividade em extensão do material e suas características na área como um todo. As camadas entre as cotas 60m e 20m foram diferenciadas entre zonas oeste/norte/nordeste representando os dados de Magalhães (2013) e a zona sul/sudeste/leste representando os dados de Bandeira. Por fim, o fundo de vale utilizou os dados de Bandeira, visto que não havia dados de Magalhães nessa área.

Após a definição dos parâmetros, pode-se processar o modelo matemático SHALSTAB, através da ferramenta que foi desenvolvido por Sbroglia et al. (2018) onde foi determinado a opção *ASA – oito direções* no ArcGIS PRO. A *Tabela 2* apresentadas as classes utilizadas para classificar o resultado do SHALSTAB.

Tabela 2 – Descrição da classificação dos resultados

st.	Classes log q/T	Descrição classes de estabilidade	
1	-9,9 - -10	Incondicionalmente instável e saturado	ISNTÁVEL
2	-9,9 - -3,1	Incondicionalmente instável e não saturado	MARGINALMENTE INSTÁVEL
3	-3,1 - -2,8	Instável e saturado	
4	-2,8 - -2,5	Instável e não saturado	
5	-2,5 - -2,2	Estável e não saturado	MARGINALMENTE ESTÁVEL
6	-2,2 - 9,9	Incondicionalmente estável e não saturado	ESTÁVEL

Fonte: adaptado de Dietrich & Montgomery (1998), Listo (2011), Sabrina Ip. et al. (2020), e a autora, 2024.

A coluna 1 exibe a classificação numérica, enquanto a coluna 2 descreve cada classe log q/T. A última coluna traz a classificação baseada em quatro categorias, visando melhorar a interpretação do mapa gerado, conforme a sistematização do Fator de Segurança (FS) de Sabrina et al. (2020).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Encontramos na Tabela 3 os resultados da suscetibilidade identificados pelo ID das suas classes numéricas, o tamanho das suas respectivas áreas (m²), a relação das ocorrências por cada classe, e todos os percentuais obtidos. O *Gráfico 1* resume a relação entre a proporção da área de cada classe e o número de ocorrências registradas nela.

Os resultados indicam que 11,39% da área da microbacia é classificada como instável pelo SHALSTAB, e que 88,66% das ocorrências estão situadas nesta classe. De acordo com a métrica LRClass, essa classe consegue explicar 48,21% das ocorrências.

Para a segunda, terceira e quarta classe, os resultados mostram que 2,45% da área é classificada como marginalmente instável, e que 6,30% das ocorrências estão situadas nessa classe. A classe considerada marginalmente instável explica 50,35% das ocorrências.

As classes cinco e seis mostram que 15,66% da área da microbacia encontra-se classificado como marginalmente estável, e que 3,36% das ocorrências da área estão situadas nestes limites. A classe considerada marginalmente estável explica 1,44% das ocorrências.

O resultado da classe sete mostra 70,51% da área da microbacia classificada como estável, porém chegou a ser identificadas 1,68% das ocorrências da área. Essa classe explica 0,15% das ocorrências registradas.

Tabela 3 – Validação do resultado com o método LR_class

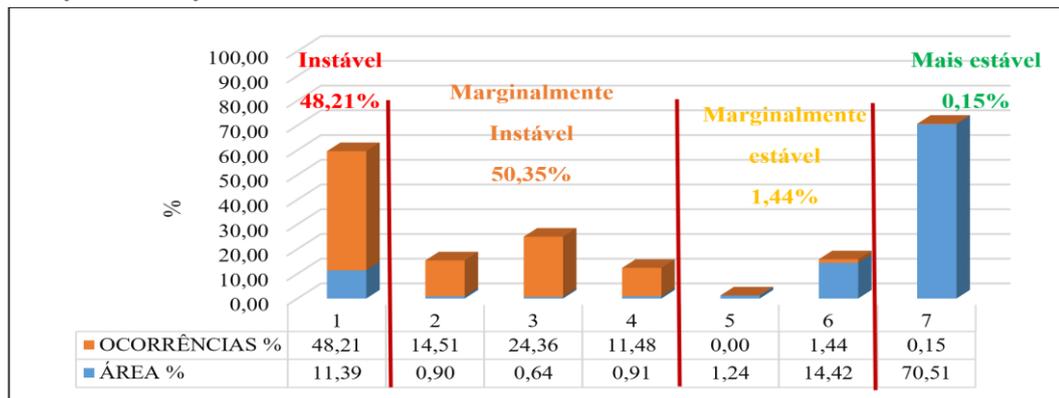
ID	Área (m ²)	Classes log q/T	Locais de ocorrência - a	% Locais de ocorrência - c=a/b	% área prevista - d	LR class - e = c/d	% LR class - e / f
1	140122,87	-9,9 - -10	211,00	88,66	11,39	7,79	48,21
2	11028,22	-9,9 - -3,1	5,00	2,10	0,90	2,34	14,51
3	7884,23	-3,1 - -2,8	6,00	2,52	0,64	3,94	24,36
4	11158,11	-2,8 - -2,5	4,00	1,68	0,91	1,85	11,48
5	15216,99	-2,5 - -2,2	0,00	0,00	1,24	0,00	0,00
6	177507,07	-2,2 - 9,9	8,00	3,36	14,42	0,23	1,44

7	867729,37	9,9 - 10	4,00	1,68	70,51	0,02	0,15
	1230646,86		238,00 (b)	100,00	100,00	16,15 (f)	100,00

Fonte: Calado, 2024.

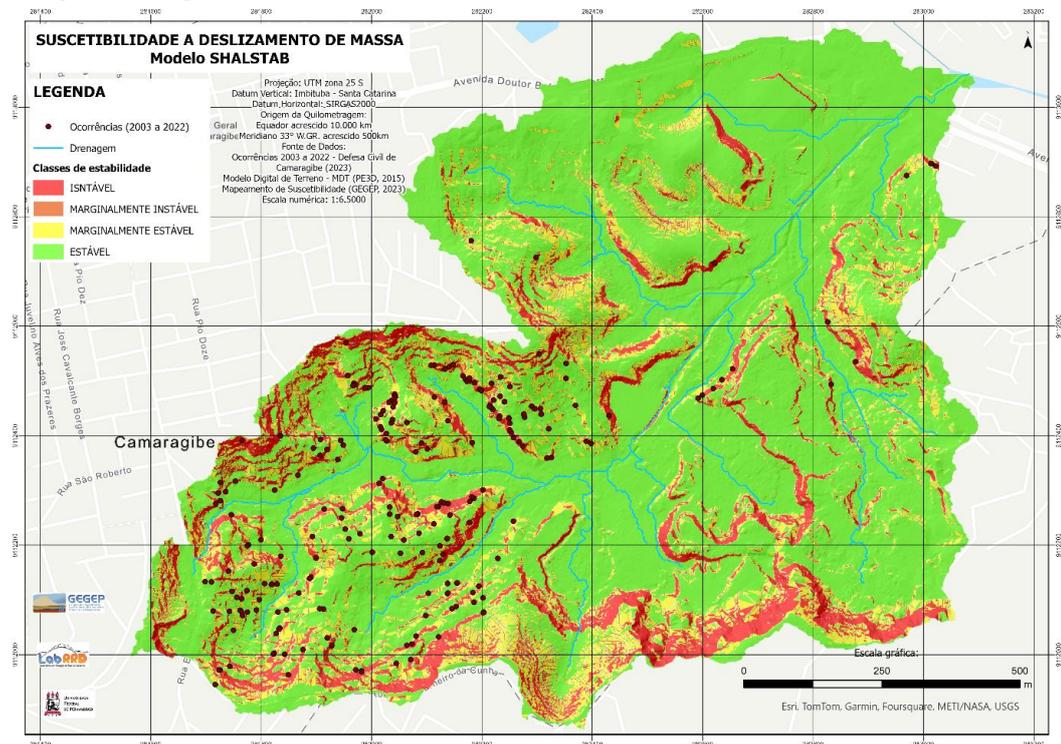
Por fim, pode-se construir o mapa de suscetibilidade a deslizamentos com a sobreposição das ocorrências registradas entre 2003 e 2022 na referida área (Figura 1). A concentração de ocorrências de movimento gravitacional de massa foi concentrada justamente onde a classe de suscetibilidade é considerada “Marginalmente instável”, ou seja, propensas ao evento simulado. Além dos aspectos físicos e geológico, o tipo de uso e ocupação desse solo pode potencializar a suscetibilidade e o risco de acidentes.

Gráfico 1 - Profundidade considerada de 3 metro



Fonte: Calado, 2024.

Figura 1- Mapa de Suscetibilidade e ocorrências



Fonte: Gegep, 2024.

Outro fator importante, que não está sendo considerado nessa análise, mas faz muita diferença no aumento da suscetibilidade são as cargas das residências, vegetação de grande porte, além das águas servidas que somatizam, predispõe essas áreas ao risco potencial de acidentes por movimento gravitacional de massa, como, alguns ocorridos na área em 2022, que tiveram perdas materiais, econômicas e de vidas humanas/animais.

Por fim, considerando as classes declarada como instáveis, obtive o *LR_class* 98,56% de representatividade. Essas áreas tem como característica em sua grande parte declividades entre 27° a 45°, ou seja, a topologia é um dos fatores que mais explica grande parte dos deslizamentos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo SHALSTAB pode ser utilizado para pesquisas acadêmicas, monitoramento por parte do estado ou de empresas que visam o planejamento urbano, pois é uma boa ferramenta para utilizar em estudos e monitoramentos de áreas que demonstram traços de instabilidade como também áreas que possui histórico recorrente, pois ele conseguiu identificar as áreas instáveis, ficando claro em sua validação. Isso evidencia a importância do aprofundamento dos estudos acadêmicos para melhoramento dos modelos matemáticos e a necessidade da sociedade civil e do estado cooperarem com esse feito, tendo em vista as implicações das mudanças climáticas nessas áreas e em possíveis áreas que venham a surgir.

Palavras-chave: Suscetibilidade a deslizamento, Modelo matemático SHALSTAB, *LR_class*, Fator de segurança.

REFERÊNCIAS

BANDEIRA, A. P. N. **Parâmetros técnicos para gerenciamento de áreas de risco de escorregamentos de encostas na Região Metropolitana do Recife**. Tese de Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 340. 2010.

FERNANDES, N. F. et al. Condicionantes Geomorfológicas dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis / Revista Brasileira de Geomorfologia, volume 2, nº 1 (2001) 51-71

MAGALHÃES, J. S. L. A. **Estudo de estabilidade da Encosta Alto do Padre Cícero no Município de Camaragibe – PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

MARIN, R. J.; VELASQUEZ, M. F.; SÁNCHEZ, O. **Applicability and performance of deterministic and probabilistic physically based landslide modeling in a data-scarce environment of the Colombian Andes.** *Journal of South American Earth Sciences*, v. 108, 2021.

MELO, C. M.; KOBİYAMA, M. **Aplicação Do Modelo Shalstab No Estudo De Escorregamentos No Brasil: Revisão.** *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19, n. 4, 2018.

MICHEL, G. P.; KOBİYAMA, M.; GOERL, R. F. **Análise comparativa entre os modelos Shalstab e Sinmap na identificação de áreas susceptíveis a escorregamentos translacionais.** *Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos: artigos selecionados*. Porto Alegre: ABRH, p. 209–225, 2012.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, v. 30, n. 4, 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. 5, p. 794–804, 1986.

PARK, D. W.; NIKHIL, N. V.; LEE, S. R. Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v. 13, p. 2833–2849, 2013.

PINHO, T. M.; AUGUSTO FILHO, O. Landslide susceptibility mapping using the infinite slope, SHALSTAB, SINMAP, and TRIGRS models in Serra do Mar, Brazil. *Journal of Mountain Science*, v. 19, n. 4, p. 1018–1036, 2022.

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*, v. 68, p. 1805–1818, 2016.

SABRINA C. Y. IP.; RAHARDJO, Harianto; SATYANAGA, Alfredo. Three-dimensional slope stability analysis incorporating unsaturated soil properties in Singapore. *Georisk: assessment and management of risk for engineered systems and geohazards*, v. 15, n. 2, p. 98–112, 2020. doi: 10.1080/17499518.2020.1737880.

SBROGLIA, R. M. et al. Mapping susceptible landslide areas using geotechnical homogeneous zones with different DEM resolutions in Ribeirão Baú basin, Ilhota/SC/Brazil. *Landslides*, v. 15, n. 10, p. 2093–2106, 2018.

SELBY, M. J. *Hillslope: materials and process*. Oxford, England: Oxford University Press, p. 451, 1993.

TRAN, T. V.; LEE, G.; AN, H.; KIM, M. Comparing the performance of TRIGRS and TiVaSS in spatial and temporal prediction of rainfall-induced shallow landslides. *Environ Earth Sci*, v. 76, n. 315, 2017.