

ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS SHALSTAB E SINMAP NA SUSCEPTIBILIDADE A OCORRÊNCIA DE ESCORREGAMENTOS RASOS NO MUNICÍPIO DE CARAGUATATUBA/SP

**Comparative analysis of the SHALSTAB and SINMAP models in the susceptibility
to the occurrence of shallow landslides in the city of Caraguatatuba / SP**

Beatriz Gusso Duz¹

Fábio Augusto Gomes Vieira Reis²

Cláudia Vanessa dos Santos Corrêa³

¹ b.duz@unesp.br

² fabio.reis@unesp.br

³ claudia.correa@unesp.br

RESUMO

Os modelos SHALSTAB e SINMAP vêm sendo aplicados em estudos sobre escorregamentos, a fim de prevê-los com base em modelos hidrológicos e de estabilidade infinita. Tendo em vista o importante evento ocorrido em 1967, com escorregamentos generalizados por todo município de Caraguatatuba/SP, o objetivo deste trabalho é apresentar as modelagens realizadas com o SHALSTAB e SINMAP em cinco bacias hidrográficas do município e comparar a performance de ambos. Para tal, criou-se um inventário de cicatrizes com base em imagens de fotografias aéreas e, partindo de folhas topográficas vetorizadas foi possível confeccionar mapas temáticos, servindo como inputs aos modelos. A comparação do desempenho dos modelos foi realizada com base no Método da Taxa de Sucesso e Erro. Os resultados apontaram que ambos os modelos adotaram a declividade como maior fator contribuinte para a ocorrência dos escorregamentos rasos, sendo que para a área de estudo, o modelo SINMAP obteve melhor desempenho.

Palavras-Chave: Escorregamentos Rasos; SHALSTAB; SINMAP

ABSTRACT

The SHALSTAB and SINMAP models have been applied in landslides studies, in order to predict them based on hydrological and infinite stability models. In view of the important event that occurred in 1967, with widespread landslides throughout the municipality of Caraguatatuba/SP, the objective of this work is to present the modeling carried out with SHALSTAB and SINMAP in five watersheds of the municipality and compare the performance of both. To this end, an inventory of landslides scars was created based on aerial photo images and, starting from the vectorized Topographic Sheets it was possible to make thematic maps. The performance comparison of the models was performed based on the Success and Error Rate Method. The results showed that both models adopted the slope as a major contributing factor for the occurrence of shallow landslides, and for the study area, the SINMAP model had better performance.

Keywords: Shallow Landslides; SHALSTAB; SINMAP.

1. INTRODUÇÃO

Os processos relacionados aos movimentos gravitacionais de massa envolvem o desprendimento, transporte e deposição de solo e/ou rocha encosta abaixo sob ação da gravidade, contribuindo para a configuração do relevo (SELBY, 1982). Segundo Fiori (1995), a força da gravidade é responsável por originar tensões cisalhantes internas no manto de alteração ao longo das vertentes. Estas tensões aumentam com a inclinação e a

altura das encostas, com o peso específico do solo e com a quantidade de água que se infiltra e acumula no mesmo.

A água apresenta papel fundamental na ocorrência dos movimentos gravitacionais de massa, uma vez que, alojando-se nos planos de fraqueza, faz com que a resistência mecânica do solo diminua – sob efeito da pressão neutra – atuando como um agente deflagrador de escorregamentos em ambientes tropicais úmidos (GUIDICINI; IWASA, 1976).

Os escorregamentos translacionais são definidos como fenômenos naturais de movimentos gravitacionais de massa, classificados como rápidos (m/h a m/s), de curta duração, com presença de plano de ruptura bem definido, permitindo-se, portanto, a diferenciação entre material transportado e não transportado (GUIDICINI; NIEBLE, 1984; AUGUSTO FILHO, 1992; FERNANDES, AMARAL, 1996; TOMINAGA, SANTORO, AMARAL, 2009; MORIMITSU, TOMINAGA, 2013).

A caracterização de áreas susceptíveis à ocorrência de escorregamentos é de suma importância para se prevenir e reduzir os danos que estes processos possam causar (DYKES, 2002; WILKINSON et al., 2012; VIEIRA e RAMOS, 2015). Para tal, diversos métodos foram desenvolvidos de modo a avaliar o papel dos agentes deflagradores, podendo ser aplicados em diversas escalas de trabalho, englobando análises desde encostas até bacias hidrográficas (LOPES et al., 2007; WILKINSON et al., 2012).

A modelagem computacional é um dos métodos de se caracterizar os escorregamentos translacionais rasos, e dentre estes métodos, destacam-se os modelos de bases físicas. Neste caso, o uso de equações físicas auxilia na prenúncia da susceptibilidade a ocorrência de escorregamentos translacionais em diferentes cenários de uso e ocupação do solo e de clima (GUZZETTI et al., 1999; VAN WESTEN, 2004; VIEIRA e RAMOS, 2015).

Modelos de bases físicas utilizam conjuntamente modelos de estabilidade de encostas e modelos hidrológicos, dentre os quais se destacam o TRIGRS - *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability* segundo Alvioli e Baum (2016), o dSLAM - *Distributed, Physically Based Slope Stability Model* citado por Wu e Sidle (1995) o SINMAP - *Stability INDEX MAPPING* segundo Pack (1998) e o SHALSTAB - *Shallow Landslide Stability Analysis* (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994). Embora os dois últimos apresentem características similares com relação aos parâmetros de entrada, o SHALSTAB destaca-se por ser um modelo determinístico, enquanto o SINMAP, um modelo probabilístico.

Com base nos mais recentes trabalhos publicados nesta temática, citando-se (Guimarães et al., 2003; Fernandes et al., 2004; Nery e Vieira, 2014; Michel et al., 2014; Vieira e Ramos, 2015; Sinarta et al., 2017; Lazzari e Piccarreta, 2018; Melo e Kobiyama, 2018; Buechi et al., 2019), que utilizaram dos modelos SHALSTAB e/ou SINMAP, optou-se por utilizar ambos de modo a avaliar seu desempenho em escala de menor detalhe, bem como em diferente área de estudo. Sendo assim, os modelos SHALSTAB e SINMAP foram aplicados na análise da susceptibilidade a escorregamentos nas bacias hidrográficas “Pau d’Alho”, “Divisa”, “Ribeirão Aldeia”, “Canivetal” e “Santo Antônio”, situadas no município de Caraguatatuba (SP). Tais bacias foram selecionadas por inserir-se no

contexto da Serra do Mar, cuja região apresenta encostas com declividade entre 30° e 35°, altos índices pluviométricos, favorecendo à ocorrência de escorregamentos (IPT, 1986; TATIZANA et al., 1987; AUGUSTO FILHO, 2001). Ademais, o município de Caraguatatuba/SP é constantemente afetado por escorregamentos, destacando-se o evento ocorrido em 18/03/1967 citados por Gramani (2001), Nery (2016) e Corrêa (2017), trazendo inúmeros prejuízos econômicos e sociais para a região. Diante disso, torna-se relevante a aplicação de ambos os modelos, uma vez que no Brasil são escassos os trabalhos desta temática - apesar de ser um país de clima tropical, com índice pluviométrico elevado em muitos locais e ocupação de encostas desordenadas, gerando um cenário visto todos os anos de desastres envolvendo perda de vidas devido a ocorrência de escorregamentos.

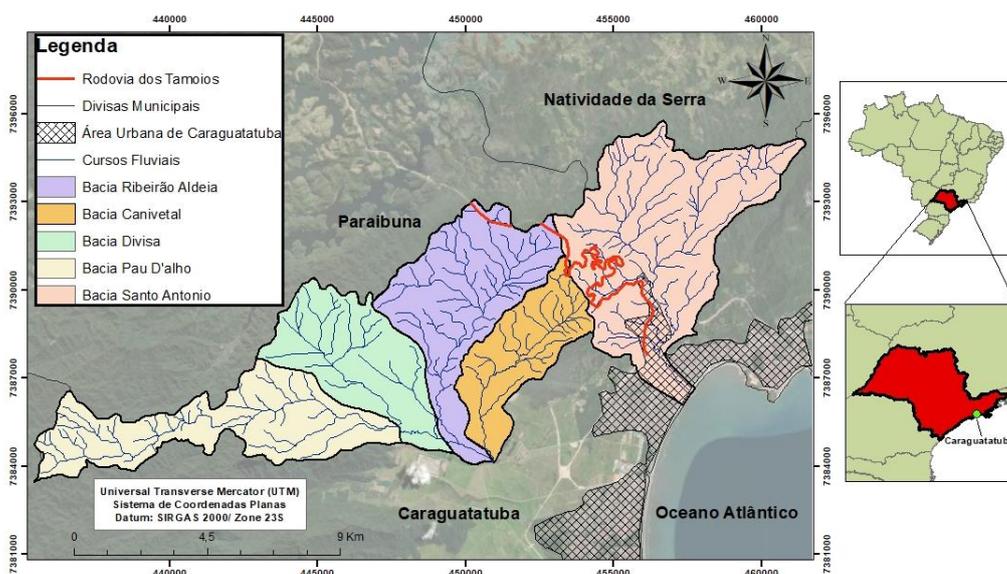
Os objetivos do presente estudo foram, portanto: (1) aplicar os modelos SHALSTAB e SINMAP nas Bacias “Pau d’Alho”, “Divisa”, “Ribeirão Aldeia”, “Canivetal” e “Santo Antônio”, município de Caraguatatuba, litoral Norte do Estado de São Paulo e (2) realizar uma análise de desempenho de ambos os modelos com base no Método da Taxa de Sucesso e Erro proposto por Sorbino et al. (2010).

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização

A área de estudo deste trabalho insere-se na Serra do Mar paulista, cujo local apresenta condições favoráveis ao desenvolvimento de escorregamentos, devido ao clima tropical com alta pluviosidade, escarpas e desníveis elevados, forte controle estrutural e, intensa intervenção antrópica nas regiões costeiras (ALMEIDA, 1964; AUGUSTO FILHO, 2001; CERRI et al., 2018). Com base em uma análise prévia através de imagens de satélite, selecionaram-se as bacias hidrográficas “Pau d’Alho”, “Divisa”, “Ribeirão Aldeia”, “Canivetal” e “Santo Antônio”, localizadas no município de Caraguatatuba (SP) (Figura 1), por apresentarem maior número de cicatrizes de escorregamento, bem como maior controle estrutural indicado pela presença de lineamentos estruturais.

Figura 1: Localização e delimitação da área de estudo



2.2 Geologia e Geomorfologia

O sistema de escarpas e serras representado pelas Serras do Mar e da Mantiqueira constitui a mais destacada feição orográfica da borda atlântica do continente sul-americano. A Serra do Mar é um conjunto de escarpas festonadas com cerca de 1.000 km de extensão, se estendendo do Rio de Janeiro ao norte de Santa Catarina, onde deixa de existir como unidade orográfica de borda escarpada de planalto e se apresenta em cordões de serras paralelas. No Estado de São Paulo, a Serra do Mar impõe-se como borda de planalto, apresentando altitudes de 800 a 1.200 m (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998).

A área delimitada para estudo apresenta três diferentes tipos de compartimentos de relevo, sendo estes: Planalto, Encostas de Planalto – ou Serrania Costeira – e, por fim, Planície Costeira (Figuras 2 e 3). O compartimento denominado Planalto subdivide-se em duas distintas morfologias, uma classificada como superfície de morros, com altitudes entre 900 a 700 metros e declividade média de 15 a 25° e, próximo à Serra do Mar, classificada como uma superfície de borda de planalto, onde detecta-se a presença de espigões e cristas condicionadas a lineamentos de falhas (CRUZ, 1974). Evidencia-se os escorregamentos, as corridas de massa e processos de erosão superficial nas Encostas de Planalto, onde torna-se possível encontrar depósitos de tálus e colúvios generalizados. Neste compartimento acentua-se a existência de elevadas declividades, geralmente superiores a 35°. Tanto no Planalto, como em suas encostas, são localizadas falhas e fraturas geomorfologicamente importantes e responsáveis pela configuração do relevo da região.

Figura 2: Mapa Hipsométrico da área de estudo

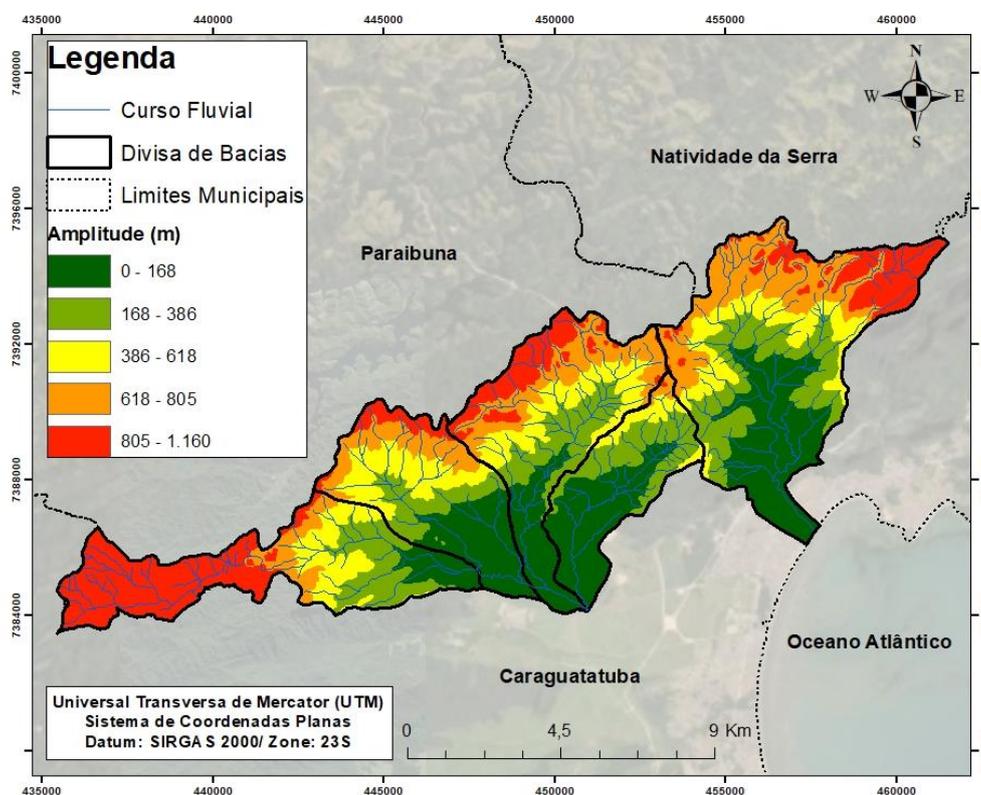
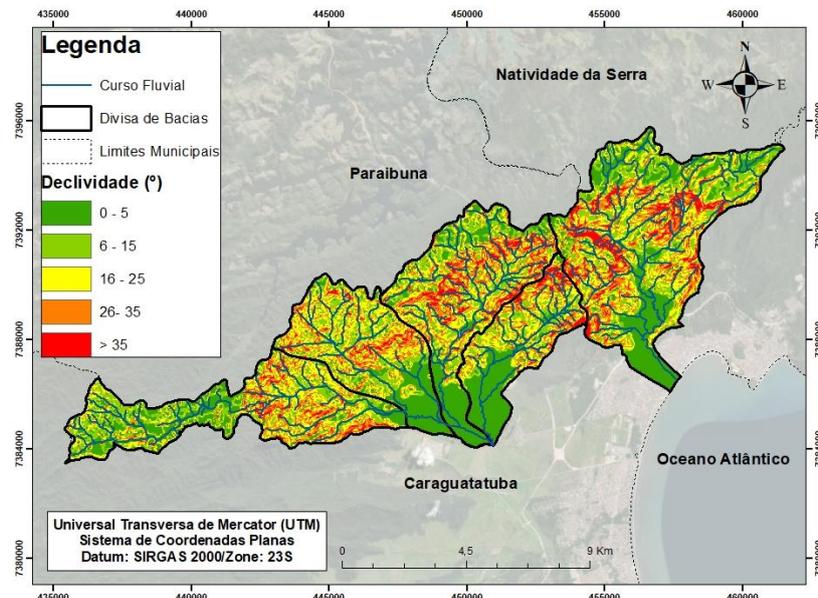
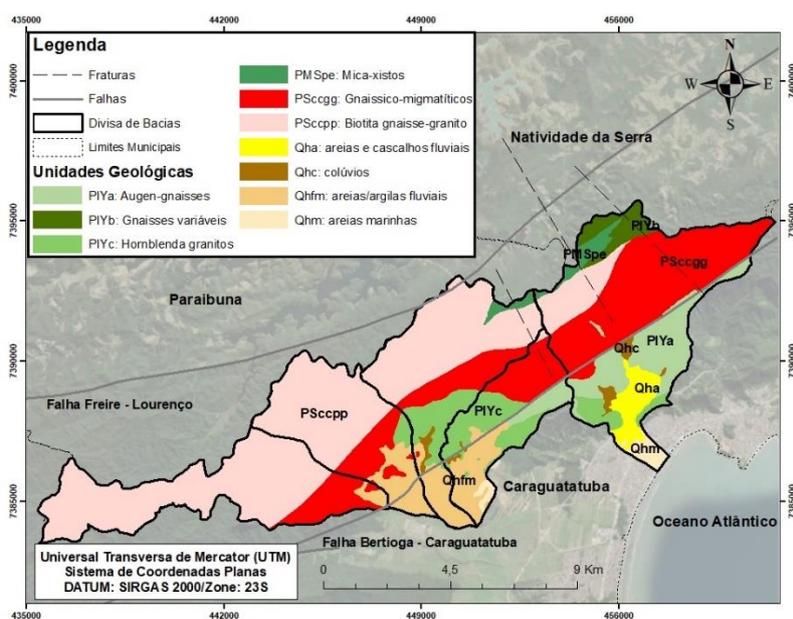


Figura 3: Mapa de Declividade da área de estudo



Com relação a geologia da área de estudo (Figura 4), a maior parte é constituída por rochas do Proterozóico, do denominado Complexo do Paraibuna. Dentre estas, destacam-se os quartzitos com alternância rítmica de paragneisses, os gnaisses de feições texturais e composicionais variadas, e, os biotita – granito gnáissico de diferentes texturas. Há ainda, em menor proporção e limitadas a folha de Caraguatatuba, rochas gnáissicas – migmatíticas e parametamórficas do Complexo Costeiro da Era Arqueana. Por fim, são encontrados na Planície Costeira, os sedimentos inconsolidados do Quaternário, destacando-se areias, siltes e argilas de deposição fluvial, areias de deposição praial e, areias quartzosas e argilas de deposição marinha.

Figura 4: Mapa Geológico da área de estudo



2.3 Clima

O Litoral Norte é conhecido como uma das áreas mais úmidas do país, devido às águas superficiais abundante rede de drenagem densa e contínua, somado ao regime de chuvas torrenciais, de alta intensidade, com máximas entre 100 a 200 mm em 24 horas e 40 a 50 mm por hora, com ausência de estação seca bem definida (DIAS e GALVANI, 2012). Associadas às escarpas da Serra do Mar, estas características resultam em vários eventos de dinâmica superficial, como os escorregamentos e corridas de detritos generalizados ocorridos em março de 1967.

O município de Caraguatatuba, especificamente, apresenta uma menor variabilidade de precipitação em relação aos demais municípios, devido a sua posição geográfica mais recuada, que ameniza a relação da circulação atmosférica com a orografia, resultando em sombras de chuvas (TAVARES et al., 2004). Sua precipitação média anual é de 1758 mm apresentando grandes possibilidades de ocorrência de escorregamentos (CRUZ, 1974; VIEIRA; GRAMANI, 2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Parâmetros de Entrada

3.1.1 Topografia

Para a elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo foram utilizadas como base as Folhas Topográficas Pico de Papagaio (SF-23-Y-D-V-2, 1974) e Caraguatatuba (SF-23-Y-D-VI-1, 1974), ambas na escala 1:50.000 e fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em formato *raster*. Estas folhas, foram georreferenciadas no *software ArcGis 10.4* com o uso da ferramenta Georreferencing e, utilizando-se da projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) - datum SIRGAS2000, (zona 23S).

Após o georreferenciamento, foi realizada a vetorização das curvas de nível, pontos cotados, hidrografia e rodovias que compreendem a área de estudo. Partindo desta vetorização e utilizando-se da ferramenta de interpolação “*Topo to Raster*” da extensão 3D *Analyst*, foi gerado o MDE, mapa-base para aplicação dos modelos computacionais. O Mapa de Declividade, gerado com base no MDE, foi elaborado por meio da ferramenta “*Slope*” do menu “*Raster Surface*” da extensão 3D *Analyst Tools* e foi subdividido em intervalos de 5 classes (0 -5°; 6-15°, 16-25°. 26-35°, >35°) representando de forma satisfatória as declividades da área de estudo (GABELINI, 2017).

Com relação às cicatrizes de escorregamento, estas foram determinadas com base na ortorretificação das fotografias áreas com o auxílio dos *softwares Corel Photo Paint, ArcGis 10.4 e ENVI*. Inicialmente ajustaram-se o brilho, contraste e saturação das imagens para melhor visualização das feições e, em seguida, selecionaram-se os pontos de controle com coordenadas UTM reconhecidos no *Basemap* do *software ArcGis*. Os pontos de altimetria foram provenientes dos dados *SRTM* da Embrapa e lidos também no *software ArcGis*. Uma vez que foram distribuídos os pontos amostrais pela fotografia aérea, realizou-se a ortorretificação com inserção dos parâmetros da câmera e voo utilizados no levantamento. As imagens ortorretificadas geradas foram inseridas no *software ArcGis* e comparadas com o mapa do *Basemap*, de modo a verificar a compatibilidade entre as duas imagens. Em seguida, realizou-se a fotointerpretação com digitalização em tela das feições de escorregamento, delimitando as cicatrizes por meio de *shapefiles* do tipo polígonos, separando aquelas que se referem a processos de escorregamentos de outras

feições como por exemplo processos erosivos e deposição de corridas de detritos ao longo da drenagem.

3.1.2 Parâmetros Geotécnicos

Admitindo-se que a região de análise das bacias Santo Antônio, Ribeirão da Aldeia, Canivetal, Divisa e Pau D'alto encontram-se predominantemente sob o domínio de rochas graníticas e gnáissicas, apresenta-se na Tabela 1 um compilado de parâmetros geotécnicos obtidos na região de estudo por diferentes autores. O valor médio destes parâmetros, foi utilizado como dados de entrada na simulação dos modelos SHALSTAB e SINMAP. Ressalta-se que por tratar-se de um modelo probabilístico o SINMAP admitiu que o valor médio fosse variado em +/-20%.

Tabela 1: Parâmetros geotécnicos de solos da Serra do Mar

| | | | | Solo Saturado | | |
|-------------------------|----------|----------------|--------------|-------------------------------|------------|-------------|
| Autores | Solo | Textura | Profundidade | ρ_s (kg/m ³) | c (kPa) | ϕ (°) |
| Wolle e Carvalho (1989) | Residual | Areno-argilosa | 1 m | 1.820 | 1,0 | 36,0 |
| Wolle e Carvalho (1994) | | | | 1.710 | 1,0 | 34,0 |
| Amaral Junior (2007) | | | | 1.700 | 4,5 | 42,0 |
| Mendes (2008) | | | | 1.750 | 10,0 | 31,6 |
| Média | | | | 1.745 | 4,1 | 35,9 |

3.2 SHALSTAB

O SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Model*) é um modelo determinístico baseado na combinação de encosta infinita e modelos hidrológicos de estado estacionário (*steady-state*). O SHALSTAB é integrado ao GIS (Software SAGA GIS), no qual os valores da área de contribuição das redes de drenagem, elevação e declividade são calculados usando o modelo digital de elevação (MDE) e a esses valores são atribuídos pixels. A Equação final do modelo SHALSTAB é representada por:

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

Nesta Equação 1, considera-se como parâmetros de entrada, ou seja, o usuário deve fornecer as variáveis c (coesão – kPa); ϕ (ângulo de atrito interno - °); ρ_s (peso específico do solo – kg/m³); z (espessura do solo – m) e g (aceleração gravitacional –m/s²). As outras

variáveis (a , b e θ) são extraídas diretamente do MDE fornecido, sendo a a área de contribuição que drena através do comprimento do contorno b em uma declividade θ . Com isso, o SHALSTAB classifica o terreno como sendo uma função de uma razão hidrológica (q/T) necessária para a instabilização, onde q representa a taxa de recarga expressa pela chuva e T é a transmissividade do solo. Dietrich e Montgomery (1998) propuseram sete classes de estabilidades (Tabela 2), das quais 5 estabelecem correlação com a função q/T .

Tabela 2: Classes de Estabilidade do modelo SHALSTAB

| Intervalo log (q/T) | Classes de Estabilidade |
|-----------------------------|--|
| Estável | Incondicionalmente estável e saturado |
| $> -2,2$ | Incondicionalmente estável e não-saturado |
| $-2,5$ a $-2,2$ | Estável e não-saturado |
| $-2,8$ a $-2,5$ | Instável e não-saturado |
| $-3,1$ a $-2,8$ | Instável e saturado |
| $< -3,1$ | Incondicionalmente instável e não-saturado |
| Incondicionalmente instável | Incondicionalmente instável e saturado |

3.3 SINMAP

O *Stability Index Mapping* - SINMAP, foi desenvolvido por Pack et al. (1998), e trata-se de um modelo físico probabilístico que tem como base o cálculo da probabilidade de uma área ser estável à ocorrência de escorregamentos translacionais rasos. É baseado no modelo de estabilidade de encosta infinita, utilizando-se da superfície topográfica no cálculo do fluxo de água em cada ponto ou célula da bacia, admitindo-se que o limite hidrológico sub-superficial é paralelo à superfície do terreno e assumindo que os parâmetros de resistências, condutividade hidráulica e espessura do solo são constantes por toda a região (NERY, 2011).

A classificação quanto à estabilidade do terreno é obtida a partir da entrada de dados topográficos, da área específica da bacia, propriedades dos materiais (coesão, peso específico) e dados climáticos e hidrológicos (MICHEL et al., 2014). O modelo não requer parâmetros de entrada numericamente precisos e aceita uma margem de valores que representam essa incerteza (PACK et al., 2001). A formulação final que rege o SINMAP é representada na Equação 2.

$$FS = \frac{c_a + \cos\theta \left\{ 1 - \text{Min} \left(\frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \text{sen} \theta}, 1 \right) \cdot r \right\} \text{tg} \phi}{\text{sen} \theta} \quad (2)$$

Onde c_a representa o valor de coesão e o r representa a relação entre a densidade da água e do solo úmido. Alguns valores de entrada do SINMAP são descritos em termos de limites máximo e mínimo, como por exemplo a relação T/q (m), c_a e ϕ (°). No caso de ρ_s , é utilizado o seu valor médio, presente na Tabela 1. As demais variáveis, assim como no SHALSTAB, advém do MDE.

O resultado primário do SINMAP é definido como fator de segurança (FS), que é um valor numérico usado para classificar a estabilidade do terreno em cada *grid* da área de estudo, variando entre 0 (mais instável) e 1 (menos instável) (PACK et al., 2001; NERY, 2011; MICHEL et al., 2014) (Tabela 3).

Tabela 3: Classes de Estabilidade do Modelo SINMAP

| Índice de Estabilidade (SI) | Classe de Estabilidade |
|-----------------------------|------------------------|
| $>1,5$ | Estável |
| $1,5 > SI > 1,25$ | Moderadamente estável |
| $1,25 > SI > 1,0$ | Quase estável |
| $1,0 > SI > 0,5$ | Limite inferior |
| $0,5 > SI > 0$ | Limite superior |
| $0 > SI$ | Instável |

3.4 Desempenho dos Modelos

A maior eficiência e aplicabilidade de um modelo ocorre quando o inventário de cicatrizes de escorregamentos coincide com as áreas classificadas como instáveis (DIETRICH et al., 2001; MICHEL et al., 2014).

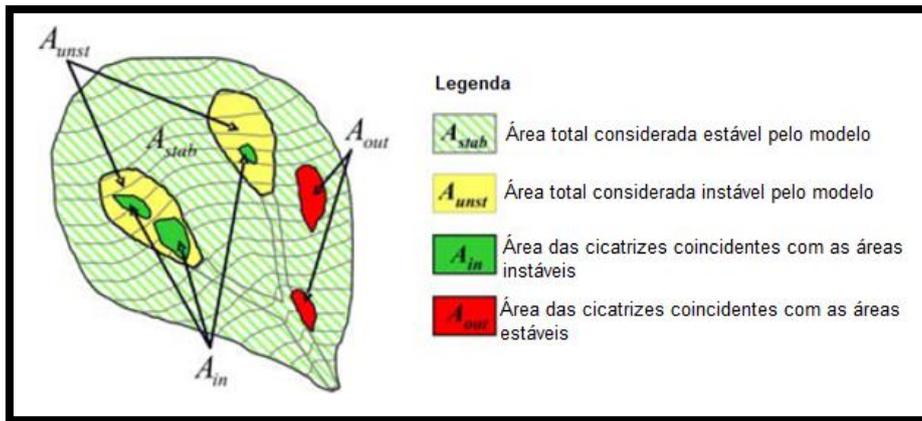
No entanto, a definição do modelo que melhor represente a área de estudo a partir da coincidência espacial entre áreas instáveis e cicatrizes de escorregamentos pode ser muito subjetiva, tornando-se necessária uma análise mais criteriosa. Sendo assim, utilizou-se neste trabalho o método da taxa de sucesso e erro proposto por Sorbino et al. (2010), conforme Figura 5.

Neste método, a eficiência dos modelos se dá por meio de dois índices: índice de sucesso (SuI) e índice de erro (ErI). SuI (Equação 3) representa a relação entre a somatória da área média das cicatrizes coincidentes em áreas instáveis (A_{in}) dentro da área total considerada como instável pelo modelo (A_{unst}); enquanto que, ErI (Equação 4) é a relação entre a somatória da área média das cicatrizes ocorridas em áreas consideradas estáveis (A_{out}), dentro da área total considerada estável pelo modelo (A_{stab}).

$$SuI = \frac{A_{in}}{A_{unst}} \cdot 100 \quad (3)$$

$$ErI = \frac{A_{out}}{A_{stab}} \cdot 100 \quad (4)$$

Figura 5: Esquemática do Método da Taxa de Sucesso e Erro



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 SHALSTAB

A Figura 6 e a Tabela 4 mostram os resultados da simulação feita pelo SHALSTAB, identificando a presença das 7 classes de estabilidade propostas por Dietrich e Montgomery (1998). A maioria das áreas classificadas geomorfologicamente como planícies foram consideradas estáveis pelo modelo, mesmo em condições de solo saturado. Observa-se também, que áreas dadas como instáveis pelo modelo, concentram-se principalmente nas escarpas da Serra do Mar e, principalmente, nas bacias Santo Antônio, Ribeirão Aldeia e Canivetal.

Figura 6: Mapa de Susceptibilidade gerado pelo SHALSTAB

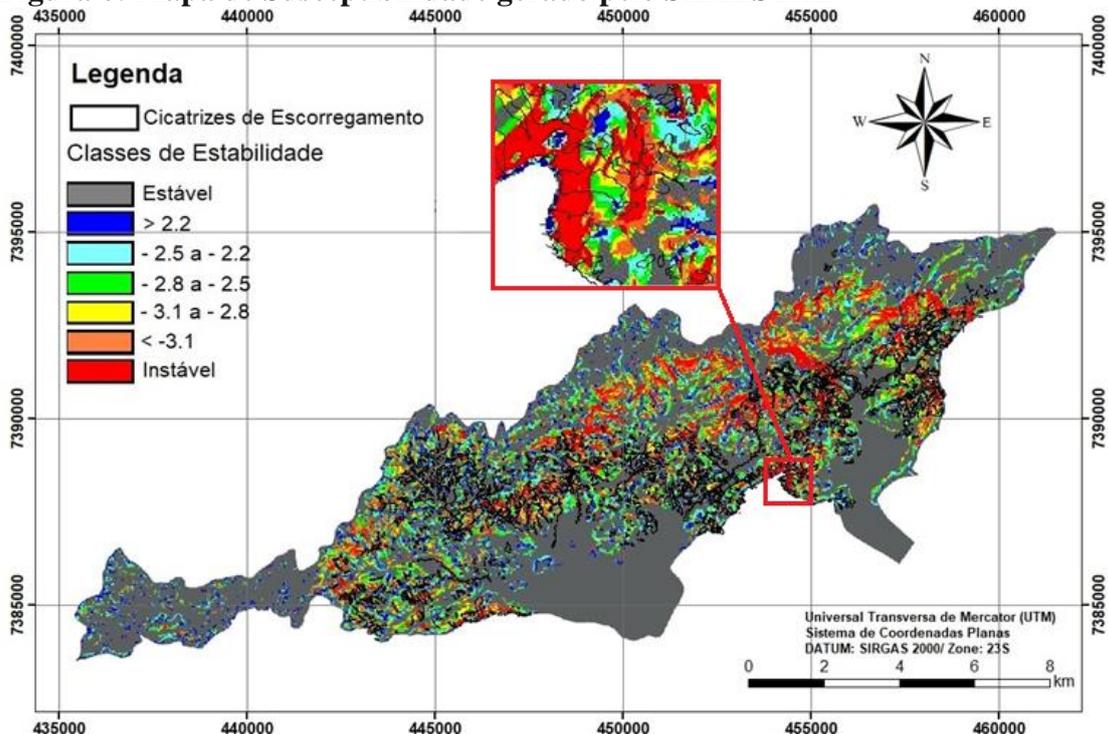


Tabela 4: Classes de Estabilidade obtidos com o SHALSTAB

| Classes | Área km² | Área (%) | Número de Cicatrizes | Cicatrizes (%) | % Cicatrizes / % Área |
|------------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Instável | 8,9 | 9,8 | 140 | 10 | 1,02 |
| log q/T < -3,1 | 6,6 | 7,3 | 170 | 12,1 | 1,65 |
| -3,1 < log q/T < -2,8 | 6,5 | 7,1 | 130 | 9,2 | 1,41 |
| -2,8 < log q/T < -2,5 | 7,2 | 7,9 | 294 | 20,9 | 2,64 |
| -2,5 < log q/T < -2,2 | 8,4 | 9,3 | 180 | 12,8 | 1,35 |
| log q/T > -2,2 | 6,1 | 6,7 | 91 | 6,5 | 0,95 |
| Estável | 47,2 | 51,9 | 400 | 28,5 | 0,54 |
| Total | 90,9 | 100 | 1405 | 100 | - |

Observa-se que aproximadamente 50% da área total de estudo enquadra-se em zona estável, dado pela presença de planícies nas porções ao sul dos contornos das bacias hidrográficas. Ressalta-se que dentre o restante da porcentagem, a maior fração (aproximadamente 10%) foi classificada como área instável, correlacionando-se com zonas de alta declividade, comprovando a importância do fator declividade para a modelagem de áreas susceptíveis a escorregamentos. Estudos de Lopes (2006) e Vieira (2007) sobre escorregamentos rasos na Serra do Mar (SP) destacaram a ocorrência destes movimentos em declividades entre 30 a 40°, tornando-os, portanto, terrenos mais susceptíveis.

Segundo Gabelini (2017), a menor concentração de cicatrizes em áreas com declividade maior que 45° deve-se ao fato de que estas regiões se enquadram em regiões de bordas do planalto, com elevações maiores que 800 m, caracterizadas pela presença de paredões rochosos com profundidade de solo ausente ou muito raso, tornando os processos de escorregamento mais escassos se comparados a queda de blocos.

Com base na Tabela 4, ponderam-se ainda algumas observações, tais quais: embora o número de cicatrizes verificadas em áreas estáveis seja elevado (400 cicatrizes), estas encontram-se em uma área que representa aproximadamente 52% da área total analisada, ou seja, em média encontram-se 8 cicatrizes por km² considerado estável. Paralelo a esta análise, têm-se que a área classificada como instável, cuja área representa 5 vezes menos a da área estável, possui 140 cicatrizes, correspondendo a aproximadamente 16 cicatrizes por km² de área instável.

Analisando a última coluna presente na Tabela 4, apresenta-se a correlação entre porcentagem de cicatrizes de escorregamento por porcentagem de área de cada classe de estabilidade existente e, com isso, são indicadas em quais classes ocorreram maior número de escorregamentos. Desse modo, os valores desta razão maiores que 1,

representam as classes com maior incidência de escorregamentos e, as menores que 1, as classes com menor incidência de escorregamentos. Têm-se no modelo SHALSTAB que a maior coincidência espacial entre as cicatrizes de escorregamento foi estabelecida na classe intermediária, cuja relação q/T varia entre -2,8 e -2,5, seguida pela classe de $q/T < -3,1$. Ressalta-se que ambas são classificadas de acordo com o modelo, como classes instáveis.

Sendo assim, observa-se que embora o modelo SHALSTAB tenha classificado muitas cicatrizes em zonas estáveis, estas encontram-se menos concentradas do que se comparadas as zonas instáveis, dadas principalmente pelo valor de área de localização.

4.2 SINMAP

O Mapa de Susceptibilidade obtido pelo SINMAP (Figura 7) resultou em uma classificação de 6 áreas de estabilidade (Tabela 5) diferentes ao longo das 5 bacias hidrográficas estudadas. Devido ao fato de as Equações de ambos os modelos não apresentarem grandes diferenças, os resultados das simulações foram similares. De maneira análoga ao SHALSTAB, o SINMAP caracterizou áreas com declividade acentuada como sendo as mais instáveis.

Figura 7: Mapa de Susceptibilidade gerado pelo SINMAP

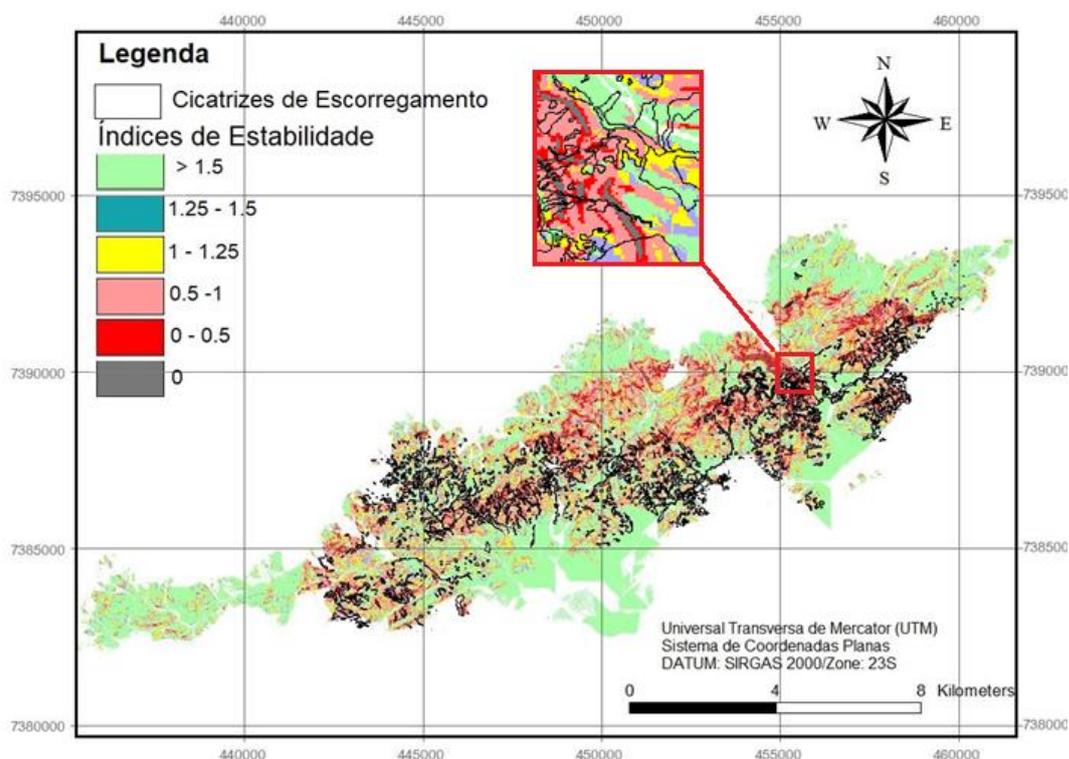


Tabela 5: Classes de Estabilidade obtidos com o SINMAP

| Classes | Área (km ²) | Área (%) | Número de Cicatrizes | Cicatrizes (%) | % Cicatrizes / % Área |
|------------------------------|-------------------------|----------|----------------------|----------------|-----------------------|
| Estável | 40.5 | 44.6 | 300 | 21.3 | 0,47 |
| 1,25 < SI < 1,5 | 9.4 | 10.3 | 170 | 12.0 | 1,16 |
| 1 < SI < 1,25 | 13.0 | 14.3 | 241 | 17.1 | 1,19 |
| 0,5 < SI < 1 | 22.0 | 24.2 | 573 | 41.0 | 1,70 |
| 0 < SI < 0,5 | 5.1 | 5.6 | 104 | 7.4 | 1,32 |
| Instável | 0.9 | 0.9 | 17 | 1.2 | 1,33 |
| Total | 90.9 | 100 | 1405 | 100 | - |

A maioria das cicatrizes de escorregamento (41%) coincidem com a classe considerada como instável ($0.5 < SI < 1$). Com relação a área total analisada, 40,5% encontram-se em zonas estáveis, razão esta novamente comprovada pela presença de planícies no sul das bacias selecionadas.

Observa-se ainda, que os núcleos caracterizados como instabilidade crônica ($SI < 0$) correlacionam-se com as encostas convexas presentes na área de estudo. Segundo Souza (2014), as rochas cristalinas, principalmente granitos e gnaisses, sob condições de clima úmido, geram morros de vertentes predominantemente convexas. Apesar desta configuração de vertente não ser a mais favorável para a ocorrência de escorregamentos (Fernandes e Amaral, 1996), as encostas convexas aliadas a formas mais verticalizadas, apresentam-se escarpadas, com elevadas altitudes e altas declividades, fazendo com que a intensa pluviosidade as torne bastante propícias a escorregamentos (SOUZA, 2014).

Analisando os dados apresentados na tabela 5, faz-se a correlação entre o número de cicatrizes encontradas para cada classificação. Têm-se um total de 300 cicatrizes na classe considerada estável pelo modelo SINMAP, no entanto, essas cicatrizes encontram-se em uma área de 40,5 km², configurando-se em média, 7 cicatrizes por km² de área analisada. Com relação a área considerada instável, têm-se apenas 1,2% de cicatrizes com relação ao total, mas dada a ínfima área ocupada por essa classe, a média torna-se de 17 cicatrizes a cada km² de área instável. Agrupando-se, ainda, todas as classes instáveis ($SI < 1$), têm-se em média 25 cicatrizes por km², *versus* 11 cicatrizes por km² no agrupamento das classes restantes (consideradas estáveis).

Além disso, a Tabela 5 também correlaciona a porcentagem de cicatrizes de escorregamento e a porcentagem de área de cada classe de estabilidade existente. Com isso, são indicadas as classes em que foram encontrados o maior número de escorregamentos, e, neste caso, a maior coincidência espacial entre as cicatrizes de escorregamento foi apresentada pelo Índice de Estabilidade que varia entre 0,5 e 1 e a menor, na classe considerada estável, cuja relação obtida foi de 0,47.

4.3 Taxa de Sucesso e Erro

Com base nos resultados obtidos com as simulações do SHALSTAB e SINMAP, são apresentadas as análises comparativas dos modelos (Tabela 6). Para tal, no SINMAP, foram agrupados os valores referentes as classes cujo SI apresentou resultado menor que 1 e, com essas calculou-se os valores de *SuI* e *ErI*. No caso do SHALSTAB, as classes instáveis e cujos $\log q/T < -2,5$ foram unidas em uma única só classe para posterior cálculo.

Tabela 6: Índices de Sucesso e Erro (SINMAP e SHALSTAB)

| | SINMAP | SHALSTAB |
|------------------------------------|--------|----------|
| Índice de Sucesso (SuI) (%) | 12,40 | 10,0 |
| Índice de Erro (ErI) (%) | 5,64 | 7,0 |
| Relação SuI/ErI | 2,20 | 1,43 |

De acordo com o proposto por Sorbino et al. (2010), o maior valor da relação *SuI/ErI* indica qual modelo possui melhor performance. Com base na Tabela 6, obteve-se que esta relação foi de 2,20 e 1,43 para os modelos SINMAP e SHALSTAB, respectivamente. Estes valores indicam que o modelo SINMAP obteve uma melhor performance para a área de estudo na escala 1:50.000 do que o modelo SHALSTAB.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo comparou dois modelos de análise de estabilidade (SHALSTAB e SINMAP), através do mapeamento de áreas susceptíveis ou não a ocorrência de escorregamentos em 5 bacias hidrográficas do município de Caraguatatuba (Santo Antônio, Canivetal, Pau d'Alho, Ribeirão Aldeia e Divisa). Os resultados apresentaram-se satisfatórios e pouco divergentes diante de ambos os modelos, no entanto, concluiu-se que, devido ao maior valor obtido com relação aos índices de sucesso e erro (2,20), o modelo SINMAP apresentou melhor performance na área de estudo.

Apesar de superestimar áreas instáveis ao longo das bacias, o modelo representou melhor coincidência espacial das cicatrizes se comparado ao SHALSTAB. Tratando-se de uma área como a Serra do Mar, com alta incidência de escorregamentos, grandes obras de engenharia e núcleos populacionais, opta-se por aplicar o SINMAP em uma escala de trabalho menor, como por exemplo 1:50.000, realizando uma macro delimitação de áreas instáveis. Considerando o modelo SHALSTAB, sugere-se, assim como em trabalhos de Guimaraes et al., 2004, Santos, 2015, Riffel et al., 2016, Prietro et al., 2017 e Rosolem et al., 2017, que ele seja aplicado em escalas maiores, como por exemplo, 1:10.000 para uma melhor delimitação *in loco*, de modo a evitar superestimações dos resultados.

6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.28, n.2, p. 135-150, 1998.

ALVIOLI, M.; BAUM, R. L. Parallelization of the TRIGRS model for rainfall-induced landslides using the message passing interface. **Environmental Modelling and Software**. 2016.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: **CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS – COBRAE** - Anais. Rio de Janeiro, nº 1, p.721-733, 1992.

AUGUSTO FILHO, O. **Carta de risco de escorregamentos quantificada em ambiente de SIG como subsídio para planos de seguro em áreas urbanas: um ensaio em Caraguatatuba (SP)**. 2001. 166 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.

Bueechi, E., Klimeš, J., Frey, H. et al. Regional-scale landslide susceptibility modelling in the Cordillera Blanca, Peru—a comparison of different approaches. *Landslides* 16, 395–407 (2019).

CERRI, R.; REIS, F.; GRAMANI, M.; GABELINI, B.; ZAINÉ, J.; SISTO, F.; GIORDANO, L. Análise da Influência de Atributos Fisiográficos e Morfométricos na Definição da Suscetibilidade de Bacias Hidrográficas a Ocorrência de Corridas de Massa. **Geologia USP - Serie Científica**. 2018.

CORREA, C.V.; REIS, F.; GIORDANO, L.; CERRI, R.; CHAVES, C.; GABELINI, B. Movimentos de massa na região de Caraguatatuba e São Sebastião (SP) entre 1967 a 2011: utilização de cicatrizes de escorregamento como subsídio a estudos de retro-análise. In: **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, p.4174-4184. 2017

CRUZ, O. **A Serra do Mar e o Litoral na área de Caraguatatuba-SP: contribuição à geomorfologia litorânea tropical**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo (USP), 1974.

Dias dos Santos, D., & Galvani, E. (2012). CARACTERIZAÇÃO SAZONAL DAS PRECIPITAÇÕES NO MUNICÍPIO DE CARAGUATATUBA-SP, ENTRE OS ANOS DE 1943 A 2004. *REVISTA GEONORTE*, 3(8), 1196.

DIETRICH, W.E.; BELLUGI, D.; ASUA, R. Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management. In: WIGMOSTA, M.S.; BURGESS, S.J. (Eds.) **Land use and watersheds: human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas**. AGU, Washington DC, v. 2, p. 195–227, 2001.

DYKES, A.P. Weathering-limited rainfall-triggered shallow mass movements in undisturbed steepland tropical rainforest. **Geomorphology**, v.46, p. 73-93, 2002.

FERNANDES, N. F. e AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. (Ed.). *Geomorfologia e meio ambiente*. Rio de Janeiro 1996. p.123-194.

Fernandes, N.F., Guimaraes, R.F., Gomes, R.A.T., Vieira, B.C., Montgomery, D.R., Greenberg, H., 2004. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. *Catena*, 55, 163-181.

FIORI, A. P. Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas. **Boletim Paranaense de Geografia**, n. 43, p. 7-24, 1995.

GABELINI, B.M. **Suscetibilidade a escorregamentos na região entre Caraguatatuba e São Sebastião (SP): análise fisiográfica e quantitativa**. 2017. 121 f. .Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente), IGCE – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Rio Claro, 2017.

GRAMANI, M.F. **Caracterização geológica-geotécnica das corridas de detritos (“Debris Flows”) no Brasil e comparação com alguns casos internacionais**. 2001. 372f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Solos) – EPUSP - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido**. [S.l.]: São Paulo: IPT (IPT) - Publicação, 1080, 1976.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Editora da USP, p. 216, 1984.

Guimarães, R.F., Montgomery, D.R., Greenberg, H.M., Fernandes, N.F., Gomes, R.A.T., Carvalho Júnior, O.A., 2003. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology*, 69, 99-108.

R. F. Guimaraes, O. A. de Carvalho, R. A. T. Gomes and N. F. Fernandes, "Comparative analysis of the SHALSTAB model from 1:10,000 and 1:50,000 scales," IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, AK, 2004, pp. 1307-1309 vol.2.

GUZZETI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslides hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, v. 31, p. 181-216, 1999.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Programa Serra do Mar**: levantamentos básicos nas folhas de Santos e Riacho Grande, Estado de São Paulo. Anexo A – Estudos geológicos e geomorfológicos. São Paulo, Relatório 23.394, v. 2, 120 p., 1986

Lazzari, M.; Piccarreta, M. Landslide Disasters Triggered by Extreme Rainfall Events: The Case of Montescaglioso (Basilicata, Southern Italy). *Geosciences* 2018, 8, 377.

LOPES, E. S. S.; RIEDEL, P. S; BENTZ, C. M.; FERREIRA, M. V. Calibração e Validação do índice de estabilidade de encostas com inventário de escorregamentos naturais na bacia do rio da onça na região de serra do Cubatão, SP. **Revista Geociências**. v. 26, n.1, p. 83-95. 2007.

MELO, C. M.; KOBIYAMA, M. Aplicação do modelo SHALSTAB no estudo de escorregamentos no Brasil: revisão. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19, n. 4, 1 out. 2018.

MICHEL GP, KOBIYAMA M, GOERL RF. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **J Soils Sediments**. v. 14, p. 1266–1277, 2014.

MONTGOMERY, D. R., K. SULLIVAN; M. H. GREENBERG. Regional test of a model for shallow landsliding, **Hydrological Process**, v. 12. p. 943- 955, 1998.

MONTGOMERY, D.; DIETRICH, W. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994.

MORIMITSU, K. H.; TOMINAGA, L. K. Mapeamento e Análise do perigo de escorregamento no município de Caraguatatuba. **Anais do 3 SIGMA**, 2013.

NERY, T. D. **Avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos na bacia da ultrafértil, Serra do Mar (SP)**. 2011. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

NERY, T. D. **Dinâmica das corridas de detritos no Litoral Norte de São Paulo**. 2016. 164 f. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.

Nery, T.D., Vieira, B.C., 2014. Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2, 1-15

PACK, R.; TARBOTON, D.; GOODWIN, C. The SINMAP approach to terrain stability mapping. **Proceedings of the 8th congress of the international association of engineering geology**, Vancouver, British Columbia. Canada. p. 21-25. 1998.

PACK, R.T.; TARBOTON, D.G.; GOODWIN, C.N. Assessing Terrain Stability in a GIS using SINMAP. **15th Annual GIS Conference**. Vancouver, British Columbia. February, p. 1-9, 2001.

PRIETO, C. C.; MENDES, R. M.; SIMÕES, S. J. C.; NOBRE, C. A. COMPARAÇÃO ENTRE A APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB COM MAPAS DE SUSCETIBILIDADE E RISCO DE DESLIZAMENTOS NA BACIA DO CÓRREGO PIRACUAMA EM CAMPOS DO JORDÃO - SP. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 69, n. 1, 22 jan. 2017.

RIFFEL, E. S.; CHIMELO RUIZ, L. F.; GUASSELLI, L. A. MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS A PARTIR DE MINERAÇÃO DE DADOS E DO MODELO SHALSTAB. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 68, n. 9, 16 out. 2016.

ROSOLEM, G. P. N.; ROSENFELDT, Y. A. Z.; LOCH, C.; HIGASHI, R. A. DOS R. A INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DOS PRODUTOS CARTOGRÁFICOS PARA ANÁLISE DE DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 69, n. 1, 19 jan. 2017.

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. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015, 126p.

SELBY, M. J. **Hillslope materials and process**. Oxford: Oxford University Press, 1982.

Sinarta, I.N.; Rifa'i, A.; Faisal Fathani, T.; Wilopo, W. Slope Stability Assessment Using Trigger Parameters and SINMAP Methods on Tamblingan-Buyan Ancient Mountain Area in Buleleng Regency, Bali. *Geosciences* 2017, 7, 110.

SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L. Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models. *Natural Hazards*, v. 53, p. 313–332, 2010.

SOUZA, J.M. **Características do meio físico em um escorregamento em São Pedro da Serra e suas influências na transformação da paisagem em Nova Friburgo, RJ**. 2014. Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia, 2014.

TATIZANA, C. et al. Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos na Serra do Mar, município de Cubatão. In: **Congresso Brasileiro De Geologia De Engenharia**, 5, 1987, São Paulo. Anais. São Paulo: ABGE, v.2, p.225-236, 1987.

TAVARES, R.; SANT'ANNA NETO, J.L.; TOMMASSELLI, J. T. G.; PRESSINOTTI, M. M. N.; SANTORO, J. Análise da variabilidade temporal e espacial das chuvas associada aos movimentos de massa no Litoral Norte Paulista. In: **Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais**, 2004, Florianópolis. Anais...Florianópolis: GEDN/UFSC, p. 680-696. 2004.

TOMINAGA, L. K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP**. 2009. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009.

VAN WESTEN, C. J. Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent development. In: **Landslides, Evaluation and Stabilization**. Rio de Janeiro: Taylor & Francis Group, p. 39-53, 2004.

VIEIRA, B. C.; GRAMANI, M. F. Serra do Mar: The Most “Tormented” Relief in Brazil. In: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. (Ed.). **Landscapes and Landforms of Brazil**. [S.l.]: Springer, p. 285–297, 2015.

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 –USP*, Volume 29 (2015), p. 161a 174.

WILKINSON, P. L.; ANDERSON, M.G.; LLOYD, D.M. An integrated hydrological model for raininduced landslide prediction. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 27, p. 1285–1297, 2002.

WU, W.; SIDLE, R. C. A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources. Res.* v. 31, p. 2097- 2110, 1995.