



## Utilização de diferentes derivações do modelo Shalstab como ferramenta de auxílio ao monitoramento da suscetibilidade de movimento de massa em bacias hidrográficas com presença de ativos de transmissão de energia

*Different derivations of the Shalstab model as a tool to monitor the susceptibility of mass movements in watersheds with the present of energy transmission assets*

Jéssica Gerente<sup>\*1</sup> , Edna Lindaura Luiz<sup>2</sup> , Francisco Caruso Gomes Junior<sup>3</sup> ,  
Lucas Antônio Providelo<sup>4</sup> , Guilherme Marchiori<sup>5</sup> 

<sup>1,3</sup> GISCARUSO Tecnologia & Inteligência Geográfica, Florianópolis, SC, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Geografia, Florianópolis, SC, Brasil.

<sup>4,5</sup> Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) Renováveis, Jundiaí, SP, Brasil.

E-mail: elinluiz@uol.com.br (ELL); caruso@carusojrea.com.br (FCGJ);

lucas.providelo@cpflrenovaveis.com.br (LAP); guilherme.marchiori@cpfl.com.br (GM).

\*E-mail para correspondência: jessicagerente@gmail.com

Recebido (Received): 07/04/2022

Aceito (Accepted): 25/04/2023

**Resumo:** O objetivo deste trabalho é avaliar a utilização do modelo Shalstab para realizar um diagnóstico da suscetibilidade a movimentos de massa considerando três diferentes abordagens: i) Shalstab em nível de risco (resultado da razão  $\log(q/t)$  pixel-a-pixel; ii) Shalstab em nível de risco generalizado por bacias e; iii) Chuva crítica diária necessária para deflagração de ruptura (Shalstab em termos de “q” - precipitação). A área de estudo se refere a bacias hidrográficas que intersectam uma linha de transmissão situada na Serra do Mar Paranaense e para a parametrização dos valores geotécnicos utilizados na modelagem adotou-se uma abordagem espacializada que leva em conta a variabilidade da tipologia geológica da área. As cicatrizes de movimento de massa utilizadas para validação dos resultados indicam que ambas as abordagens do modelo em nível de risco (pixel-a-pixel e generalizado por bacias) foram capazes de identificar com um bom nível de acerto as áreas mais suscetíveis. Em relação aos limiares de chuva crítica para provocar rupturas na área de estudo, precipitações acima de 100mm/dia são perigosas para muitos locais. Esse valor de precipitação é bastante comum na região, o que indica necessidade de atenção, sobretudo em momentos com configurações pluviométricas próximas a esse limiar.

**Palavras-chave:** Deslizamentos; Linhas de transmissão, Modelagem.

**Abstract:** The objective of this work is to evaluate the use of the Shalstab model to make a diagnosis of the susceptibility of mass movements considering three different approaches: i) Shalstab at risk level (log reason result (q/t) pixel by pixel; ii) Shalstab at generalized risk level by basins; iii) Daily critical rain required for burst blackout (Shalstab in terms of “q” - precipitation). The study area refers to hydrographic basins that intersect a transmission line located in the Serra do Mar Paranaense and for the parameterization of the geotechnical values used in the modeling, a spatialized approach was adopted. This approach that takes into account the variability of the geological typology of the area. The mass movement scars used to validate the results indicate that both approaches of the model at risk level (pixel by pixel and generalized by basin) were able to identify the most susceptible areas with a good level of accuracy. Regarding the critical rain in the study area, precipitations above 100mm/day are dangerous for many locations. This value of precipitation is quite common in the region, which indicates the need for attention, especially at times with rainfall configurations close to this threshold.

**Keywords:** Landslides; Transmission lines; Modelling.

### 1. Introdução

Movimentos de massa são processos geomorfológicos que podem ocasionar grandes transformações do relevo em um curto espaço de tempo. Devido a magnitude frequentemente envolvida, esses fenômenos

podem colocar em risco ativos de transmissão e distribuição de energia. Como principal consequência destaca-se a interrupção de transmissão de energia elétrica em virtude de danos na estrutura da rede por esta ser atingida pela ruptura do solo/manto de alteração das rochas ou pela passagem destes materiais ou ainda pela sua deposição em posições de relevo mais baixas. Por esse motivo, mapear a suscetibilidade a movimentos de massa das bacias em que os ativos de empresas de transmissão de energia elétrica se situam é um importante passo para mitigar os riscos.

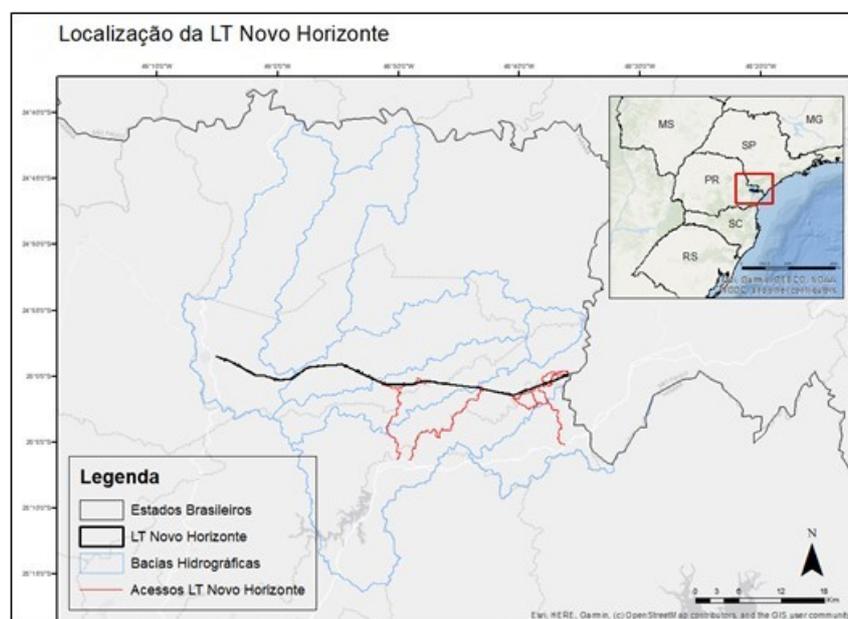
É possível notar duas frentes de pesquisa na literatura brasileira em termos de modelagem de previsão a movimentos de massa. A primeira envolve o uso de algoritmos computacionais aliados a dados pluviométricos, variáveis geomorfométricas e mapeamentos secundários (uso da terra, geologia, etc), porém, sem a utilização direta de valores geotécnicos do solo (VANACÔR; ROLIM, 2012; SOTHE *et al.*, 2017; FLORES, 2018;). Já a segunda, lança mão de modelos preditivos baseados em características geotécnicas e hidrológicas do solo combinadas com variáveis extraídas de modelos digitais de terreno (VIEIRA, 2007; MICHEL *et al.*, 2014; VIEIRA; RAMOS, 2015; RIFFEL *et al.*, 2016).

Nessa segunda frente de pesquisa, destacam-se trabalhos que utilizam o SINMAP (Stability Index Mapping), modelo preditivo estocástico, e o Shalstab (Shallow Slope Stability Model), que utiliza uma abordagem determinística. No tocante à previsão de deslizamentos, o modelo Shalstab (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994) vem sendo amplamente utilizado em aplicações localizadas no Brasil (MELO; KOBIYAMA, 2018). Diversos trabalhos comparativos entre ambos modelos destacam um maior nível de assertividade dos resultados gerados com o Shalstab para fins de identificação de áreas suscetíveis à deslizamentos (MEISINA; SCARABELLI, 2007; MICHEL, 2011; SISTO, 2018; ZAIDAN *et al.*, 2018; PAUL *et al.*, 2019;). Além disso, o Shalstab apresenta a possibilidade de estimar a suscetibilidade de uma encosta a partir de valores de chuva crítica necessária para deflagração de uma ruptura. Essa capacidade é muito interessante pensando no ponto de vista de inclusão desse modelo em abordagens operacionais de monitoramento do risco a ocorrência de movimentos de massa.

Em razão da boa performance da utilização do Shalstab em pesquisas realizadas no território nacional, o objetivo deste trabalho é avaliar a utilização desse modelo para realizar um diagnóstico da suscetibilidade a rupturas de massa (considerando uma abordagem pixel-a-pixel e outra com unidades de mapeamento para generalizações), bem como comparar diferentes cenários de chuva crítica em bacias hidrográficas que intersectam a área de estudo, levando em conta a variabilidade da tipologia geológica da área.

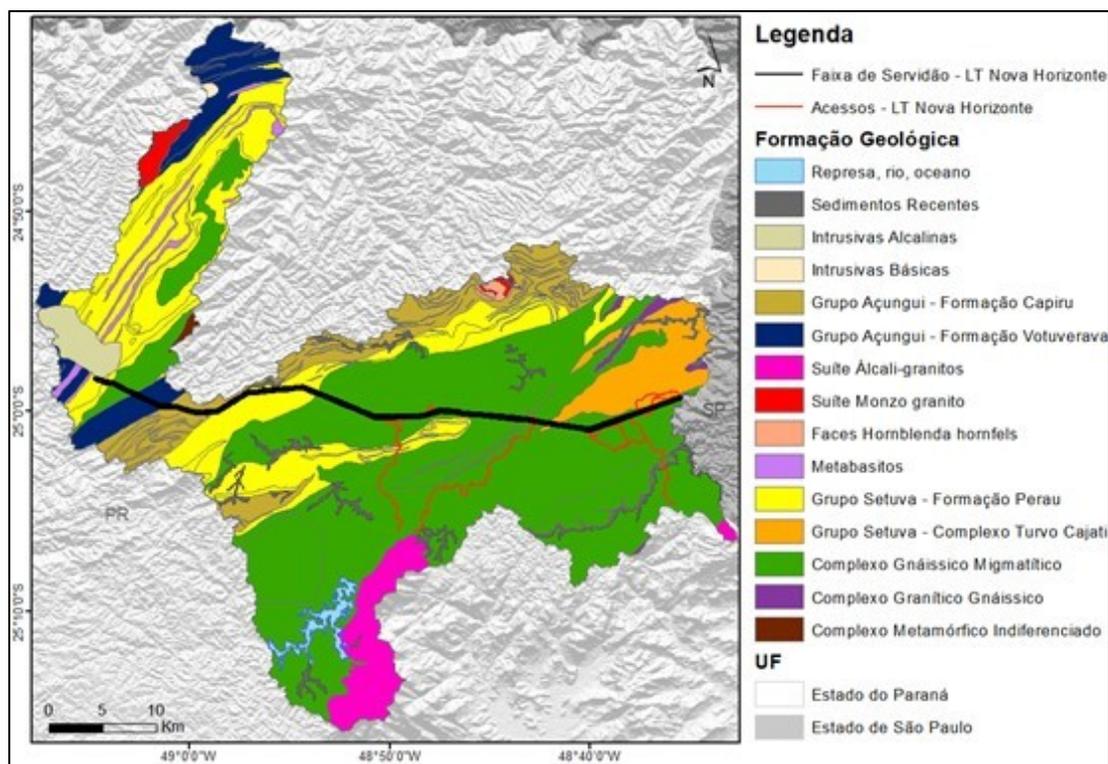
## 2. Área de estudo

A área de estudo compreende o conjunto de bacias hidrográficas que interseccionam uma linha de transmissão de 139kV de concessão da CPFL Energia, denominada LT Novo Horizonte e suas estradas de acesso, situada na Serra do Mar Paranaense (**Figura 1**). Estas bacias hidrográficas abrangem os territórios dos municípios de Adrianópolis, Tunas do Paraná, Bocaiuva do Sul e Campina Grande do Sul, na região metropolitana de Curitiba.



**Figura 1:** Localização da LT Novo Horizonte.

A geologia da área de estudo apresenta uma grande diversidade litológica (conforme pode ser verificado na **Figura 2**). A geologia da área de estudo é complexa porque os terrenos fazem parte da Faixa de Dobramento Ribeira, com últimos eventos no Brasiliano, cerca de 500 milhões de anos atrás (VIEIRA et al., 2018). Essa diversidade originou mantos de alteração com muitas variações em termos de textura, coesão, condutividade hidráulica e ângulo de atrito interno, tanto espacialmente (eixos X e Y) quanto em profundidade (eixo Z).



**Figura 2:** Formações geológicas nas bacias que intersectam a linha de transmissão. Fonte: Compilado do Mapa Geológico do Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná - ITCG (ITCG, 2020).

### 3. Base teórica – Modelo Shalstab

O Shalstab é um modelo matemático determinístico de previsão a movimentos de massa por rupturas. Ele foi criado com o objetivo de, em um ambiente computacional e georreferenciado, estimar a suscetibilidade de encostas a rupturas ocasionadas por principalmente rupturas em deslizamentos translacionais, uma vez que um de seus pressupostos teóricos é o método do talude infinito (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

O modelo de talude infinito é expresso pela seguinte Equação 1:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu).tg\varphi \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

$\tau$ = tensão de cisalhamento (kPa);

$c'$  = coesão efetiva do solo (kPa);

$\sigma$ = tensão normal ao plano de ruptura (kPa);

$\mu$ = poropressão (kPa);

$\varphi$ = ângulo de atrito interno do solo (graus).

Já o modelo hidrológico de umidade de O'Loughin, colocado em função de  $h/z$  por Montgomery e Dietrich (1994) com o intuito de representar a proporção de saturação do solo, é dada pela seguinte **Equação 2**:

$$\frac{h}{z} = \frac{Q \cdot a}{T \cdot b \cdot \text{sen } \theta} \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

$h$  = Altura da coluna d'água acima do plano de ruptura (m)

$z$  = Profundidade do solo (m)

$Q$  = Taxa de recarga uniforme (precipitação) (mm/dia)

$T$  = Transmissividade do solo (m<sup>2</sup>/dia)

$a$  = Área drenada a montante (m<sup>2</sup>)

$b$  = Comprimento de contorno unitário (m)

$\theta$  = Inclinação da encosta (graus)

Ao combinar e reescrever as equações acima, é possível chegar no modelo Shalstab, o qual pode ser implementado de modo a obter a estimativa do valor de chuva crítica (mm/dia) necessária para deflagração de uma ruptura, sendo expresso pela **Equação 3**:

$$Q = T \cdot \frac{\text{sen } \theta}{(a/b)} \cdot \left( \left( \frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \varphi} \right) + \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi} \right) \right) \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que:

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$\rho_w$  = densidade específica da água (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  = densidade do solo (kg/m<sup>3</sup>)

Importante ressaltar que para expressar o Shalstab em graus de suscetibilidade (razão  $q/T$ ), basta considerar passar a transmissividade ( $T$ ) para o outro lado da igualdade.

## 4. Materiais e métodos

Os dados para entrada utilizados nesse trabalho foram dados geotécnicos (coesão, ângulo de atrito interno, densidade real do solo, provável profundidade da superfície de ruptura), topográficos (declividade, área de contribuição) e os hidrológicos (condutividade hidráulica dos materiais, quantidade de chuva crítica).

### 4.1. Parametrização geotécnica

Dada a diversidade litológica da área de estudo, foi feito um agrupamento de tipos litológicos por unidades geológicas de acordo com a composição mineralógica daquelas litologias mais abundantes em cada unidade do Mapa Geológico do ITCG (2020). A partir dos litotipos representantes de cada unidade, foram estimadas as características dos seus mantos de alteração (textura, profundidade, etc.) sob um clima quente e úmido, como o da área de estudo. As estimativas se baseiam em conhecimento de campo e em trabalhos técnicos e científicos.

O que se observa em trabalhos científicos utilizando o Shalstab é a parametrização com base em trabalhos secundários que realizaram aferições geotécnicas em solos/mantos de alteração com características químicas e texturais semelhantes. Para fins de exploração inicial, optou-se por utilizar dados geotécnicos oriundos dos trabalhos de Bini (2020), Bernardes (2003), Silva (2003) e Vallejo *et al.* (2002), cujas características dos solos estudados nesses trabalhos se assemelham às existentes em algumas porções da área de estudo. Também foi aferida a possível profundidade da superfície de ruptura de acordo com o que se conhece sobre a espessura do manto de alteração de cada litotipo. A **Tabela 1** apresenta um resumo dos dados utilizados no modelo Shalstab.

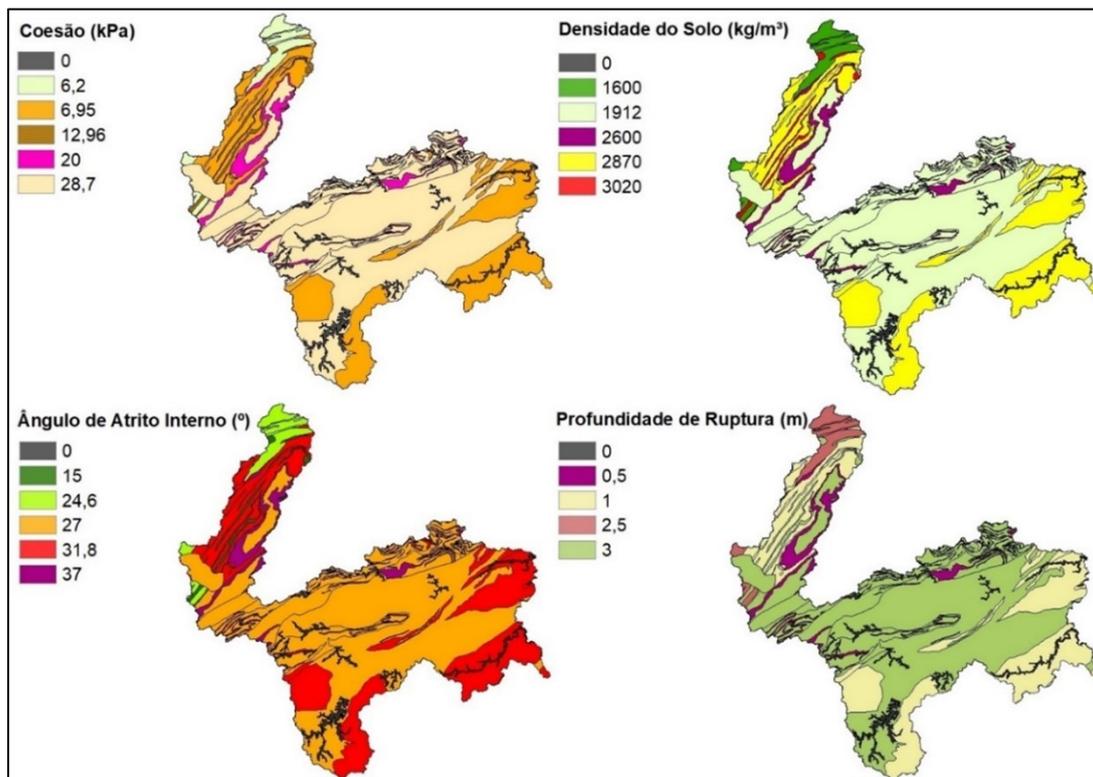
Em relação aos parâmetros da **Tabela 1**, para as rochas com presença de minerais que resultam em mantos de intemperismo com característica textural siltosa a siltico-argilosa, foram utilizados os parâmetros apresentados por Bini (2020) derivados de um manto de alteração da banda máfica de Gnaiss Granulítico, cujo valores são: i) coesão: 28,7 kPa, ii) ângulo de atrito interno: 27°, iii) densidade do solo: 1.912 kg/m<sup>3</sup>. Para as litologias que resultam em materiais arenosos ou areno-siltosos, utilizou-se os valores citados por Bini (2020) relativo ao intemperismo da banda félsica de Gnaiss Granulítico, sendo eles: i) coesão: 6,95 kPa, ii) ângulo de atrito interno: 31,8°, iii) densidade do solo: 2.870 kg/m<sup>3</sup>. Para os grupos litológicos cujas rochas originam mantos de alteração siltosos, foram utilizados os mesmos valores de Bini (2020) derivados da alteração de rochas máficas: i) coesão: 12,96 kPa, ii) ângulo de atrito interno: 15°, iii) densidade do solo:

3.020 kg/m<sup>3</sup>. Em relação aos grupos de rocha com a ocorrência de quartzitos, utilizou-se os valores medidos por Bernardes (2003): i) coesão: 20 kPa, ii) ângulo de atrito interno: 37°. O dado de densidade do solo foi obtido por meio do trabalho de Vallejo et al. (2002), sendo ele o valor de 2.600 kg/m<sup>3</sup>. Por fim, considerando os grupos de rocha com a ocorrência de calcário, utilizou-se os valores medidos por Silva (2003): i) coesão: 6,2 kPa, ii) ângulo de atrito interno: 24,6°, iii) densidade do solo: 1600 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabela 1:** Espacialização dos parâmetros geotécnicos.

Unidades Geológicas	Litotipo	Textura	Coesão	Ângulo de Atrito Interno	Densidade do Solo	Profundidade da ruptura
Complexo Gnáissico Migmatítico	Unidade Quartzo-feldspato	areno-siltosa a areno-argilosa	6.95	31.8	2870	1
Complexo Granítico Gnáissico						
Suíte Álcali-granitos						
Suíte Monzo granito						
Grupo Setuva - Formação Perau						
Grupo Setuva - Complexo Turvo Cajati						
Suíte Álcali-granitos						
Complexo Gnáissico Migmatítico	Unidade feldspato-máficos	Siltico-arenosa a argilo-arenosa	28.7	27	1912	3
Grupo Açungui - Formação Capiru						
Grupo Açungui - Formação Votuverava						
Intrusivas Alcalinas						
Faces Hornblenda hornfels						
Grupo Setuva - Formação Perau (com presença de biotita)						
Intrusivas Básicas	Unidade Máficos	siltosa a siltico-argilosa	12.96	15	3020	3
Metabasitos						
Grupo Açungui - Formação Votuverava	Unidade Calcário	Resíduos de argila de impurezas	6.2	24.6	1600	2.5
Complexo Metamórfico Indiferenciado	Unidade Quartzito	Arenosa a cascalhenta	20	37	2600	0.5
Grupo Setuva - Formação Perau (com presença de quartzitos)						
Grupo Açungui - Formação Capiru						
Grupo Açungui - Formação Votuverava						

Os dados de profundidade da superfície de ruptura foram parametrizados de acordo com os materiais presentes, sendo utilizados os seguintes valores: 0,5m, 1m, 2,5m e 3m. Esses valores foram estimados de acordo com a maior presença ou não de minerais resistentes ao intemperismo, como por exemplo, o quartzo ou feldspato alcalino, o que influencia na espessura do manto de alteração. A **Figura 3** apresenta os dados geotécnicos espacializados.



**Figura 3:** Espacialização dos valores geotécnicos.

#### 4.2. Dados topográficos

O Modelo Digital de Elevação SRTM 30m foi escolhido como dado de entrada para o modelo de previsão a movimentos de massa na presente pesquisa. Para a implementação do Shalstab, duas variáveis geomorfométricas são necessárias: Declividade e Acumulação de Fluxo (também referida como área de contribuição). A declividade foi gerada por meio da ferramenta Slope presente na plataforma ArcGIS. A área de contribuição foi gerada por meio da toolbox TauDEM (<https://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/downloads.html>).

#### 4.3. Implementação do Shalstab

Nesse trabalho optou-se por implementar a equação do SHALSTAB via linguagem de programação R. O modelo Shalstab permite a obtenção da estimativa de valores de chuva crítica necessária para tornar uma porção do terreno suscetível à deflagração de movimento de massa. Esta opção do Shalstab foi também avaliada neste trabalho de modo a ajudar a criar subsídios para a análise de cenários de risco a deslizamentos e corridas de detritos considerando diferentes valores de chuva. Conforme apresentado anteriormente, para a modelagem em termos de chuva crítica é necessário possuir o valor de transmissividade ( $m^2/dia$ ) do manto de alteração da área de estudo. Como não se possui valores medidos em campo, utilizou-se como valor de transmissividade o mesmo adotado por Mendonça (2017),  $65 m^2/dia$ , para a modelagem de chuva crítica necessária para deflagração de movimentos de massa com base no modelo Shalstab em uma porção da Serra do Mar situada no estado do Rio de Janeiro.

### 5. Resultados

A suscetibilidade a rupturas, provocando movimentos de massa do tipo deslizamentos e corridas de detritos, pode ser analisada a partir dos resultados do modelo Shalstab para área de estudo. Esta suscetibilidade foi gerada em termos de 3 cenários, considerando diferentes possibilidades de derivação do modelo: i) Shalstab em nível de risco [(resultado da razão  $\log(q/t)$ ] por pixel-a-pixel, ii) Shalstab em nível de risco generalizado por bacias e iii) Chuva crítica diária necessária para deflagração de ruptura (Shalstab em termos de “q” - precipitação).

### 5.1. Shalstab em nível de risco (q/t) pixel-a-pixel

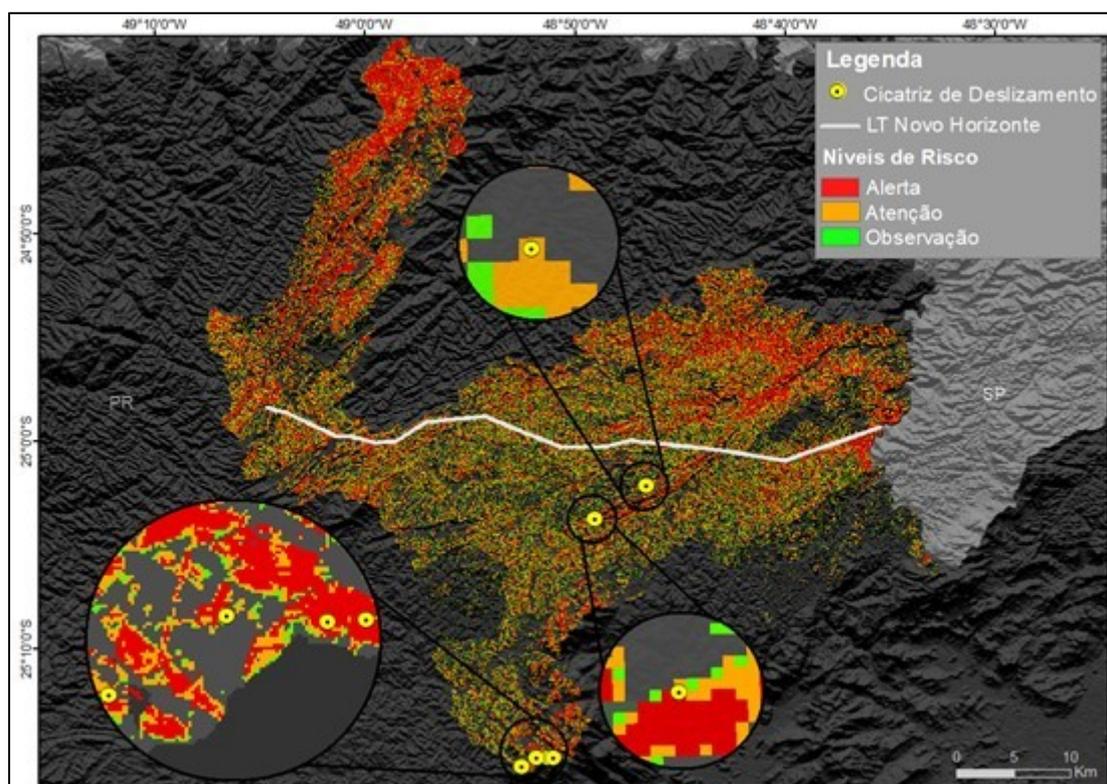
Montgomery e Dietrich (1994) propõe um sistema classificatório para os resultados do Shalstab em termos da razão  $\log(q/t)$  que se traduz em 07 (sete) classes de instabilidade do terreno. Entretanto, decidiu-se na presente pesquisa, que estas 07 classes podem causar algum nível de confusão entre os usuários do modelo de suscetibilidade (no caso desse trabalho gestores de operação e manutenção de linhas de transmissão) e por isso, elas foram agrupadas em 3 níveis de suscetibilidade: Observação, Atenção e Alerta. A **Tabela 2** apresenta os agrupamentos de níveis de suscetibilidade adotados nesse trabalho.

**Tabela 2:** Reclassificação dos valores do Shalstab.

VALORES SHALSTAB	CLASSIFICAÇÃO	RECLASSIFICAÇÃO
Instabilidade Crônica	Incondicionalmente instável e saturado	Alerta
$\text{Log } q/T < -3,1$	Incondicionalmente instável e não saturado	
$-3,1 < \text{log } q/T < -2,8$ $-2,8 < \text{log } q/T < -2,5$	Instável e saturado instável e não saturado	Atenção
$-2,5 < \text{log } q/T < -2,2$	Estável e não saturado	Observação
$\text{Log } q/T > -2,2$	Incondicionalmente estável e não saturado	-
Estável	Incondicionalmente estável e saturado	-

Fonte das duas primeiras colunas: MONTGOMERY; DIETRICH (1994)

A **Figura 4** apresenta o resultado do modelo de instabilidade com os valores reclassificados para os níveis de suscetibilidade utilizados neste trabalho.



**Figura 4:** Suscetibilidade a movimentos de massa pixel-a-pixel. Obs.: Os pixels em cinza dentro da área de estudo correspondem àqueles das classes sem atribuição de níveis de suscetibilidade.

De acordo com a **Figura 4**, é possível notar que uma significativa parte da área de estudo teve como níveis de suscetibilidade os tipos alerta e atenção. Nota-se também que a maior concentração de locais classificados como alerta se situam em áreas mais declivosas, o que mostra o grau de contribuição desta variável na configuração de uma maior suscetibilidade. Do ponto de vista geológico, estas áreas se constituem em cristas de relevo mantidas por zonas de cisalhamento e por rochas de quartzitos e xistos. Pode-se ressaltar que apesar de se atribuir maior valor de ângulo de atrito interno e, por conseguinte, de resistência a estas tipologias de rochas, elas ainda se encontram dentro dos Níveis de “Alerta” e “Atenção”, possivelmente em razão das declividades maiores em que se encontram. As rochas do Complexo Gnáissico-Migmatítico constituem a maioria dos terrenos da área de estudo, mas não apresentaram a mesma proporção de áreas perigosas a rupturas, de acordo com os resultados da modelagem.

Para a realização de uma validação do cenário apresentado pelo modelo Shlastab, foi pesquisado no acervo de imagens da plataforma *Google Earth*, cicatrizes de movimentos de massa na área de estudo. Esta busca visou a identificação de cicatrizes de movimentos de massa e quando uma cicatriz era encontrada, passava-se a analisar esta parte da área também em imagens antes de sua ocorrência.

A coordenada geográfica de um ponto no interior de cada cicatriz foi coletada e espacializada sobre o resultado obtido com o modelo Shalstab. Desta forma, foi possível identificar 6 cicatrizes de movimento de massa (**Figura 6**), sendo duas relativamente próximas a estradas de acesso à faixa de servidão da LT Novo Horizonte. As demais cicatrizes se concentram na porção de extremo sul da área de estudo. Com base nisso, foi possível notar que apenas uma cicatriz mapeada se situa em área classificada como “atenção” e todas as demais em área classificada como “alerta”. Esse fator gera indícios de que a modelagem realizada é capaz de identificar com um bom nível de acerto as áreas mais suscetíveis a sofrerem rupturas. Também demonstra que a generalização realizada na diversidade de litologias e em suas características geotécnicas e hidrológicas foi adequada.

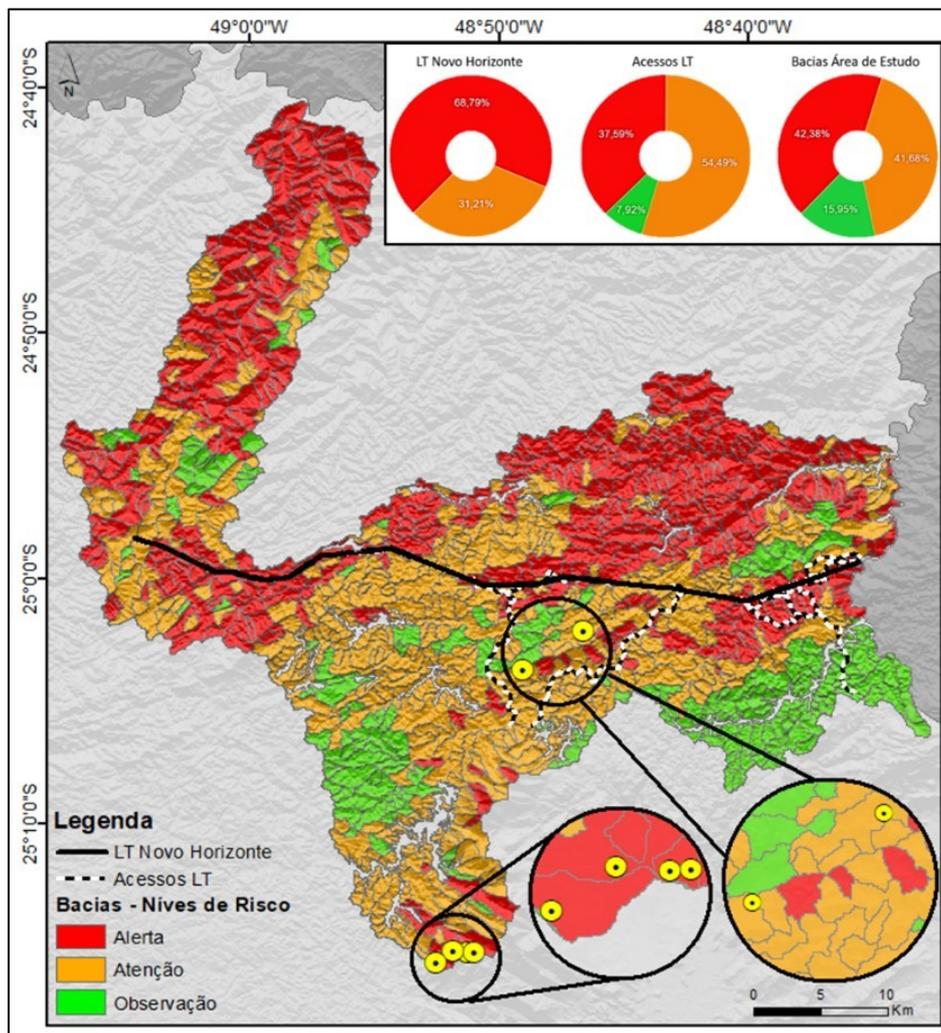
## 5.2. *Shalstab em nível de risco (q/t) generalizado por bacia*

O intuito dessa generalização foi criar unidades homogêneas para adquirirem, cada uma, nível único de suscetibilidade, bacias extraídas automaticamente com o limiar utilizado (500) a partir do SRTM de 30m. Por esta razão, tal mapa pode ser entendido como uma espécie de zoneamento de suscetibilidade. Nesse dado, ao invés da área mínima mapeada com um nível de risco ser 900 m<sup>2</sup> (considerando que o tamanho de pixel do MDT utilizado é de 30m x 30m), essa área passa ser a área das bacias.

A **Figura 5** apresenta os resultados dos níveis de risco generalizados para cada uma das bacias. Apesar dessa generalização diminuir o nível de detalhe, uma vez que torna uma área muito maior com um único valor de risco, tal dado pode ser útil para uma visualização geral e sintetizada das porções mais críticas da área de estudo.

Pode-se observar que entre a **Figura 4** e a **Figura 5**, as áreas consideradas de “Atenção” se expandiram mais do que aquelas consideradas de “Alerta”. As rochas cristalinas do Complexo Gnáissico-Migmatítico agora têm mais terrenos dentro do nível de suscetibilidade “Atenção” e o agrupamento dos pixels mostrou ainda como resultado que esta unidade geológica também contém a maior parte das áreas classificadas como “Observação”. Outra questão é que a Formação Perau tem agora mais terrenos dentro da classe “Alerta”, juntamente com os terrenos da Formação Capiru. Vale ressaltar também que das 6 cicatrizes mapeadas, 2 se sobrepuseram a bacias classificadas com o grau de risco do tipo “Atenção” e 4 (as situadas na porção sul da bacia) com o grau de risco do tipo “Alerta”.

Os gráficos presentes na porção direita superior da **Figura 5** mostram as proporções de nível de suscetibilidade a rupturas dos segmentos (bacias hidrográficas) adotados como unidade de homogeneização (mapa da **Figura 5**) de acordo com suas intersecções sobre o traçado da faixa de servidão da LT Novo Horizonte e seus acessos, bem como a proporção geral de nível de suscetibilidade por bacias. De acordo com estes gráficos, é possível notar que 68,79% do traçado da LT Novo Horizonte se encontra sobre segmentos classificados com o nível de suscetibilidade do tipo “Alerta” e 31,21% do total do traçado sobre o nível do tipo “Atenção”. Já em relação às estradas de acesso, 54,49% do total de suas extensões se encontram em polígonos com nível de suscetibilidade do tipo “Atenção”, 37,59% sobre polígonos do tipo “Alerta” e 7,92% sobre polígonos do com nível “Observação”. Também foram analisados os valores gerais dos níveis de suscetibilidade da área de estudo como um todo: 42,38% encontra-se com o nível de suscetibilidade “Alerta”, 41,68% com o nível “Atenção” e 15,95% com o nível “Observação”.

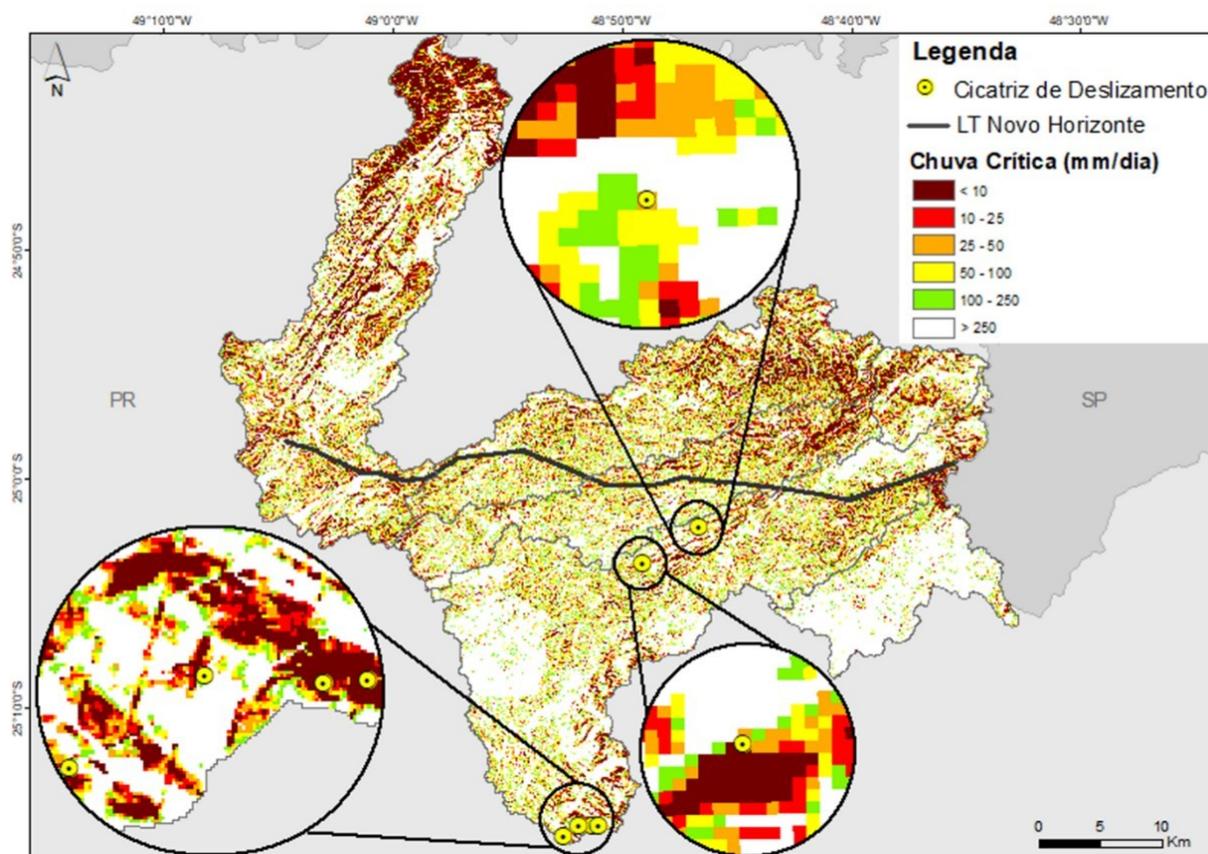


**Figura 5:** Suscetibilidade a movimentos de massa generalizado por bacias com gráfico de proporções do zoneamento de risco na intersecção com a LT Novo Horizonte, nos acessos à LT e nível de risco geral considerando todas as bacias de limiar 500 existentes na área de estudo.

Com base nesses valores, é possível notar que tanto em termos gerais como considerando as intersecções com a faixa de servidão e seus acessos, a área de estudo possui níveis significativos de criticidade quanto à suscetibilidade de ocorrência de rupturas que desencadeiam movimentos de massa. Deve-se ainda considerar que mesmo a ocorrência de uma ruptura que provoque um deslizamento ou uma corrida de detritos longe das estruturas da LT Novo Horizonte pode atingi-las por causa das zonas de passagem ou de deposição dos sedimentos mobilizados.

### 5.3. Shalstab em nível de risco ( $q/t$ ) generalizado por bacia

O modelo de predição a deslizamentos utilizado como base nessa pesquisa permite a obtenção da estimativa de valores de chuva crítica necessária para tornar uma porção do terreno suscetível à deflagração de uma ruptura. Esta opção do Shalstab foi também avaliada neste trabalho de modo a ajudar a criar subsídios para a análise de cenários de suscetibilidade a movimentos de massa considerando diferentes valores de precipitação. Conforme apresentado anteriormente, para a modelagem em termos de chuva crítica é necessário possuir o valor de transmissividade ( $m^2/dia$ ) do manto de alteração da área de estudo. Como não se possui valores medidos em campo, utilizou-se como valor de transmissividade o mesmo adotado por Mendonça (2017),  $65 m^2/dia$ . A **Figura 6** apresenta o mapa de chuva crítica obtido por meio da modelagem realizada.



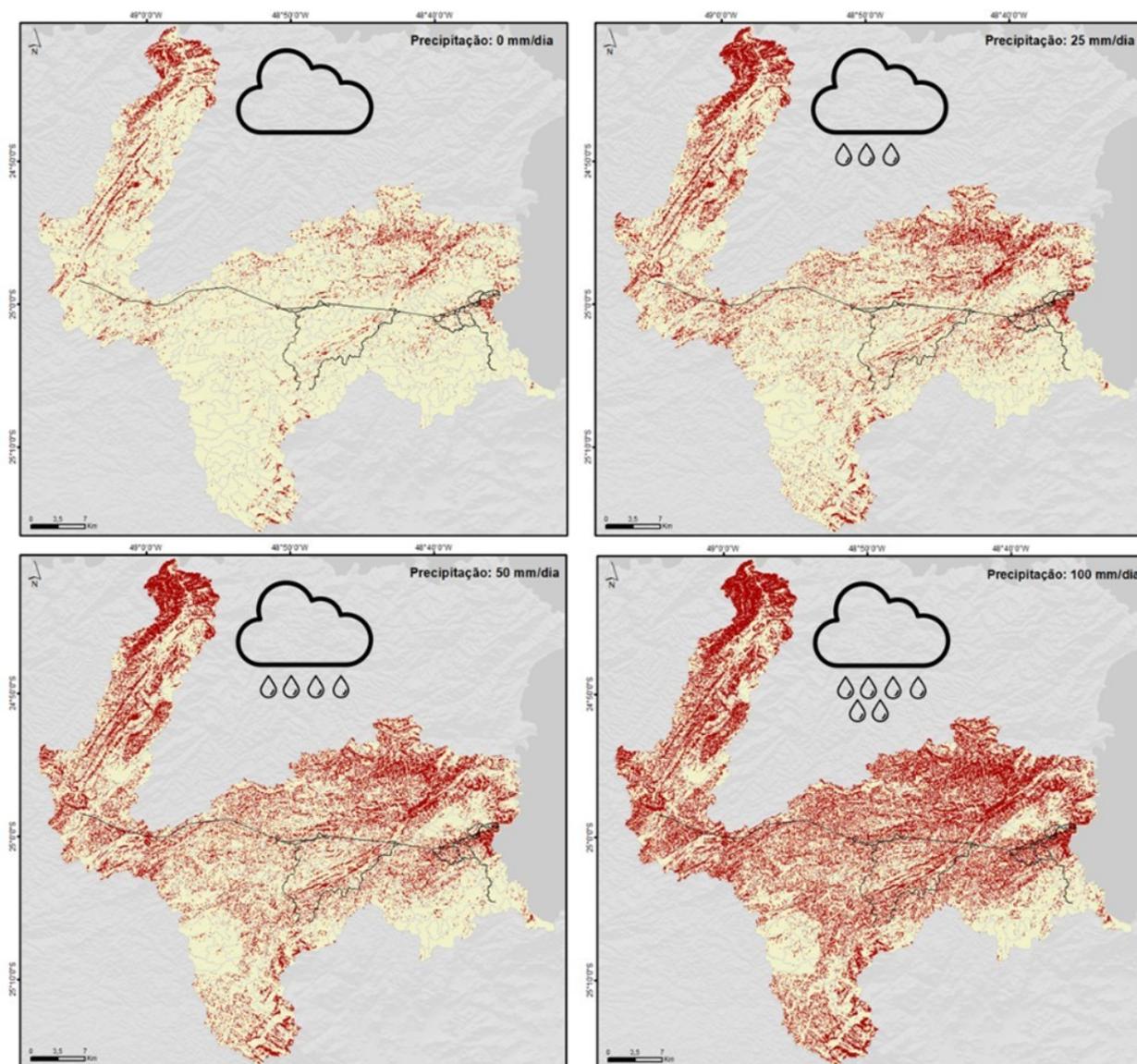
**Figura 6:** Mapa de chuva crítica necessária para deflagração de rupturas de solos.

Em relação a lógica do modelo Shalstab, quanto menor a quantidade de chuva, mais suscetível à ocorrência de rupturas o local apresenta. Desta forma, os locais cujas classes de suscetibilidade eram as mais perigosas nas **Figuras 6 e 7** são os que podem romper com limiares de chuva menores, conforme se pode observar na **Figura 6**. Em relação às 6 cicatrizes mapeadas nas imagens da plataforma *Google Earth* para validação do modelo, 4 delas estão em locais cuja chuva crítica é de até 10 mm, sendo que as outras 2 se localizam em locais classificados como 10 a 25mm e 25 a 50mm.

A **Figura 7** espacializa o resultado de diferentes cenários de precipitação diária, ressaltando em vermelho os locais classificados como críticos com base em cada limiar da chuva.

Observando o quadro superior esquerdo da **Figura 7** (precipitação de 0 mm/dia) é possível notar a espacialização dos locais que mesmo sem nenhuma ocorrência de chuva já possuem alto grau de suscetibilidade a rupturas do terreno. Tal suscetibilidade tem bastante relação com a alta declividade do local, o que o deixa em constante perigo. A **Figura 7** também ilustra quais locais se tornariam críticos em caso de cenários de chuva de 25, 50 e 100 mm durante o período de um dia. Nota-se que com o limiar de 100 mm/dia, uma grande porção da área de estudo se torna instável. Ressalta-se que esta condição não é anormal para a área de estudo, ainda mais que ela se encontra em clima úmido e nas fraldas da Serra do Mar, o que implica na ocorrência de precipitações orográficas. O sul e o sudeste do Brasil têm eventos de precipitação com 100mm diários comumente.

De acordo com os cenários descritos nesta pesquisa, a área de estudo tem probabilidade de sofrer com rupturas de solos/mantos de alteração em virtude das altas declividades dos terrenos, dos diferentes parâmetros geotécnicos que os mantos de alteração solos apresentam e também das altas precipitações que ocorrem na região. As altas declividades são resultantes da resistência ao intemperismo das rochas e de estruturas herdadas da deformação da Faixa Ribeira. Também a existência de muitas rochas com naturezas mineralógicas diferentes em pequeno espaço territorial pode criar muitas discontinuidades, que infelizmente não são incorporadas na modelagem. Uma questão interessante é que as rochas em maiores declividades apresentam mantos de alteração/solos menos espessos e por isso, mobilizariam, a princípio, menos materiais quando da ocorrência de movimentos de massa.



**Figura 7.** Suscetibilidade a movimentos de massa conforme valores de precipitação. Locais suscetíveis são representados na cor vermelha. Obs.: A quantidade de gotas de chuva na ilustração com a nuvem não segue padrões proporcionais.

É importante ressaltar que o modelo Shalstab indica as áreas sujeitas a ter rupturas de solos/mantos de alteração, provocando deslizamentos e/ou corridas de detritos, mas não dá informações sobre a zona de passagem e de deposição dos materiais rompido. Também, deve-se destacar que corridas de detritos podem se originar de rupturas de massas em deslizamentos, caso o material rompido ganhe conteúdos de água e/ou entre em uma linha de drenagem do relevo. Desta forma, caso seja de interesse, os resultados obtidos no presente trabalho podem ser analisados com outros parâmetros do relevo, para se obter mais detalhes sobre a zona de passagem e deposição dos sedimentos, tanto para movimentos de massa do tipo deslizamento quanto corridas de detritos.

## 6. Conclusão

Apesar de existir na literatura brasileira diversos artigos que exploram o uso do Shalstab para avaliar a suscetibilidade de um local à ocorrência de rupturas, poucos deles abordam a utilização do modelo considerando limiares de chuva crítica e generalizando os resultados por bacias hidrográficas. A utilização do modelo considerando limiares de chuva crítica se mostra uma opção rápida para a obtenção da espacialização dos locais de maior suscetibilidade à deflagração de movimentos de massa dada à ocorrência de determinados limiares de chuva. Diferentemente do resultado do Shalstab apenas para mapear o nível de instabilidade, essa versão do modelo possibilita a obtenção de resultados dinâmicos, no sentido de variarem conforme o limiar de chuva. Por outro lado, essa versão do modelo exige a definição de um valor de

transmissividade do solo, o qual não é facilmente obtido. Já em relação à generalização do nível de suscetibilidade para bacias hidrográficas possibilita a obtenção de uma perspectiva zonal, o que pode ser útil para planejamentos e tomadas de decisão.

Ressalta-se também que a generalização proposta para a complexidade geológica da área de estudo pareceu ser adequada para este estudo. O agrupamento de unidades geológicas a partir do que se conhece na literatura sobre as características de seus mantos de alteração em climas úmidos permitiu inferir parâmetros geotécnicos de entrada no modelo de predição Shalstab, gerando cenários de suscetibilidade a rupturas que puderam ser validados com ocorrências passadas de movimentos de massa. Apesar disso, recomenda-se a realização de estudos de detalhe na área de estudo para a obtenção de parâmetros mais direcionados à complexa geologia local, a fim de melhorar a acurácia do modelo e a análise de suscetibilidade, uma vez que na presente pesquisa se utilizou dados de entrada de referências com medidas de outras áreas e por correlação de inferências.

Em relação aos limiares de chuva crítica para provocar rupturas na área de estudo de acordo com o modelo Shalstab, chuvas com 100mm/dia são perigosas para muitos locais. Este valor de precipitação é bastante comum na região e isto é um fator que aumenta a vulnerabilidade das estruturas da LT Novo Horizonte aos processos do meio físico de seu sítio de assentamento. Como indicação para trabalhos futuros que utilizem o cenário de chuva crítica do Shalstab, destaca-se a realização de trabalhos de campo para medição *in loco* e especializada da transmissividade para obtenção de resultados com maior precisão de limiares de chuva crítica.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao grupo CPFL pelo apoio técnico e financeiro, através do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento PD-00063-3075/2020 (ANEEL/Brasil) via Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

### Referências

BERNARDES, J. A. (2003) **Investigação sobre a Resistência ao Cisalhamento de um solo Residual de Gnaisse**. Dissertação (Mestrado) na Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, Brasil, 134p.

BINI, G. M. P. **Análise das ocorrências de movimentos de massa sobre litologias do Complexo Luís Alves nos municípios de Ilhota e Gaspar, SC: subsídios para modelagem matemática de previsão. 2020**. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Brasil.

CREMON, É. H.; VALERIANO, M.M. Comparação do desempenho de dados SRTM-C e X em derivações geomorfológicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 2011, p. 2316-2323.

FLORES, T. **Modelagem e análise das áreas suscetíveis a movimentos de massa na bacia do rio Fão, a partir de redes neurais artificiais. 2018**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Centro Universitário Univates, Lajeado, 2018.

GERENTE, J.; LUIZ, E. L. ; GOMES, R. A. T. Estimativa preliminar de zonas saturação do relevo: uma comparação entre diferentes métodos. In: PEREZ FILHO, A.; AMORIM R. R. (Org.). **Os desafios da Geografia Física na fronteira do conhecimento**. 1ed.Campinas: Campinas: Instituto de Geociências - UNICAMP, 2017, 2017, v. 1, p. 3866-3877. DOI: <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2537>.

GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F. Movimentos de Massa. In: FLORENZANO, Teresa G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. cap. 6, p.159-184. URL: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/viewFile/238239/30059>.

HORN, B. K. P. (1981) Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE* 69, 14-47. DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.1981.11918>.

ITCG (2020). INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEOLOGIA DO PARANÁ. **Dados e informações geoespaciais temáticos.** Disponível em: <http://www.itcg.pr.gov.br/modules/faq/category.php?categoryid=9#>. Acesso em 01 Julho de 2020.

MEISINA, C.; SCARABELLI, S. A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. **Geomorphology**, v. 87, p. 207-223, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.03.039>.

MELO, C. M.; KOBAYAMA, M. Aplicação do Modelo Shalstab no estudo de escorregamentos no Brasil: Revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, p.721-738, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1372>.

MENDONÇA, P. C. **Aplicação do modelo Shalstab para delimitação de áreas susceptíveis a escorregamento no município de Niterói – RJ.** 2017. x, 70 f., il. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MICHEL, G. P. **Estudo de escorregamentos na Bacia do Rio Cunha, Rio dos Cedros/SC, com os modelos SHALSTAB e SINMAP.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2011. 84p.

MICHEL, G.P.; KOBAYAMA, M.; GOERL, R.F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1266–1277, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0886-4>.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v.30, p.1153-1171, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1029/93WR02979>.

O'LOUGHLIN, E.M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v. 22, p. 794–804, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR022i005p00794>.

PAUL, L R, ABATTI, B. H., MICHEL, G. P. Análise de desempenho dos modelos SHALSTAB, SINMAP e TRIGRS para a avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos nas bacias Taboão e matador, Rio do Sul (SC). XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2019, Foz do Iguaçu-PR, Brasil. **Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos** (ISSN 2318-0358), 2019. p. 1-10.

RIFFEL, E.S.; RUIZ, L.F.C, GUASSELLI, L.A. Mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos a partir de mineração de dados e do modelo SHALSTAB. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 68, p. 1805–1818, 2016. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv68n9-44444>.

SILVA, M. M. **Caracterização geotécnica de um solo de calcário da Encosta Continental/PE-18, Paulista-PE, com ênfase na resistência ao cisalhamento.** Dissertação (Mestrado em engenharia) – Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

SISTO, F. P. **Comparação entre os modelos SHALSTAB e SINMAP no estudo de áreas susceptíveis a escorregamentos em São Sebastião – SP.** 2018. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, 2018.

SOTHE, C., GERBI CAMARGO, E., GERENTE, J., RENNÓ, C., & VIEIRA MONTEIRO, A. (2017). Uso de Modelo Aditivo Generalizado para Análise Espacial da Suscetibilidade a Movimentos de Massa. **Revista Do Departamento De Geografia**, 34, 68-81. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v34i0.132901>.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, no 33, 1997, p. 309 - 319. DOI: <https://doi.org/10.1029/96WR03137>.

VALLEJO, L. G., FERRER, M., ORTUÑO, L., OTEO, C. (2002). **Ingenieria Geologica.** Pearson Educacion. Madrid. 744pp.

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. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v13i1.338>.

VIEIRA, O. A. R. P.; GODOY, A., HACKSPACHER, P. C.; LEITE JUNIOR, W. B. Contexto estrutural da área da folha topográfica Guapiara. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 37, n. 3, p. 505-521, 2018.

VIEIRA, B.C.; RAMOS. H. Aplicação do modelo SHALSTAB para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 29, p. 161–174, 2015. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v29i0.102087>.

VIEIRA, B.C. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 193p

ZAIDAN, R. T.; CARAMÉZ, L. A. S. ; GOMES, F.C.M. Análise comparativa entre os modelos SHALSTAB e SINMAP na identificação de áreas que possuem probabilidade à ocorrência de escorregamentos. In: XII SINAGEO - Paisagem e Geodiversidade: a valorização do patrimônio geomorfológico brasileiro, 2018, Crato - CE. **Anais do XII SINAGEO - Paisagem e Geodiversidade: a valorização do patrimônio geomorfológico brasileiro**. Crato - CE: EdURCA, 2018. p. 1-7.



Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual (CC BY-NC-SA)*.