

AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS EM MAQUINÉ/RS E INFLUÊNCIA DOS DADOS DE CAMPO NA QUALIDADE DO MAPEAMENTO DE PERIGO

Alessandro Gustavo Franck

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Porto Alegre, RS, Brasil
franck.alessandro.g@gmail.com

Danrlei de Menezes

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Porto Alegre, RS, Brasil
danrlei.menezes@ufrgs.br

Masato Kobiyama

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Porto Alegre, RS, Brasil
masato.kobiyama@ufrgs.br

RESUMO

Identificar regiões suscetíveis a escorregamentos e realizar mapeamentos das áreas de perigo são ferramentas essenciais na gestão de risco e desastres associados a esses fenômenos naturais. Uma das ferramentas mais utilizadas para a elaboração de mapeamentos dessas áreas é a modelagem numérica. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi caracterizar as unidades geotécnicas (UGs) na bacia hidrografia do rio Maquiné/RS, realizar o mapeamento de perigo e avaliar a influência dos dados geotécnicos coletados em campo na qualidade do mapeamento. Foi utilizado o modelo SHALSTAB, com a consideração da caracterização das UGs da bacia com dados obtidos através de análises de solo *in situ* e em laboratório. Assim, foram simulados três cenários: cenário-1: default (com os valores recomendados pelo SHALSTAB original); cenário-2: médio (com um valor único para cada parâmetro, sendo esse a média dos valores obtidos em campo); e cenário-3: discretizado (com os valores espacializados para cada UG). Através dos índices de eficiência utilizados (Índice de Acerto e Índice de Erro), os resultados obtidos demonstraram que o cenário-3 apresentou o melhor desempenho, demonstrando a importância da espacialização com as UGs e da utilização de dados locais para uma maior qualidade dos mapeamentos realizados com o SHALSTAB.

Palavras-chave: SHALSTAB. Unidades Geotécnicas. Movimentos de massa. Geomorfologia.

EVALUATION OF SUSCEPTIBILITY TO SHALLOW LANDSLIDES IN MAQUINÉ/RS AND THE FIELD DATA INFLUENCE ON THE QUALITY OF HAZARD MAPPING

ABSTRACT

Identifying susceptible regions to landslides and mapping hazardous areas are essential tools in managing the risk and disasters associated with these natural phenomena. One of the most used tools for mapping these areas is numerical modeling. Thus, the objective of the present study was to characterize the geotechnical units (UGs) in the Maquiné/RS river basin, perform hazard mapping and evaluate the influence of geotechnical data collected in the field on the quality of the mapping. The SHALSTAB model was used, considering the characterization of the basin's UGs with data obtained through *in situ* and laboratory soil analyses. Thus, three scenarios were simulated: scenario-1: default (with the values recommended by the original SHALSTAB); scenario-2: average (with a single value for each parameter, this being the average of the values obtained in the field); and scenario-3: discretized (with spatialized values for each UG). Through the efficiency indexes used (Hit Index and Error Index), the results obtained showed that scenario-3 presented the best performance, demonstrating the importance of spatialization with the GUs and the use of local data for a greater quality of the mappings performed with SHALSTAB.

Keywords: SHALSTAB. Geotechnical Units. Mass movements. Geomorphology.

INTRODUÇÃO

A identificação de escorregamentos (*landslides*) e o mapeamento de suscetibilidade são etapas cruciais na gestão de risco e desastres associados a esses fenômenos naturais. Com o aumento dos desastres associados a tais fenômenos juntamente com inundações bruscas nas últimas décadas, o governo brasileiro estabeleceu a Lei Nº 12.608 (BRASIL, 2012), onde definiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). Na América Latina, muitas dessas tragédias acontecem em regiões montanhosas devido à ocorrência de eventos de precipitação com alta intensidade, e à característica do relevo da região (SEPÚLVEDA e PETLEY, 2015).

Segundo diversos autores, a ocorrência de um evento pluviométrico severo associado às condições geomorfológicas de regiões declivosas, e às ocupações antropogênicas, comumente irregulares, podem conduzir a um grau elevado de perda de vidas humanas (SCHUSTER, 1996; SIDLE e OCHIAI, 2006; ARISTIZÁBAL e SÁNCHEZ, 2020). Por esse motivo, a avaliação da suscetibilidade de escorregamentos tem sido um tópico de grande interesse para a comunidade científica (CHACÓN et al., 2006; CERVI et al., 2010), sendo inclusive, indicadas na Lei nº 12.608 de 10 de abril de 2012 para municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de escorregamentos de grande impacto, ou processos geológicos correlatos (BRASIL, 2012). Para sua realização, algumas metodologias utilizam modelos computacionais para a geração de mapas de susceptibilidade, como por exemplo, o *Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-stability Analysis* (TRIGRS) (BAUM; SAVAGE; GODT, 2008), *Stability Index Mapping* (SINMAP) (PACK; TARBOTON; GOODWIN, 1998) e *Shallow Landsliding Stability Model* (SHALSTAB) (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994).

No Brasil, o SHALSTAB vem se tornando uma ferramenta cada vez mais utilizada para identificar os locais de ocorrência de escorregamentos (MELO e KOBİYAMA, 2018). Isso porque o modelo é capaz de capturar a física envolvida em escorregamentos provocados por chuvas em ambientes montanhosos ou declivosos (morros, morrotes, colinas) apenas utilizando um Modelo Digital de Elevação (MDE) e alguns parâmetros físicos do solo (ARISTIZÁBAL; GARCÍA; MARTÍNEZ, 2015).

O SHALSTAB foi proposto por Montgomery e Dietrich (1994), unindo um modelo de estabilidade de encosta infinita e um modelo hidrológico proposto por O'Loughlin, (1981), que assume que a pressão da água nos poros se acumula acima de um estrato impermeável, seguindo o fluxo paralelo em declive em estado estacionário.

Martins et al. (2017) avaliaram duas bacias hidrográficas na região da Serra do Mar, uma no estado de São Paulo e outra no estado do Paraná e Aristizábal, García e Martínez (2015) avaliaram uma bacia na cordilheira dos Andes na Colômbia. Ambos os trabalhos relataram resultados satisfatórios na utilização do SHALSTAB para a elaboração de mapas de suscetibilidade a escorregamentos translacionais. No entanto, os autores utilizaram os mesmos dados para toda a bacia, sem diferenciar as propriedades do solo entre as unidades geotécnicas (UGs) existentes nas áreas analisadas. A segregação da bacia em UGs fornece resultados mais próximos da realidade, pois cada UG possui uma resistência mecânica diferente e apresenta um comportamento hidrológico diferente (MELO et al., 2021).

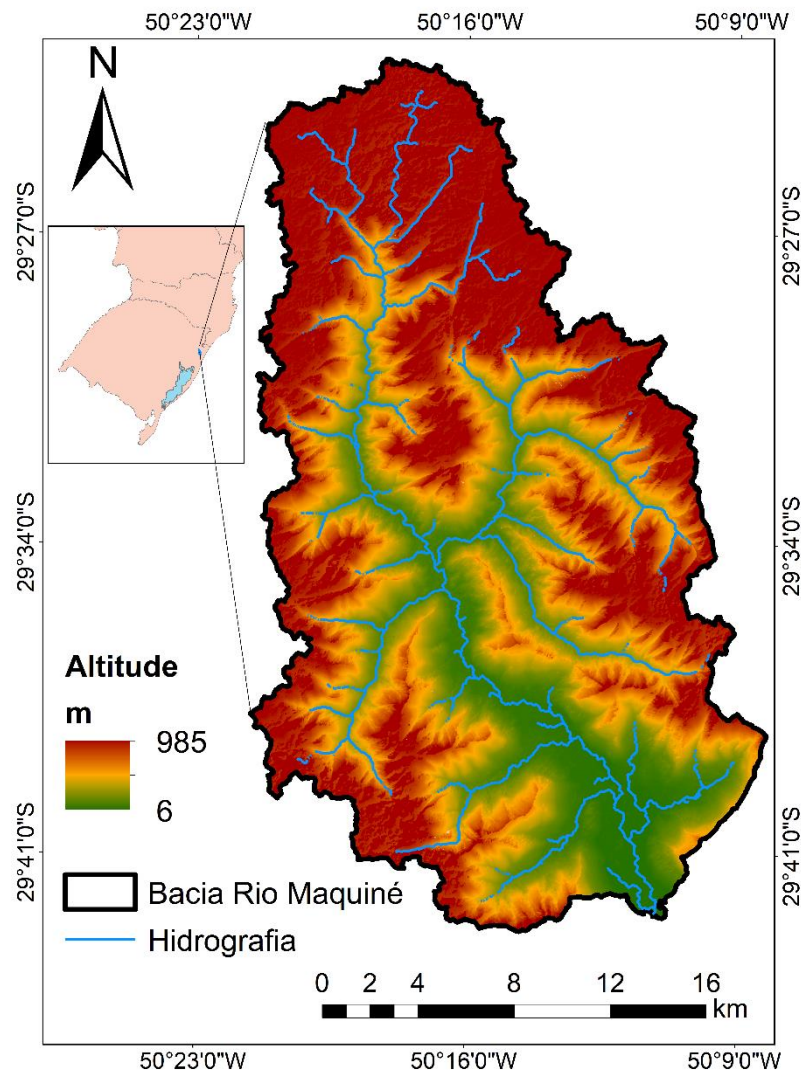
Nesse sentido, o presente trabalho buscou caracterizar as UGs e identificar áreas susceptíveis a escorregamentos translacionais na bacia do rio Maquiné/RS utilizando o SHALSTAB, e posteriormente foi comparado em diferentes cenários a influência dos dados de campo no desempenho das simulações. Nessa bacia, as características do relevo (montanhoso, com variações abruptas na declividade) e as frequentes chuvas (GODOY et al., 2017) favorecem a ocorrência de escorregamentos, que afetam a sociedade, a economia, e o meio ambiente local (CASTRO, 2019). Dessa forma, existe uma urgente necessidade de se estudar e produzir mapas mais precisos de suscetibilidade a escorregamentos, a fim de auxiliar na redução de desastres associados aos mesmos, através da criação de políticas de gestão de risco.

METODOLOGIA

Localização e Caracterização da Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Maquiné, com área de 510 km², está localizada na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul (MOREIRA; BRITO; KOBİYAMA, 2021), e abrange parte dos municípios de Maquiné e de São Francisco de Paula (Figura 1). Com grande predominância rural, na bacia encontram-se diversas atividades agrícolas, com destaque para a horticultura e a produção de milho (MOREIRA et al., 2019). Além disso, o local é um atrativo turístico, visto que possui inúmeras cascatas e atividades de ecoturismo (CASTRO, 2009). A combinação desses fatores intensifica o número de turistas no local, o que aumenta a quantidade de pessoas expostas a escorregamentos.

Figura 1 - Bacia Hidrográfica do rio Maquiné. (RS): Localização e Altimetria, 2022.



Fonte - ASF DAAC, 2015. Elaboração: s autores, 2022.

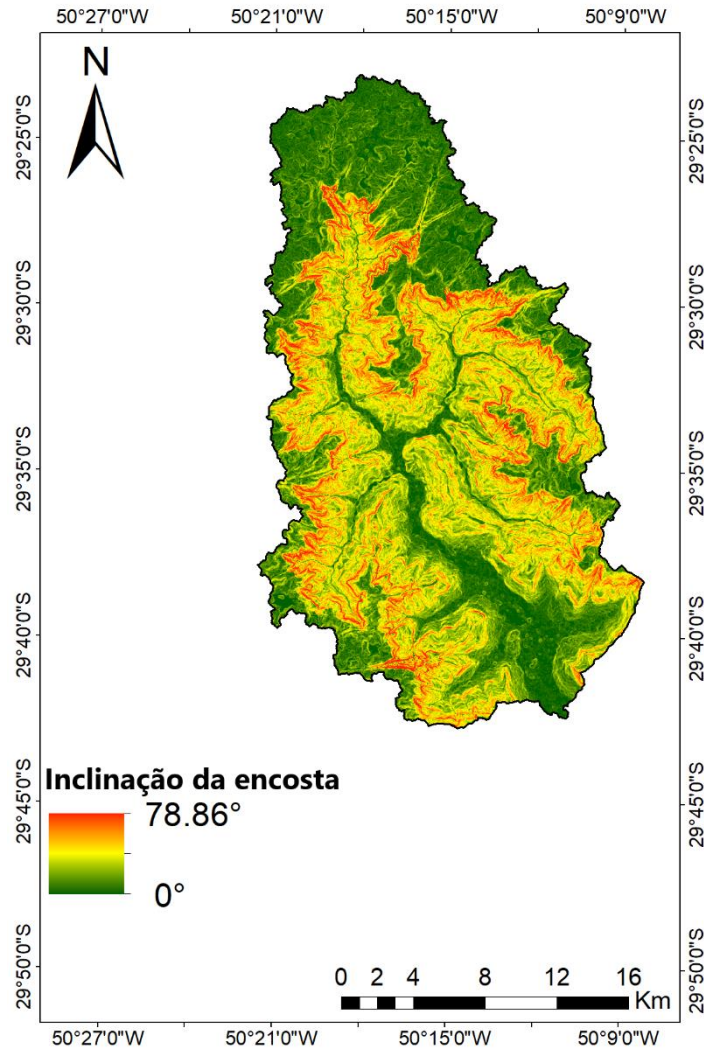
De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é caracterizado como subtropical úmido com verões quentes (Cfa) e subtropical úmido com verões brandos e invernos frios (Cfb) (ROCHA, 2013). Godoy et al. (2017) destacam que os maiores acumulados de chuva são na região de planície (1.756 mm) e não no planalto (1.402 mm), demonstrando a presença do efeito orográfico sobre a distribuição da chuva, como também foi constatado que os maiores acumulados das estações de planície ocorreram nos meses de verão (GODOY et al., 2017).

A bacia está situada dentro da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, que abrange áreas conservadas da Planície Costeira, Serra Geral e Planalto das Araucárias. Encontram-se em seu território a Terra Indígena Barra do Ouro *M'byá* Guarani, a comunidade quilombola Morro Alto, a Reserva Biológica da Serra Geral (REBIO) e parte da Área de Proteção Ambiental (APA) Rota do Sol (MMA, 2021). A bacia do rio Maquiné, situa-se ainda próxima a outras Unidades de Conservação, integrando o principal corredor ecológico da Mata Atlântica do Rio Grande do Sul.

A diferença altimétrica dessa bacia chega a 900 m, o que influencia na força do escoamento superficial em eventos de chuva causando erosão do vale (MOREIRA; VASCONCELLOS; KOBİYAMA, 2018) e escorregamentos nas encostas. Por consequência disso, grandes quantidades de sedimentos vêm sendo produzidas e transportadas até a foz da bacia. Em relação ao relevo, Kobiyama et al. (2018) afirmam que não existe uma definição padrão a nível internacional para montanha. No entanto, no presente estudo resolveu-se adotar a definição do IBGE (2004), que define montanha como uma região

que apresenta encostas íngremes, com declividade maior do que 15% e altitudes superiores a 300 m. A paisagem dessa bacia é formada por planícies e montanhas bem definidas, ao longo de todo o vale do rio Maquiné. Na região identifica-se a presença de escarpas de borda de planalto, onde é possível distinguir claramente o planalto das encostas (CASTRO, 2013). Cerca de apenas 30% da região é composta por áreas consideradas de planície ou com baixa declividade, as quais estão localizadas no baixo trecho da bacia. As demais áreas apresentam maiores declividades (Figura 2).

Figura 2 - Bacia Hidrográfica do rio Maquiné. (RS): Mapa de Inclinação, 2022.



Elaboração - Os autores, 2022.

Histórico de Ocorrências de Escorregamentos

Nessa região já ocorreram vários cenários de fenômenos naturais desencadeados por chuvas intensas, como escorregamentos (Figura 3). Tais eventos podem trazer imensos prejuízos ao município, como é o caso que aconteceu em Rolante/RS, município vizinho ao município de Maquiné. No ano de 2017 (janeiro), intensas chuvas causaram vários cenários de escorregamentos, fluxos de detritos e inundações bruscas nessa região. Para o município vizinho, Rolante, os prejuízos econômicos, que foram estimados em R\$70 milhões, e sociais decorridos desse fenômeno repercutiram na necessidade do conhecimento e gerenciamento dos desastres na região (PAIXÃO et al., 2018). Isso justifica ainda mais o presente estudo, já que a bacia do rio Maquiné é atingida frequentemente por processos hidrológicos e hidrogeomorfológicos, como escorregamentos e inundações bruscas.

No presente estudo, para fins de validação dos resultados obtidos pelo modelo, foi utilizado um inventário de cicatrizes levantado através de observação em campo e imagens de satélite. Assim, é

importante destacar que levando em consideração o fato de que o resultado do SHALSTAB apresenta somente os locais de iniciação de um escorregamento translacional, apenas a zona de início do movimento (terça parte mais a montante da cicatriz) foi considerada para as análises. Os escorregamentos translacionais ou rasos são aqueles que apresentam uma relação da profundidade da superfície de ruptura (D_r) para o comprimento da superfície de ruptura (L_r) tipicamente menor do que 0,1 (SKEMPTON e HUTCHINSON, 1969), ou seja, a superfície de ruptura é muito maior que a profundidade de ruptura. As cicatrizes foram obtidas através da análise de fotos e imagens históricas de satélite da região. Essas cicatrizes foram elaboradas com o auxílio do *software* Google Earth (GOOGLE EARTH PRO, 2021) e da ferramenta *Basemap* do ArcGIS (ESRI, 2009), com o uso desses recursos foram levantadas 52 cicatrizes ao todo, devido à grande área da bacia em relação a área das cicatrizes e a distribuição espacial das mesmas o mapa das cicatrizes não será apresentado.

Figura 3 - Município de Maquiné. (RS): Escorregamentos na área de estudo, 2022.



Fonte - Modificado de Castro, 2013. Organização: Os autores, 2022.

Modelo hidrogeomorfológico SHALSTAB

Para o mapeamento das áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais no município de Maquiné/RS, foi aplicado o modelo computacional SHALSTAB proposto por Montgomery e Dietrich (1994). O SHALSTAB é um modelo computacional baseado na combinação entre um modelo de estabilidade de encostas infinitas e um modelo hidrológico uniforme de estado permanente, o modelo utiliza ainda o fluxo paralelo à superfície e a lei de Darcy para estimar a distribuição espacial da pressão de poros, e está disponível gratuitamente na internet.

A combinação do modelo de encosta com taludes infinitos e do modelo hidrológico uniforme gera a Equação 1, a qual descreve o SHALSTAB:

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \sin \theta \cdot \left\{ \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi} \right) + \frac{cs+cr}{\cos^2 \theta \cdot \tan \varphi \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \right\} \quad (1)$$

Onde q é a taxa de recarga uniforme [$\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$]; T é a transmissividade do solo [$\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$]; b é o comprimento do contorno [m], a é a área de contribuição a montante [m^2]; θ é a declividade da encosta [$^\circ$]; ρ_s é a massa específica do solo úmido [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]; ρ_w é a massa específica da água [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]; c_s é a coesão do solo [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$]; c_r é a coesão das raízes [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$]; φ é o ângulo de atrito interno das partículas [$^\circ$]; z é a profundidade do solo [m]; e g é a aceleração da gravidade [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$].

O modelo determina as áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais utilizando a relação entre a razão de q e T , para avaliar a instabilidade de cada célula na área de estudo, e assim, determinar o grau de instabilidade de uma determinada encosta.

Como entrada, o modelo necessita dos parâmetros φ , $c (= c_s + c_r)$, e ρ_s , que são parâmetros físicos do solo e são obtidos através da coleta e amostragem do solo em campo. Os valores de a e b são referentes ao terreno e são obtidos do MDE que preferencialmente precisa ter uma qualidade razoável (FRANCK; GUSMÃO; KOBİYAMA, 2022), e z pode ser observado em campo. Os resultados da modelagem com o SHALSTAB são normalmente apresentados em escala logarítmica (Tabela 1), pois essa razão apresenta valores muito pequenos (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998).

Tabela 1 - Classes de classificação de estabilidade, 1998.

ID	CLASSES
1	Incondicionalmente instável
2	$\log q/T < -3,1$
3	$-3,1 < \log q/T < -2,8$
4	$-2,8 < \log q/T < -2,5$
5	$-2,5 < \log q/T < -2,2$
6	$-2,2 < \log q/T$
7	Incondicionalmente estável

Fonte - Dietrich e Montgomery, 1998. Elaboração: Os autores, 2022.

A classe incondicionalmente instável é geralmente atribuída às áreas muito declivosas, onde os parâmetros de resistência são praticamente sempre superados e existe pouca acumulação de solo. As áreas dessa classe podem ser associadas muitas vezes a paredões rochosos, onde não existe acumulação de solo devido à alta taxa de erosão presente nesses locais (MICHEL; KOBİYAMA; GOERL, 2014; FRANCK; GUSMÃO; KOBİYAMA., 2022), e sendo locais onde não há acumulação de solo, também são locais onde não poderiam ocorrer escorregamentos, o que demonstra uma incoerência física do modelo. Já a classe incondicionalmente estável pode ser identificada em áreas de baixas declividades, sem condições para escorregamento, que apresentam parâmetros de resistência maiores ou iguais à declividade e mesmo sob intensas cargas hidráulicas não vão ocorrer escorregamentos nesses locais. As 5 classes intermediárias são descritas em função do parâmetro livre q/T , e descrevem o grau de instabilidade de uma determinada área, sendo os menores valores referentes as áreas mais instáveis. Um detalhamento maior sobre o modelo SHALSTAB e seu equacionamento pode ser visto em Melo e Kobiyama (2018).

Além dos parâmetros geotécnicos do solo como entrada do modelo foi necessário um mapa da área de contribuição em infinitas direções, obtido a partir do MDE. Para a obtenção desse mapa, utilizou-se a extensão *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models* (TauDEM) proposta por Tarboton (1997) e Tarboton, Dash e Sazib (2015) disponível na internet e de uso livre. O MDE, com resolução espacial de 12 m, foi obtido na Internet no *site* EARTHDATA da Agência Espacial Americana (NASA), e é uma combinação das imagens obtidas pela missão Alos Palsar (2006-2011) de autoria da *Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center* (ASF DAAC, 2015). A ferramenta utilizada nas simulações do SHALSTAB foi a *Automatic SHALSTAB Analysis* (ASA), a qual Sbroglia et al. (2017) elaborou, com base nas modificações propostas por Michel, Kobiyama e Goerl (2013).

Unidades Geotécnicas (UGs)

No presente estudo, usou-se a definição de UG proposta por Dias (1995), isto é, a UG é uma área que possui o mesmo tipo de solo e de litologia. Para definir as unidades geotécnicas da bacia foram utilizados o mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul na escala 1:750.000 (Figura 4a), de autoria do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2008), e o mapa de solos do Rio Grande do Sul na escala de 1:750.000 (Figura 4b), de autoria de Fitz (2001) utilizando como base o levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul de 1973. O modelo foi aplicado para cada uma das UGs, a fim de prever o comportamento do solo relacionando-o com sua gênese (pedologia e geologia).

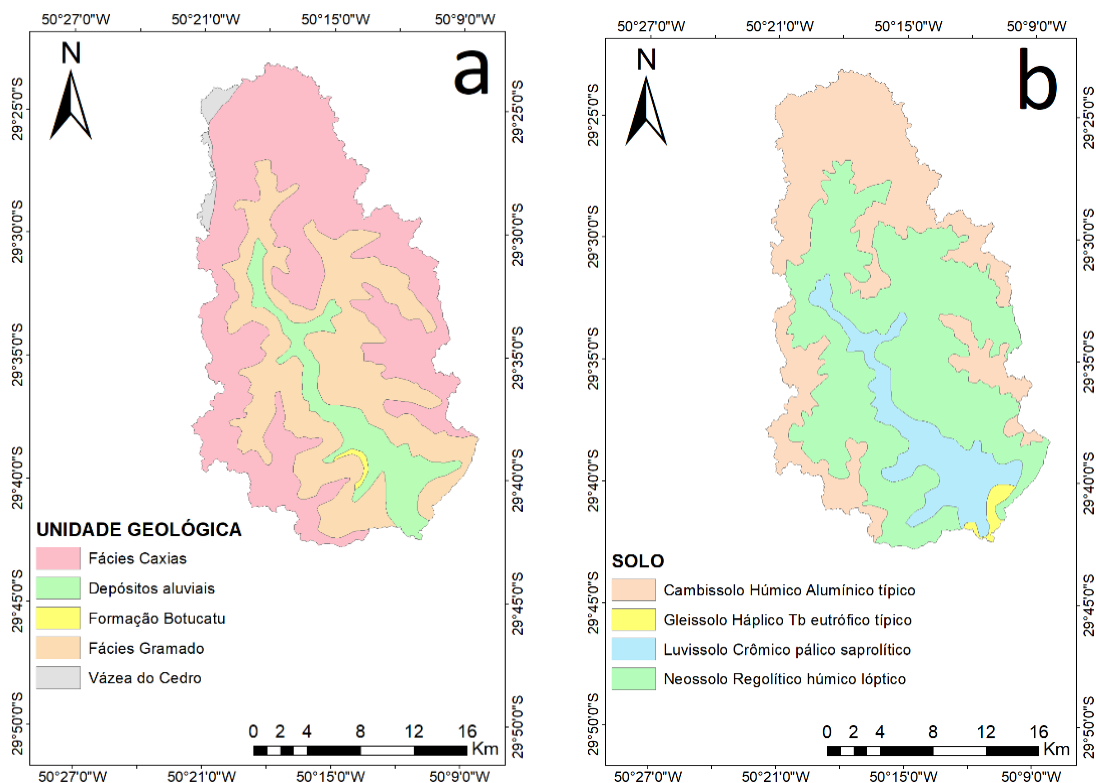
Em relação à geologia, a bacia compreende áreas cobertas por derrames basálticos da bacia do Paraná, o que possibilita a formação de diferentes tipos de rochas: Formação Serra Geral (rochas basálticas) como as Fácies Gramado e Caxias, Formação Botucatu (arenito Botucatu) e depósitos

recentes (depósito de sedimentos). A Formação Botucatu é formada por arenitos finos a médios, com cores predominantes rosa a vermelho. Essas rochas são encontradas de forma mais expressiva junto aos arroios Lajeado e Forqueta no Vale do Rio Maquiné (CASTRO, 2013).

A Formação Serra Geral é caracterizada por sucessivos derrames e intrusões magmáticas que caracterizam uma associação litológica de basaltos e riolitos. As diferentes composições químicas entre os magmas ácidos e básicos geram diferentes registros estruturais e texturais após a eusão e posterior resfriamento. Os fácies Gramado ocorrem de forma descontínua, provavelmente pela diminuição da espessura de suas camadas até sua desapareção em algumas áreas. Em afloramento, essas rochas apresentam-se com cor cinza escuro, estando frequentemente alteradas, quando assumem uma coloração marrom-avermelhada (CPRM, 2007). Os fácies Caxias são rochas vulcânicas ácidas não recobertas por nenhuma unidade mais nova, constituindo o platô da Serra Geral, onde se encontram as maiores altitudes. Assim, a espessura dessa Fácies pode atingir até 300m. Em afloramento, as rochas dessa Fácies consistem de derrames acamadados com cor cinza claro e cor de alteração branca ou castanha (CPRM, 2007).

O solo nas regiões de maior interesse (encostas) é constituído principalmente por Neossolos Regolíticos, que são solos rasos e pouco desenvolvidos, sem contato lítico ou lítico fragmentário dentro de 50 cm a partir da superfície, e apresentam horizonte A ou hístico sobrejacente a horizonte C ou Cr (EMBRAPA, 2018).

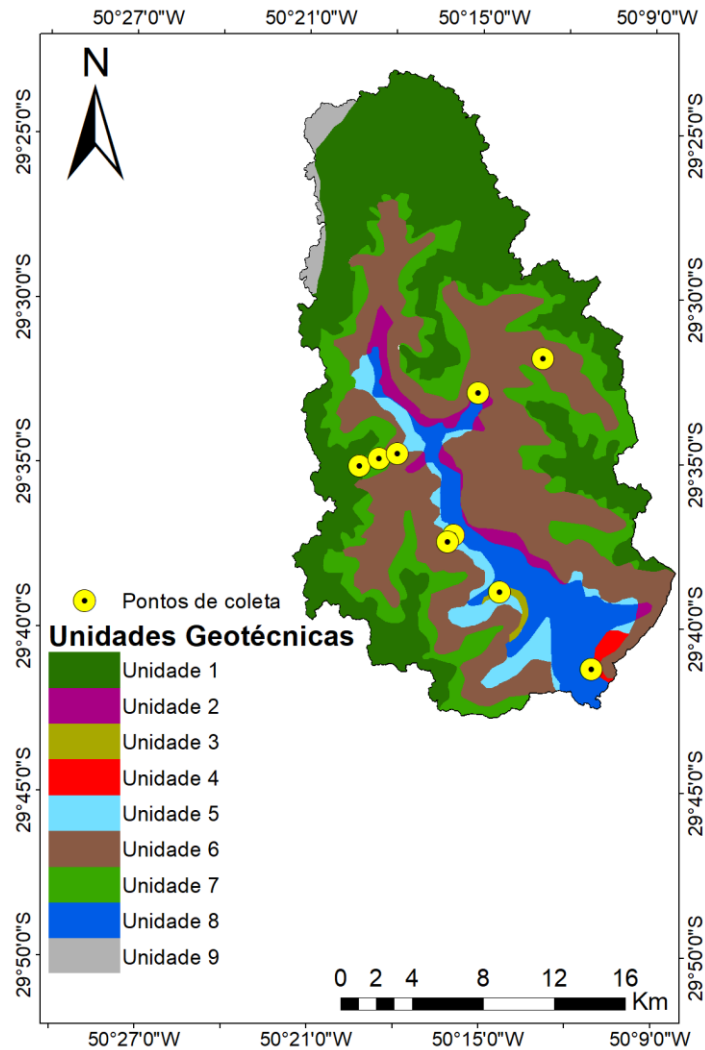
Figura 4 - Bacia Hidrográfica do rio Maquiné. (RS): Mapa temático: (a) unidades geológicas; (b) solos, 2022.



Fontes - CPRM, 2008; Fitz, 2001. Elaboração: Os autores, 2022.

A combinação de ambos os mapas resultou no mapa de UGs (Figura 5). O Quadro 1 mostra o tipo de solo e a geologia de cada uma das UGs. Dessa forma, foram realizados ensaios e coletas em cada UG de interesse, sendo desconsiderada a Unidade 9 por se localizar em uma região de planalto. Além disso, foi realizado um número maior de coletas na unidade de maior interesse (Unidade 6), conforme mostra a Figura 5, pois essa Unidade se encontra nas regiões mais declivosas.

Figura 5 - Bacia Hidrográfica do rio Maquiné. (RS): Unidades Geotécnicas e pontos de coleta, 2022.



Elaboração - Os autores, 2022.

Quadro 1 - Bacia Hidrográfica do rio Maquiné (RS): Unidades Geotécnicas, 2022.

Unidade	Solo	Geologia
1	Cambissolo Húmico Alumínico típico	Formação Serra Geral - Fácies Caxias
2	Neossolo Regolítico Húmico léptico	Depósitos aluviais
3	Luvissolo Crômico pálico saprolítico	Formação Botucatu
4	Gleissolo Háplico Tb Eutrófico típico	Formação Serra Geral - Gramado
5	Luvissolo Crômico pálico saprolítico	Formação Serra Geral - Gramado
6	Neossolo Regolítico Húmico léptico	Formação Serra Geral - Gramado
7	Neossolo Regolítico Húmico léptico	Formação Serra Geral - Fácies Caxias
8	Luvissolo Crômico pálico saprolítico	Depósitos aluviais
9	Cambissolo Húmico Alumínico típico	Várzea do cedro

Elaboração - Os autores, 2022.

Levantamento dos Dados em Campo

Como o SHALSTAB necessita de informações do solo como parâmetro de entrada (c_s , φ e ρ_s), esses parâmetros foram determinados com amostragem em diferentes pontos, a fim de representar as UGs

distribuídas pela bacia. Além desses parâmetros foi medida em campo também a condutividade hidráulica saturada do solo (K_{sat}).

Previamente foram definidos os pontos para coleta, considerando a dificuldade de acesso aos locais (terreno muito inclinado e floresta densa). A profundidade de coleta foi definida em 50 cm para todos os pontos, devido às limitações impostas pelo solo da bacia (em diversos locais não há solo em profundidade maior que 50 cm) e por estar dentro da faixa de variação permitida para o uso dos equipamentos.

Os parâmetros de c_s e ϕ foram obtidos por meio do *Borehole Shear Test* (BST) (Figura 6a). O equipamento foi desenvolvido por Handy e Fox (1967) e permite a aplicação *in situ* de tensões cisalhantes no solo para uma determinada tensão normal. Esse teste demanda menor tempo de execução e gera menor perturbação na estrutura do solo. A partir da aplicação desse equipamento em campo, as informações de resistência do solo foram obtidas de maneira fácil e rápida. Previamente ao ensaio, foi aberto um orifício no solo até a profundidade pretendida (50 cm) para obtenção da envoltória de cisalhamento, o processo foi repetido de três a quatro vezes, com acréscimo da tensão normal.

O parâmetro de K_{sat} foi determinado *in situ*, utilizando-se o Permeômetro de Guelph (Figura 6b). O equipamento consiste em um permeômetro de carga constante que trabalha sob o princípio do tubo de Mariotte, e permite determinar entre outras propriedades (potencial matricial de fluxo e sorção) a K_{sat} . A profundidade das medições realizadas com o Permeômetro de Guelph também foram de 50 cm.

Figura 6 - Maquiné. (RS): Equipamentos utilizados em campo: (a) BST; (b) Permeômetro de Guelph, 2022.



Fonte - Os autores, 2022.

Para a determinação do valor de ρ_s foi coletada uma amostra não deformada para cada ponto por meio de um anel metálico (Figura 7) de aproximadamente 5,4 cm de diâmetro e 3 cm de altura, na mesma profundidade onde foram realizadas as medições da K_{sat} , c_s e ϕ (50 cm). Por meio do método do anel volumétrico, descrito com detalhes em Cauduro e Dorfman (1993), foi determinada a massa do solo seco da amostrada e, por meio do volume do cilindro, a densidade do solo de cada amostrada.

Figura 7 - Maquiné. (RS): Amostras não deformadas coletadas, 2022.



Fonte - Os autores, 2022.

Cenários de Simulação

Para avaliar a importância da medição em campo e a utilização de dados locais, e também da espacialização dos dados, o presente trabalho propôs três diferentes cenários. O cenário-1 utilizou os dados de solo obtidos na literatura e recomendados no manual do SHALSTAB (valores padrão). O cenário-2 utilizou os dados obtidos em campo, mas usando uma média dos pontos coletados para toda a bacia, considerando que as características geotécnicas são homogêneas. O cenário-3 utilizou os dados medidos em campo espacializados em suas devidas UGs.

Avaliação do desempenho do modelo

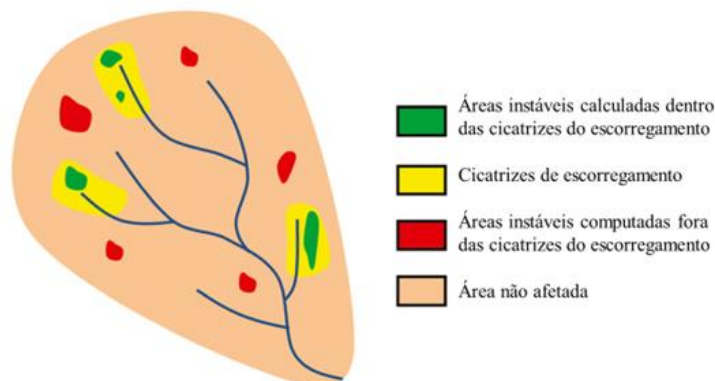
Para avaliar a eficiência do resultado gerado pelo modelo foram utilizados dois índices propostos por Sorbino, Sica e Cascini (2010): índice de sucesso - IA (Equação 2) e índice de erro - IE (Equação 3) (Figura 8). O IA representa a porcentagem de área considerada instável pelo modelo (A_{in}) dentro da área real da cicatriz de escorregamento (A_{unst}), enquanto o IE é a taxa percentual entre as áreas instáveis definidas pelo modelo fora da cicatriz de escorregamento (A_{out}) e a área da bacia que não foi afetada pelos escorregamentos (A_{stable}):

$$IA = \frac{A_{in}}{A_{unst}} \cdot 100 \quad (2)$$

$$IE = \frac{A_{out}}{A_{stable}} \cdot 100 \quad (3)$$

Sorbino, Sica e Cascini (2010) também sugeriram o cálculo da razão entre IA e IE no caso de valores semelhantes entre esses índices. A proporção mais alta indica o melhor desempenho do modelo.

Figura 8 - Ilustração conceitual de índices de acerto e erro, 2014.

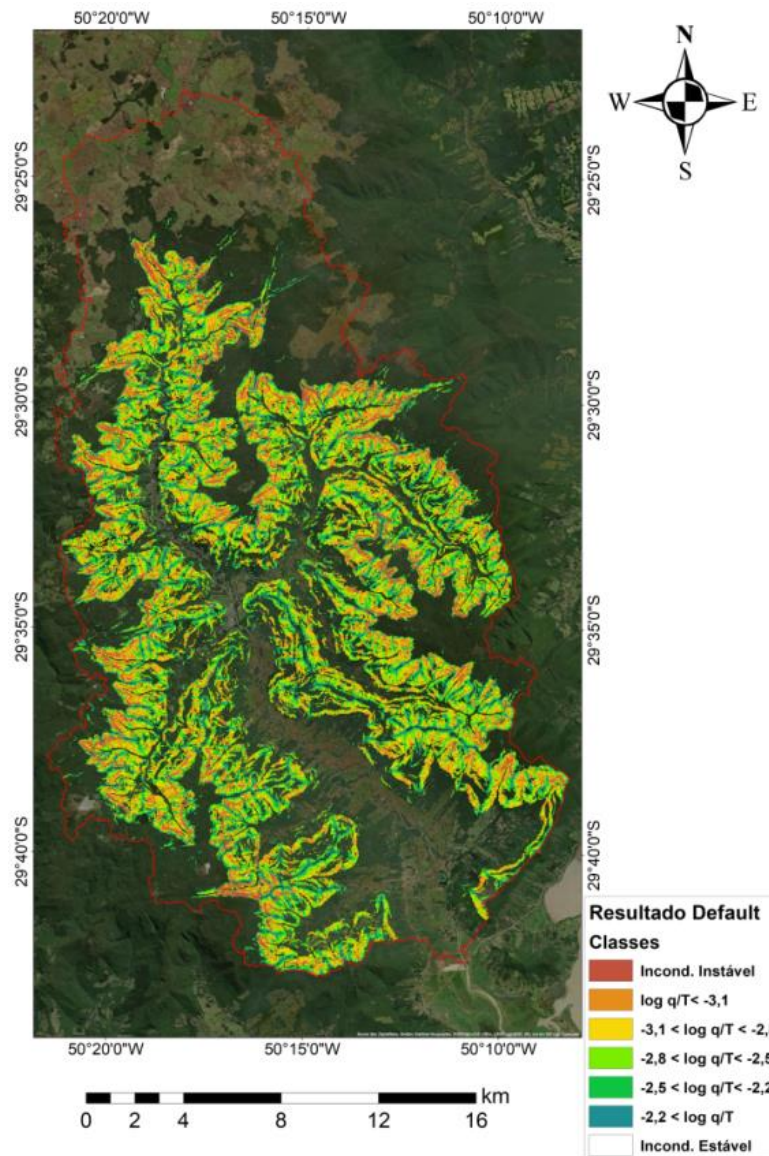


Fonte - Modificado de Michel, Kobiyama e Goerl, 2014. Elaboração: Os autores, 2022.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cenário 1 foram utilizados os valores recomendados por Dietrich e Montgomery (1998), que foram considerados como os valores *default* do modelo. Os autores afirmam que para locais onde não se tem o valor de coesão do solo a mesma pode ser considerada 0 e o ângulo de atrito interno pode ser configurado como 45° , esse valor alto reduz a área total instável que seria encontrada com valores mais baixos e serve como uma compensação ao valor 0 de coesão. Já para a massa específica do solo úmido os autores utilizam valores entre $1.600\text{-}2.000\text{ kg.m}^{-3}$, no presente cenário o valor utilizado foi de 1.600 kg.m^{-3} . A Figura 9 apresenta o resultado obtido para o cenário 1 na bacia do rio Maquiné.

Figura 9 - Bacia Hidrográfica do rio Maquiné. (RS): Resultado do cenário-1, 2022.



Fonte - Mapa base de ESRI, 2009. Elaboração: Os autores, 2022.

Os parâmetros de solo utilizados no modelo nos cenários 2 e 3 foram obtidos em campo e caracterizam oito UGs de ocorrência na bacia hidrográfica do rio Maquiné. Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros de entrada do modelo (c_s , φ e ρ_s) e $Ksat$. Salienta-se que o presente trabalho adotou um valor médio estimado da profundidade do solo de acordo com o observado em campo para toda a bacia.

Tabela 2 - Bacia Hidrográfica do rio Maquiné (RS): Parâmetros obtidos em campo, 2022.

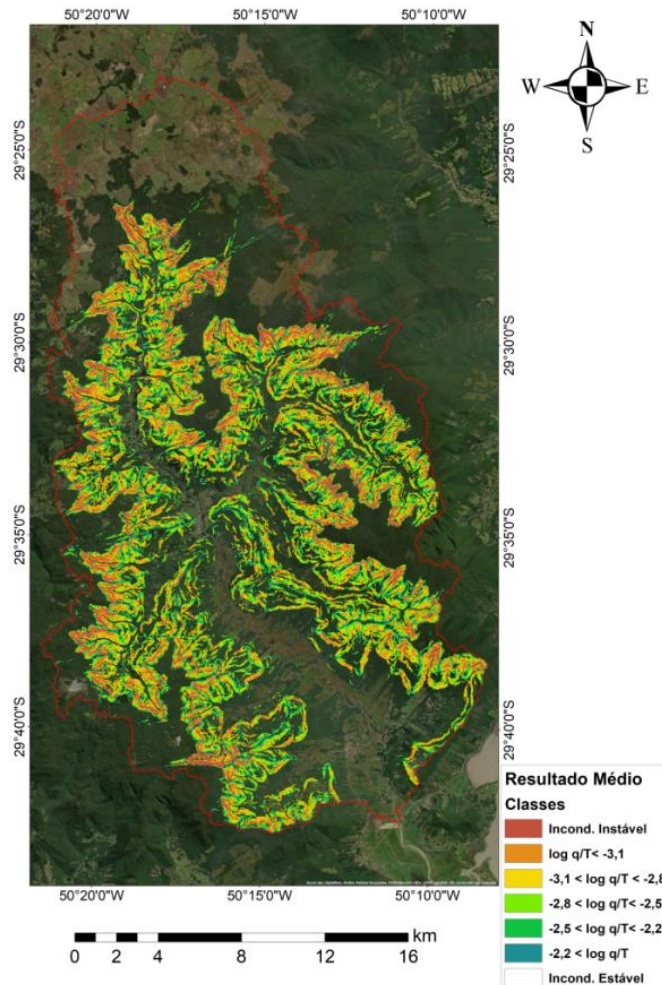
Parâmetro	Unidades Geotécnicas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Parâmetros de entrada no SHALSTAB									
Coesão do solo (c_s) (kPa)	5,51	3	0,62	4,97	7	6,5	6,5	0,69	
Profundidade do solo (z) (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
Ângulo de atrito (φ) ($^\circ$)	20,33	33,42	29,33	20,4	21,8	22,05	35,13	42,29	
Massa específica do solo úmido (ρ_s) (kg.m^{-3})	1429,6	1869,8	1236,7	1552,8	1579,5	1575,3	1466,8	1474,9	
Condutividade hidráulica saturada do solo (K_{sat}) (mm.dia^{-1})	498,24	784,80	3,34	67,97	24,77	188,64	76,46	211,68	

Elaboração - Os autores, 2022.

Em geral, os valores das propriedades físicas dos solos da bacia variaram dentro das faixas descritas na literatura. Segundo o GEOTECHDATA (2013), os valores de φ entre 18° e 32° são comuns em solos areno-siltosos, já em solos arenosos, esses valores podem chegar a 45° . Os valores de ρ_s variaram de 1236,7 a 1869,8 kg.m^{-3} , Kiehl (1979) afirma que valores acima de 1250 kg.m^{-3} , representam valores típicos de solos siltosos ou arenosos. Já a c_s variou de 0,62 a 7 kPa, indicando solos pouco coesivos (KIEHL, 1979).

Para o cenário 2 foi utilizado o valor da média de cada um dos parâmetros obtidos para as 8 unidades, em toda a bacia, sendo $c_s = 4,35 \text{ N.m}^{-2}$, $\varphi = 28^\circ$ e $\rho_s = 1.523,2 \text{ kg.m}^{-3}$. A Figura 10 apresenta o resultado para o cenário 2.

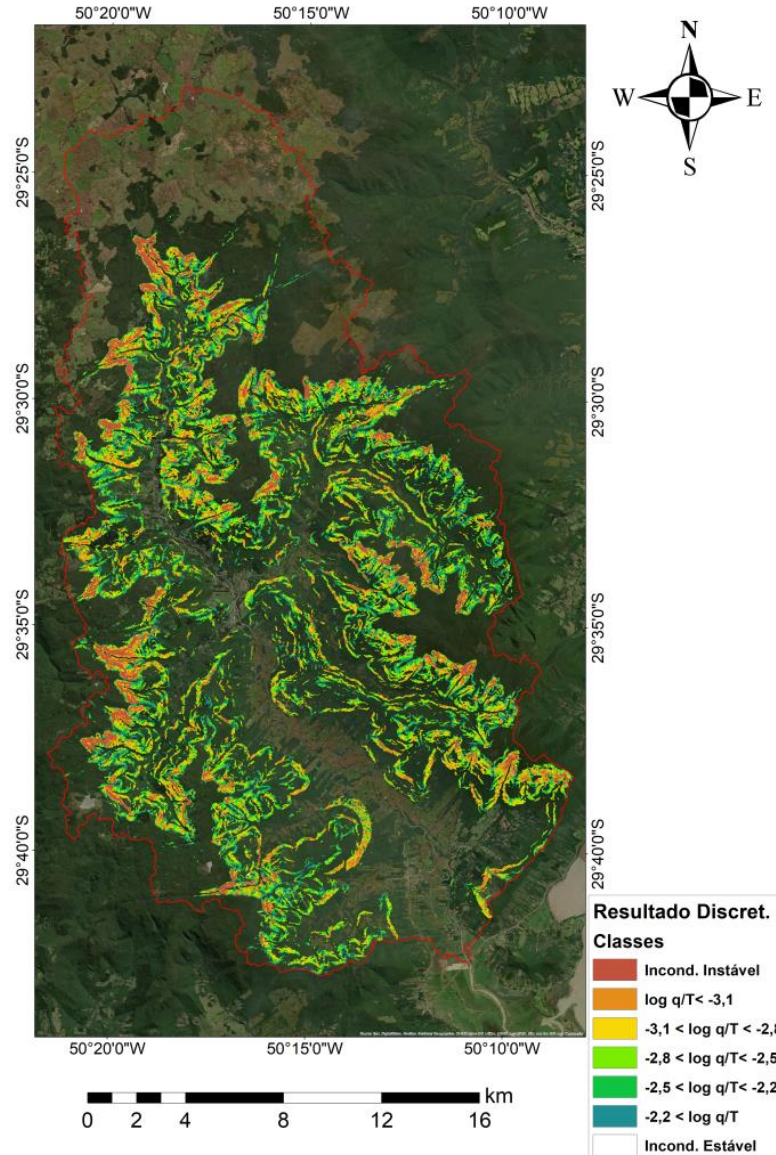
Figura 10 - Bacia Hidrográfica do rio Maquiné. (RS): Resultado do cenário-2, 2022.



Fonte - Mapa base de ESRI, 2009. Elaboração: Os autores, 2022.

Já para o cenário 3, foram utilizados os parâmetros obtidos em campo (Tabela 3) discretizados para cada UG. Assim elaborou-se o mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos da bacia do rio Maquiné, para o cenário 3 (Figura 11).

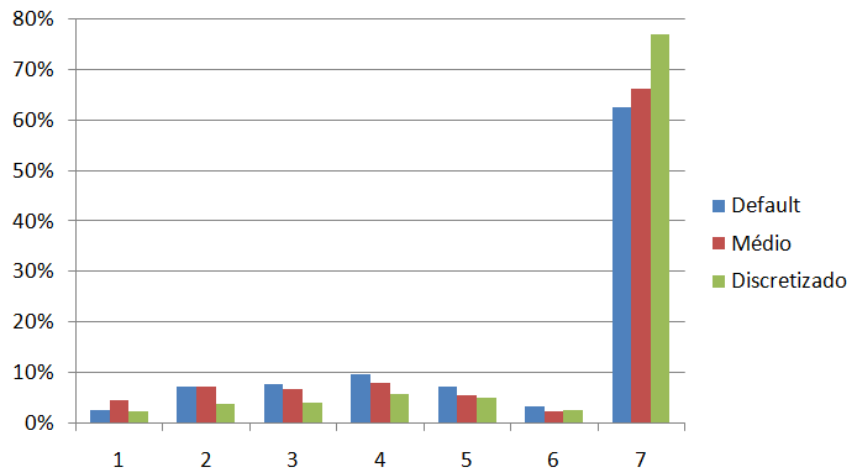
Figura 11 - Bacia Hidrográfica do rio Maquiné. (RS): Resultado do cenário-3, 2022.



Fonte - Mapa base de ESRI, 2009. Elaboração: Os autores, 2022.

A comparação dos locais de escorregamento observados com as previsões do modelo forneceu uma avaliação da confiabilidade do modelo. Observando os resultados dos três cenários é possível notar uma diminuição na quantidade de áreas consideradas instáveis (classes 1-6) pelo modelo ao utilizar os dados de campo (Figura 12). Dietrich, Bellugi e De Asua (2001) afirmam que o modelo tem uma resposta satisfatória quando a maioria das cicatrizes coincide com as classes de maior instabilidade, e ao mesmo tempo a área das classes mais instáveis representa uma pequena parcela da área total da bacia. Nos três cenários avaliados todas as cicatrizes se enquadram nas áreas das quatro classes mais instáveis, então foi considerado como o limiar de instabilidade $\log q/T = -2,5$ (as primeiras quatro classes). A soma da área das classes 1, 2, 3 e 4 representaram para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente, 27,1%, 26,0% e 15,6% da área total da bacia. Michel, Kobiyama e Goerl (2014) encontraram valores similares para a bacia do rio Cunha, uma bacia declivosa do sul do Brasil, e afirmaram que isso demonstra que o modelo representou corretamente os fatores hidrogeomorfológicos que governam a estabilidade das encostas na bacia.

Figura 12 - Bacia Hidrográfica do rio Maquiné. (RS): Área instável da bacia por classe, 2022.



Elaboração - Os autores, 2022.

Para avaliar a eficiência de cada cenário foram calculados os índices *IA* e *IE* para os três cenários (Tabela 3). Também foi calculada a razão entre os índices para definir qual cenário obteve o melhor desempenho.

Tabela 3 - Bacia Hidrográfica do rio Maquiné (RS): Índices de acerto e erro para os 3 cenários, 2022.

Cenário	<i>IA</i>	<i>IE</i>	<i>IA/IE</i>
1	78,1%	43,5%	1,8
2	73,7%	39,3%	1,9
3	49,0%	12,9%	3,8

Elaboração - Os autores, 2022.

Apesar dos cenários 1 e 2 obterem valores de *IA* mais altos que o cenário 3 o *IE* dos mesmos foi muito mais alto, demonstrando que ao utilizar informações menos detalhadas o modelo superestimou as áreas instáveis.

Analisando os resultados através da razão *IA/IE* como o sugerido por Sorbino, Sica e Cascini (2010), pode-se afirmar que o melhor resultado foi o do cenário 3 com os dados de campo discretizados nas UGs, que apresentou o maior valor de *IA/IE*. Esse valor de 3,8 obtido pelo cenário 3 é semelhante ao valor de 3,08 obtido por Michel, Kobiyama e Goerl (2014). Sisto (2018) testou diversas condições em diferentes bacias e obteve valores de *IA/IE* entre 1,08 e 2,75, sendo os valores mais altos obtidos nos cenários mais fiéis a realidade, com dados locais.

Diversos estudos de comparação entre modelos de estabilidade de encosta apontam para um melhor desempenho do modelo TRIGRS (SALCIARINI e CONVERSINI, 2007; ZIZIOLI; VALENTINO; MONTRASIO, 2013; PAUL; ABATTI; MICHEL, 2019), relacionando isso a possibilidade de especializar os parâmetros de entrada no TRIGRS. Entretanto, ao utilizar a espacialização de dados com o SHALSTAB, mesmo sendo mais trabalhoso, obteve-se valores muito satisfatórios. Paul, Abatti e Michel (2019) afirmam também que o SHALSTAB se apresenta como alternativa mais indicada em locais com poucos dados, pois apresenta resultados satisfatórios mesmo sem exigir muitos parâmetros de entrada.

O resultado obtido pelo cenário 3 demonstra a importância de conhecer as informações geotécnicas locais ao aplicar um modelo como o SHALSTAB, a aplicação desse modelo com as informações padrões ou com dados da literatura deve ser somente em análises preliminares, para um estudo/mapeamento mais criterioso devem ser coletadas as informações geotécnicas locais. Essa importância do mapeamento geotécnico foi demonstrada com bastante ênfase por Melo et al. (2021).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para elaborar um mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos, o modelo SHALSTAB apresentou bons resultados no presente estudo. No entanto, é importante que seja realizada uma caracterização detalhada do solo da bacia hidrográfica, podendo ser essa caracterização através das UGs. Assim como, é importante que isso seja feito em casos semelhantes ao do presente estudo, pois bacias de grande extensão apresentam maior variabilidade nas características geotécnicas o que pode levar a uma sub ou superestimativa das áreas instáveis. Além disso, esse resultado pode auxiliar órgãos governamentais no mapeamento e no zoneamento de áreas perigosas, utilizando-se de um método de baixo custo, como é o caso do SHALSTAB.

Para que a qualidade do mapeamento seja confiável, deve-se ter um bom inventário de cicatrizes de eventos anteriores e, se possível, relatos de testemunhas para que esses levantamentos sejam refinados. Dessa forma, o resultado pode ser utilizado com segurança pelas autoridades e órgãos competentes. Uma discussão importante, para futuros trabalhos, pode ser referente a quantidade e densidade mínimas de cicatrizes para diferentes escalas de estudo.

Algumas limitações do SHALSTAB podem inviabilizar seu uso em determinados locais, devido à possibilidade de ter o resultado pouco confiável. Nesse sentido, para que se avalie a viabilidade de utilização do SHALSTAB, é necessário que se tenham bons dados de entrada para o modelo, inclusive um bom MDE, para que os erros computacionais não sejam referentes aos parâmetros de entrada e sim devido às limitações do modelo. Os resultados obtidos nesse estudo demonstram uma boa aplicabilidade do SHALSTAB para a região, onde se obtiveram valores satisfatórios para os índices de eficiência. Isso coloca o SHALSTAB como uma alternativa viável para as prefeituras locais realizarem esse tipo de mapeamento de perigo.

A aplicação do SHALSTAB para os três cenários propostos demonstrou a importância dos dados de campo e da discretização da área de estudo em UGs. Dessa forma, pode-se afirmar que para mapeamentos mais detalhados e que envolvem uma responsabilidade maior, no caso de envolver risco de perda de vidas humanas é aconselhável que esse detalhamento seja realizado. Sendo assim, recomenda-se que as simulações com dados padrão do modelo sejam realizadas apenas em casos de baixo risco ou de análises preliminares.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Programa Pró-Recursos Hídricos, chamada n° 16/2017. Os autores agradecem ao CNPq pelas bolsas de estudo.

REFERÊNCIAS

ARISTIZÁBAL, E.; GARCÍA, E.; MARTÍNEZ, C. Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains. **Natural Hazards**, v. 78 n. 1, p. 621-634, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1736-4>

ARISTIZÁBAL, E.; SÁNCHEZ, O. Spatial and temporal patterns and the socioeconomic impacts of landslides in the tropical and mountainous Colombian Andes. **Disasters**, v. 44 n. 3 p. 596-618, 2020. DOI: [10.1111/disa.12391](https://doi.org/10.1111/disa.12391)

ASF DAAC - Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center. **ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected high res**; Includes Material © JAXA/METI 2007. 2015. Disponível em: <https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/> Acesso em: 23 set. 2020.

BAUM, R. L.; SAVAGE, W.Z.; GODT, J. W. TRIGRS - A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0. **USGS Open-File Rep. 2008 - 1159**. 74p. 2008. DOI: <https://doi.org/10.3133/ofr20081159>

BRASIL. **Lei nº 12.608 de 10 de abril de 2012**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC, dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC, autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres e dá outras providências. Brasília, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm. Acesso em: 1 jun. 2022.

- CASTRO, D. (org.) **História natural e cultura de Maquiné de tempos muito antigos até o século XXI**. Porto Alegre: Via Sapiens, 2009. 57p.
- CASTRO, D. (org.) **Atlas Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí**. Porto Alegre: Via Sapiens. 2013. 180p.
- CASTRO, D. **Bacia do Rio Tramandaí**. In: Castro, D. (org.) Ciclo das águas na bacia hidrográfica do Rio Tramandaí. Porto Alegre: Via Sapiens, p.20-45. 2019.
- CAUDURO, F. A.; DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem**. PRONI/Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 1993. 216p.
- CERVI, F.; BERTI, M.; BORGATTI, L.; RONCHETTI, F.; MANENTI, F.; CORSINI, A. Comparing predictive capability of statistical and deterministic methods for landslide susceptibility mapping: a case study in the northern Apennines (Reggio Emilia Province, Italy). **Landslides**, v. 7 n. 4, p. 433-444, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0207-y>
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C.; FERNANDEZ, T.; EL HAMDOUNI, R. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 65 n. 4, p. 341-411, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.12.005>
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2007.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Sul. Escala: 1:750.000**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2008.
- DIAS, R. D. Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais. **Revista do Instituto Geológico**, v. 16, p. 51–55, 1995. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.19950011>
- DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. SHALSTAB: A digital terrain model for mapping shallow landslide potential. **NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), Technical Report**, 1998. 29p. Disponível em: <http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab/index.htm> Acesso em: 16 set. 2021.
- DIETRICH, W. E.; BELLUGI, D.; DE ASUA, R. R. Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management. **Water Science and Application**, v. 2, p. 195-227, 2001. DOI:10.1029/WS002p0195 <https://doi.org/10.1029/WS002p0195>
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ed. Brasília, DF. 2018. 355p.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute. **World Imagery** [mapa base]. Escala Não Fornecida. Criado em: 12 de dez. de 2009. <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9> Acesso em: 7 jun. 2022.
- FITZ, P. R. **Rio Grande do Sul - Mapa de Solos. Generalização cartográfica do levantamento de reconhecimento de solos do Rio Grande do Sul – Brasil, 1973. Escala: 1:750.000**. DIT/EMATER – RS. Porto Alegre, 2001.
- FRANCK, A. G., GUSMÃO, J. S., KOBİYAMA, M. Avaliação da influência da resolução do modelo digital de terreno na modelagem numérica de escorregamentos e fluxo de detritos. **Revista Geonorte**, v.12 n.40, p. 1–23, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21170/geonorte.2021.V.12.N.40>
- GEOTECHDATA, **Angle of Friction**. 2013. Disponível em: <http://geotechdata.info/parameter/angle-of-friction.html> Acesso em: 25 maio 2022.
- GODOY, J. V.; BAUMBACH, M. F.; MELO, C. M.; KOBİYAMA, M. Análise estatística da distribuição de chuva na região da bacia hidrográfica do rio Maquiné, RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. Ciência e tecnologia da água: inovação e oportunidades para o desenvolvimento sustentável. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2017. p. 1-8.
- GOOGLE EARTH PRO 7.3.4.8. **Município de Maquiné, RS**. Data de visualização: 5 de dez. de 2021.

HANDY, R. L.; FOX, N. S. A soil bore-hole direct-shear test device. **Highway Research News**, v. 27, p. 42 – 51, 1967.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Vocabulário Básico de Recursos Naturais e Meio Ambiente**. 2 ed. Brasília: IBGE, 2004. 332f.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F.; FAN, F.M.; CORSEUIL, C.W.; MICHEL, G.P.; DULAC, V.F. Abordagem integrada para gerenciamento de desastres em região montanhosa com ênfase no fluxo de detritos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v.7, n. esp, p.31-65, 2018. DOI: [10.19177/rgsa.v7e0201831-65](https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e0201831-65)

MARTINS, T. D.; VIEIRA, B. C., FERNANDES, N. F.; OKAFIORI, C.; MONTGOMERY, D. R. Application of the SHALSTAB model for the identification of areas susceptible to landslides: Brazilian case studies. **Revista de Geomorfologia**, v. 19 n. 1, p. 136-144, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21094/rg.2017.015>

MELO, C. M.; KOBIYAMA, M. Aplicação do modelo SHALSTAB no estudo de escorregamentos no Brasil: revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19 n. 4, p. 721-738, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1372>

MELO, C. M.; KOBIYAMA, M.; MICHEL, G. P.; DE BRITO, M. M. The relevance of geotechnical-unit characterization for landslide-susceptibility mapping with SHALSTAB. **GeoHazards**, v. 2, p. 383–397, 2021. DOI: [10.3390/geohazards2040021](https://doi.org/10.3390/geohazards2040021)

MICHEL, G. P., KOBIYAMA, M., GOERL, R. F. Formulação do fator de segurança considerando a presença de vegetação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** 2013. 8p.

MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, 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 n. 7, p. 1266-1277, 2014. DOI: [10.1007/s11368-014-0886-4](https://doi.org/10.1007/s11368-014-0886-4)

MMA - Ministério do Meio Ambiente. 2021. **Reserva da Biosfera**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/areas-protetidas/instrumentos-de-gestao/reserva-da-biosfera/itemlist/tag/reserva%20biosfera.html>. Acesso em: 23 nov. 2021.

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. DOI: [10.1029/93WR02979](https://doi.org/10.1029/93WR02979)

MOREIRA, L. L.; VASCONCELLOS, S.; KOBIYAMA, M. Avaliação temporal e espacial da erosividade das chuvas na bacia hidrográfica do rio Maquiné, RS. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 13., Vitória/ES, 8p. 2018. **Anais...** 2018.

MOREIRA, L. L.; SCHETTER, T. F.; MORAES, S. R.; MENEZES, D.; KOBIYAMA, M. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio Maquiné (RS) utilizando o SWAT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, 10p. Foz do Iguaçu/PR. **Anais...** 2019.

MOREIRA, L. L., BRITO, M. M., KOBIYAMA, M. Effects of different normalization, aggregation, and classification methods on the construction of flood vulnerability indexes. **Water**, v. 13 n. 1, 98. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13010098>

O'LOUGHLIN, E. M. Saturation regions in catchments and their relations to soil and topographic properties. **Journal of Hydrology**, v. 53 n. 3-4, p. 229-246, 1981. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(81\)90003-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(81)90003-2)

PACK, R.T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. Terrain Stability Mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00. **Report Number 4114-0, Terratech Consulting Ltd.**, Salmon Arm, B.C. Canada (www.tclbc.com), 1998. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/247713872_Terrain_Stability_Mapping_with_SINMAP_Technical_Description_and_Users_Guide_for_Version_100 Acesso em: 24 jan. 2021.

PAIXÃO, M. A.; KOBIYAMA, M.; ZAMBRANO, F. C.; MICHEL, G. P.; FAN, F. M. Lições sobre o gerenciamento de desastres hidrológicos obtidas a partir da ocorrência em Rolante/RS. **Revista de Gestão & Sustentabilidade Ambiental**. Palhoça, SC. v. 7, p. 251-267, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v7e02018251-267>

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). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS (ISSN 2318-0358), 23., . Foz do Iguaçu/PR. 10p. **Anais...** 2019.

ROCHA, C. M. Qualidade das águas na Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí. In: Castro, D. (org.) **Atlas Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí**. Porto Alegre: Via Sapiens, p. 149-155, 2013.

SALCIARINI, D.; CONVERSINI, P. A comparison between analytic approaches to model rainfall-induced development of shallow landslides in the central Apennine of Italy. In: LANDSLIDES AND CLIMATE CHANGE: Challenges and Solutions, Ventor, Isle of Wight (UK), p. 185-196. **Anais...** 2007.

SBROGLIA, R. M.; PORATH, P. H. M.; HIGASHI, R. A. R.; OLIVEIRA, F. H. Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Translacionais com o Uso da Ferramenta ASA - Automatic Shalstab Analysis. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 12., Florianópolis, 2017. **Anais...** 8p. 2017.

SCHUSTER, R. L. Socioeconomic significance of landslides. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (org.) **Landslides: Investigation and Mitigation**. Washington (DC): National Academy Press. Transportation Research Board Special Report, n. 247, p. 12-35, 1996.

SEPÚLVEDA, V.; PETLEY, D. N. Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean. **Natural Hazards Earth System Sciences**, v. 15 n. 8, p. 1821-1833, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-15>

SIDLE, R.; OCHIAI, H. **Landslides: Processes, prediction, and land use**, Volume 18. Water resources monograph. American Geophysical Union, Washington, 2006. 312p.

SISTO, F. P. **Comparação entre os modelos SHALSTAB e SINMAP no estudo de áreas susceptíveis a escorregamentos em São Sebastião – SP**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente), Universidade Estadual Paulista. Rio Claro/SP. 2018. 123p.

SKEMPTON, A. W.; HUTCHINSON, J. N. Stability of natural slopes. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering., 7., 1969. Mexico City. **Proceedings...** . Mexico City: State of the Art Volume. p.291–340.

SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L. Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models. **Natural Hazards**, v. 53 n. 2, p. 313-332, 2010. DOI: [10.1007/s11069-009-9431-y](https://doi.org/10.1007/s11069-009-9431-y)

TARBOTON, T. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, p.309-319, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1029/96WR03137>

TARBOTON, D. G.; DASH, P.; SAZIB, N. **TauDEM 5.3: Guide to Using the TauDEM Command Line Functions**. 29 p. 2015. Disponível em: <https://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/TauDEM53CommandLineGuide.pdf> Acesso em: 18 out. 2021.

ZIZIOLI, D.; VALENTINO, R.; MONTRASIO, L. Comparison between different approaches to modelling shallow landslide susceptibility: a case history in Oltrepo Pavese, Northern Italy. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 13. p. 559-573, 2013. DOI: [10.5194/nhess-13-559-2013](https://doi.org/10.5194/nhess-13-559-2013)

Recebido em: 31/01/2022

Aceito para publicação em: 24/06/2022