

Artigo de Pesquisa

Avaliação do perigo a escorregamentos rasos na bacia do rio Camburi, município de São Sebastião - SP

Shallow landslide hazard assessment in the Camburi river catchment, São Sebastião municipality – SP

Sofia Bonfogo Cavichioli¹; Marina Tamaki de Oliveira Sugiyama²; José Eduardo Bonini³; Tiago Damas Martins⁴; Bianca Carvalho Vieira⁵

¹ Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia, São Paulo, Brasil. sofiabcavichioli@usp.br.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7926-6329>

² Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia, São Paulo, Brasil. marinatamaki@usp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9627-2403>

³ Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia, São Paulo, Brasil. jose.bonini@usp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6047-0141>

⁴ Universidade Federal de São Paulo, Departamento de Geografia, São Paulo, Brasil. td.martins@unifesp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1213-1441>

⁵ Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia, São Paulo, Brasil. biancavc@usp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7060-2830>

Recebido: 09/06/2025; Aceito: 09/12/2025; Publicado: 15/12/2025.

Resumo: Em fevereiro de 2023, o município de São Sebastião (SP) foi fortemente afetado por um evento extremo de precipitação que deflagrou centenas de escorregamentos rasos nas vertentes da Serra do Mar, evidenciando a necessidade de cartografias de perigo em maior detalhe. O objetivo desta pesquisa foi avaliar quantitativamente o perigo aos elementos expostos na bacia do rio Camburi, no município de São Sebastião. A suscetibilidade foi analisada através do modelo SHALSTAB, com bom desempenho (sensitividade 0,865; especificidade 0,457; escore F1 0,720), identificando áreas instáveis associadas, sobretudo, a limiares de precipitação até os 50mm/dia. O perigo foi estimado a partir do *Gravitational Process Path* (GPP), com desempenho razoável para o modelo com ambas as suas componentes acopladas (AAC-ROC=0,720). Assim, 69% da bacia possui perigo baixo ou muito baixo, e 8%, alto ou muito alto. Foram identificadas edificações em setores instáveis e em trajetórias de escorregamentos, evidenciando sobreposição entre ocupação irregular e risco geomorfológico.

Palavras-chave: SHALSTAB; Gravitational Process Path; Serra do Mar.

Abstract: In February 2023, the São Sebastião municipality (São Paulo State, Brazil) was hit by an extreme rainfall event that triggered hundreds of shallow landslides on the Serra do Mar slopes, outlining the necessity for detailed landslide hazard cartography. This research aims to quantitatively assess the hazard posed by landslides to the exposed elements of the Camburi river basin, located in São Sebastião. Susceptibility was evaluated through the SHALSTAB model, achieving good results (sensitivity = 0,865, specificity = 0,457, and F1-score = 0,720), allowing to identify unstable areas associated with rainfall thresholds up to 50mm/day. Hazard was assessed using the Gravitational Process Path (GPP) model, with reasonable accuracy for the final coupled model (ROC-AUC = 0,720). Approximately 69% of the basin was classified as low and very low hazard areas, with 8% associated with high and very high hazard zones. We were able to identify buildings located in areas classified as both unstable and in the landslide runout zones, highlighting the coupling between irregular land tenure and geomorphological risk.

Keywords: SHALSTAB; Gravitational Process Path, Serra do Mar.

1. Introdução

Os movimentos de massa se constituem como processos naturais que podem causar impactos significativos, levando a prejuízos econômicos, sociais e ambientais. A tendência de aumento nas fatalidades ao longo do último século reflete, principalmente, a expansão da ocupação humana em áreas propensas a ocorrência destes processos (Gómez; García; Aristizábal, 2023; Alcántara-Ayala, 2025). Embora o Brasil ocupe a vigésima posição em termos de densidade de movimentos de massa por quilômetro quadrado, figura em décimo primeiro lugar no ranking global quando se considera o número de mortes por milhão de habitantes (Gómez; García; Aristizábal, 2023). Considerando a vasta extensão territorial do país e a elevada densidade populacional nas regiões bastante afetadas — como a Serra do Mar, a Serra da Mantiqueira e a Serra Geral —, os dados sobre fatalidades se tornam ainda mais preocupantes.

Na Serra do Mar, a existência de vertentes de alta declividade com solos rasos, associada a chuvas prolongadas e com elevados totais pluviométricos, condiciona a ocorrência de frequentes eventos de movimento de massa (Avelar et al., 2013; Bonini et al., 2021; Bonini; Vieira; Martins, 2022; Kanji; Cruz; Massad, 2008). Entre 1928 e 2013, foram reportadas, aproximadamente, 3.330 fatalidades na Serra do Mar, em decorrência dos movimentos de massa, sendo cerca de 43% desse total ocorridas apenas entre 2000 e 2013 (Vieira; Gramani, 2015). Em fevereiro de 2023 os municípios de São Sebastião e Ilhabela, no Estado de São Paulo, foram severamente afetados por escorregamentos rasos, fluxos de detritos e inundações, que resultaram em 46 fatalidades, 1.686 desabrigados e 40 desaparecidos (Marengo et al., 2024), além de danos às infraestruturas e às atividades turísticas (Figura 1). Pesquisas anteriores demonstram que ao menos 585 escorregamentos foram deflagrados nesse evento (Bonini et al., 2025), sendo registrado um acumulado de precipitação de 626 mm em 24 horas (Marengo et al., 2024).

Desde 2014 o Serviço Geológico Brasileiro (SGB-CPRM) e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) têm empregado esforços para mapear a suscetibilidade a movimentos de massa e processos hidrodinâmicos e realizar a setorização de risco dos municípios brasileiros (Vieira et al., 2024). Os mapas de suscetibilidade a escorregamentos elaborados pela CPRM foram produzidos a partir de métodos estatísticos, considerando como fatores condicionantes a declividade, curvatura e densidade de lineamentos estruturais (IPT; CPRM, 2014). O mapeamento da suscetibilidade para o município de São Sebastião (CPRM, 2017), produzido em escala 1:25.000, demonstra que cerca de 53% da área do município está localizada em áreas mapeadas como de média a alta suscetibilidade a escorregamentos rasos, sendo que estas abrangem aproximadamente 4,5% da área urbanizada do município.

A análise da suscetibilidade a escorregamentos rasos representa uma etapa fundamental na avaliação de cenários de risco, pois indica a probabilidade espacial de ocorrência do processo em áreas não afetadas, mas que apresentam condições fisiográficas semelhantes, considerando diversos parâmetros morfológicos e hidrológicos (Corominas et al., 2013; Guzzetti et al., 1999). Entre os métodos empregados, destacam-se os modelos de base física, que se apoiam em uma abordagem determinística que permite quantificar valores críticos por meio de equações matemáticas derivadas de parâmetros físicos. Um desses modelos é o SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*), desenvolvido por Montgomery & Dietrich (1994), e que tem sido amplamente aplicado na Serra do Mar, com resultados positivos na definição da suscetibilidade, atrelada a um valor crítico de precipitação (Vieira; Ramos, 2015; Martins et al., 2016; Bonini et al., 2020).

No entanto, com o intuito de se analisar um cenário de risco, a partir da suscetibilidade a ocorrência do processo, faz-se necessária a elaboração de mapas de perigo. Entende-se como risco “o número esperado de vidas perdidas, pessoas feridas, danos às propriedades e perturbação das atividades econômicas devido a um fenômeno prejudicial, em uma determinada área e para um determinado período” (Varnes, 1984). As análises de risco resultam da interação entre o perigo, a vulnerabilidade dos elementos expostos e os danos potenciais decorrentes de um fenômeno natural (Hungry et al., 2001). Como etapa subsequente à análise da suscetibilidade, o mapeamento de perigo tem como objetivo identificar a probabilidade espacial e temporal da ocorrência de movimentos de massa, além de estimar sua trajetória e magnitude (Corominas et al., 2013).

No que tange a identificação de potenciais trajetórias de movimentos de massa, podem ser aplicados métodos empíricos (geomorfológicos e geométricos) e racionais (discretos ou contínuos). Métodos racionais discretos foram desenvolvidos para movimentos de massa que se deslocam individualmente (e.g. quedas de blocos), podendo ser baseados em geometrias simplificadas dos corpos em deslocamento (Agliardi; Crosta, 2003) ou em balística de corpos rígidos (Azzoni; Barbera; Zaninetti, 1995; Dorren; Kühne, 2016). Já os métodos racionais contínuos variam quanto a complexidade da simulação dos mecanismos de deslocamento dos movimentos de massa,

podendo ser: a) Modelos tridimensionais baseados em teoria de mistura que simulam todas as fases da matéria que compõem o material (sólida, líquida e gasosa) a partir de sistemas de equações matemáticas de mistura de fluidos; b) Modelos tridimensionais de velocidade-pressão, que analisam variações de poro-pressão e velocidade ao longo da trajetória; e c) Modelos bidimensionais por aproximação de profundidade, que assumem a pressão como hidrostática e estimam o deslocamento da massa ao longo de canais a partir de seqüências de simulação de profundidade (McDougall, 2017; Rickenmann, 2007).

Também é possível a utilização de métodos estocásticos para análise da trajetória de movimentos de massa (Gruber; Mergili, 2013; Mergili; Krenn; Chu, 2015; Mergili; Schwarz; Kociu, 2019), sendo possível combinar tais simulações com modelos de base física em uma estrutura conceitual adaptável a diferentes tipos de movimentos de massa. Neste último caso, pode-se enquadrar o modelo *Gravitational Process Path* (GPP) (Wichmann, 2017), que simula as trajetórias a partir de uma simulação estocástica e a propagação do material mobilizado com base em parâmetros físicos simplificados, como atrito basal, perda de massa e variabilidade direcional. Goetz et al., (2021) e Klade (2022) demonstraram a eficácia do modelo ao calibrarem seus parâmetros para contextos geomorfológicos específicos, obtendo resultados coerentes com suas observações em campo.

Apesar de seu potencial, o uso do GPP no Brasil ainda é restrito, especialmente no que diz respeito à sua otimização em áreas tropicais e à validação com base em eventos de movimentos de massa. Dessa forma, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o perigo a escorregamentos rasos em uma bacia hidrográfica no município de São Sebastião (SP), intensamente afetada pelos escorregamentos de 2023, a partir de um modelo de base física para a simulação de trajetórias, e identificar os elementos expostos (edificações) existentes na bacia.



Figura 1. Evento de fevereiro de 2023 no município de São Sebastião. Fonte: (a/b) Autores; (c) Fernando Marron/AFP; (d) André Luis Rosa/TV Vanguarda.

2. Área de Estudo

O município de São Sebastião, situado no litoral norte do estado de São Paulo, a aproximadamente 200 km da capital paulista, possui cerca de 82 mil habitantes distribuídos em uma área de 400 km² (IBGE, 2022). A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do Rio Camburi, que abrange o bairro homônimo, em São Sebastião. Com cerca de 37 km², essa bacia foi severamente afetada pelo evento pluviométrico extremo ocorrido em fevereiro de 2023, quando foram identificadas 51 cicatrizes de escorregamentos em encostas próximas às áreas ocupadas (Figura 2).

Em 2018, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) realizou o mapeamento de setores de risco no município, que identificou, no bairro Camburi, moradias localizadas próximas a taludes de corte e encostas naturais, caracterizadas por padrões construtivos que variam de bom a alto. A área foi subdividida em três setores, sendo dois vinculados ao Condomínio Sol Maior: um classificado com Risco Alto e outro como Setor de Monitoramento. O terceiro setor também recebeu a classificação de Setor de Monitoramento.

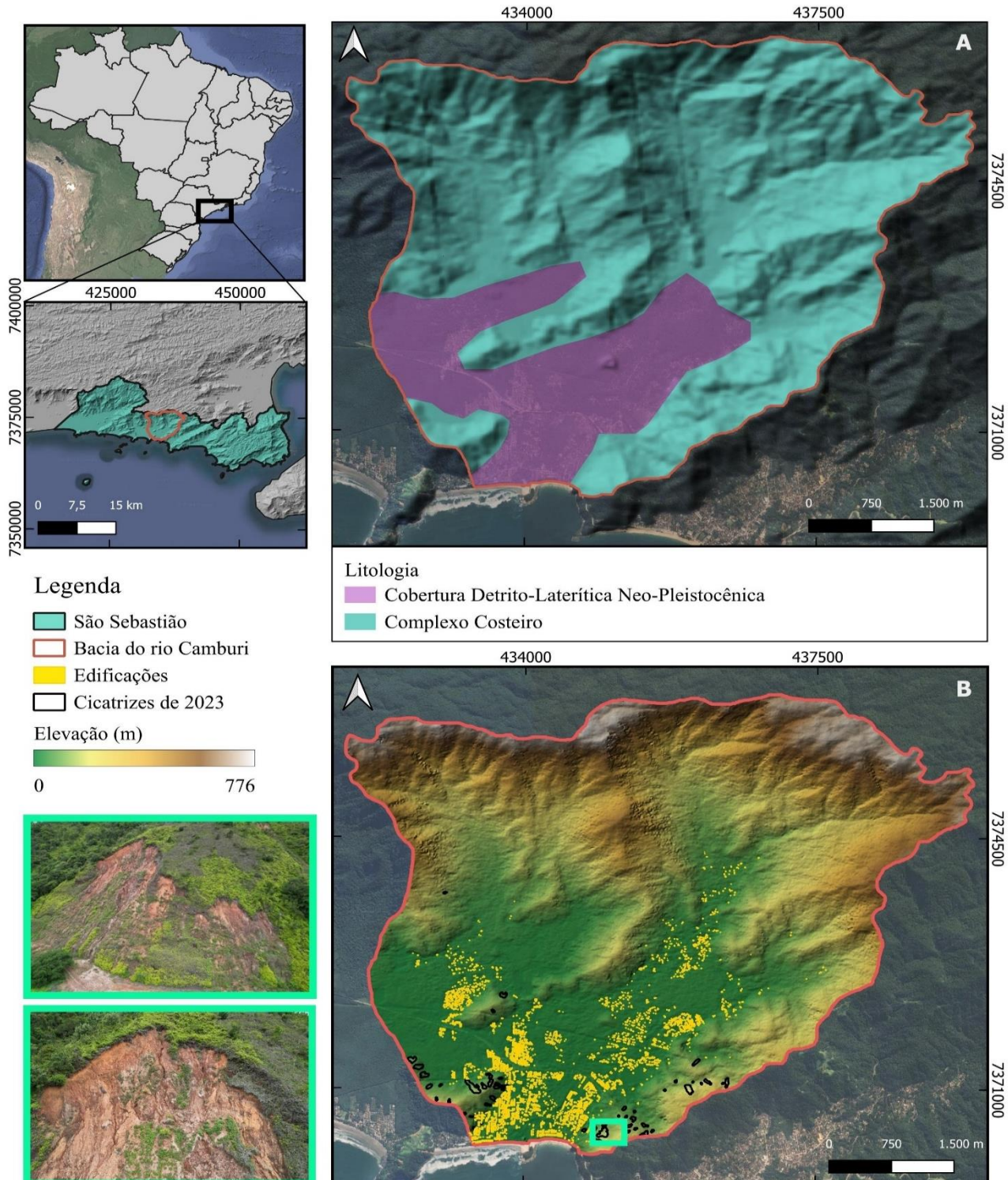


Figura 2. Localização da Área de Estudo. A) bacia hidrográfica do rio Camburi, com a indicação das unidades litoestratigráficas presentes; B) Representação hipsométrica da área da bacia, com a indicação das cicatrizes do evento de 2023 e das edificações presentes na área.

As unidades litoestratigráficas da bacia são divididas em dois domínios principais (IBGE, 2023): o complexo costeiro, datado no Neoproterozóico Criogeniano, composto por rochas cristalinas como granito, gnaisses e migmatitos; e por coberturas detriticas do Quaternário Pleistoceno Superior. A área pode ser dividida em três compartimentos geomorfológicos regionais: Serra do Mar, Planície Litorânea e o Patamar de Paraitinga. Quanto a pedologia destaca-se os cambissolos háplicos aluminicos com textura argilosa e média (IBGE, 2023).

Em São Sebastião, o trecho compreendido entre as praias de Boracéia e Maresias - onde localizam-se os bairros do Sahy e de Camburi, os mais afetados pelos movimentos de massa ocorridos em 2023 - destaca-se pelas elevadas taxas de pluviosidade, que variam entre 1.500 mm e 2.500 mm anuais. Essa faixa litorânea constitui a região mais úmida do estado de São Paulo (Monteiro, 1973), apresentando significativa influência orográfica na distribuição das chuvas (Pellegatti; Galvani, 2010).

3. Materiais e Métodos

3.1. Levantamento de dados

Os dados utilizados compreendem três categorias: a) dados de elevação; b) localização das ocorrências de escorregamentos de 2023; e c) uso da terra e elementos expostos. Dados de elevação foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) TanDEM-X (12m, acurácia vertical de 10m) (Krieger et al., 2013). As localizações dos escorregamentos do evento de 2023 foram coletadas no inventário de Bonini et al. (2025). O uso da terra foi analisado a partir de dados do MapBiomas Coleção 2 Beta (10m) (MapBiomas, 2025), enquanto os elementos expostos foram identificados a partir da base OpenStreetMap.

3.2. Mapa de suscetibilidade

Para a análise de suscetibilidade foi aplicado o modelo matemático de base física SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability Model) (Montgomery; Dietrich, 1994). Este modelo determina limiares críticos de precipitação diária para deflagração de escorregamentos rasos a partir da combinação de um modelo de estabilidade baseado no critério de ruptura de Mohr-Coulomb e de um modelo hidrológico de estado estacionário, tendo sido utilizado em diversas pesquisas na Serra do Mar (Vieira; Ramos, 2015; Martins et al., 2016; Vieira et al., 2018; Bonini et al., 2020; Pinho; Augusto Filho, 2022).

Para a definição da suscetibilidade a partir do SHALSTAB, na presente pesquisa, foram considerados valores mínimos e máximos das propriedades geotécnicas e hidrológicas, obtidos na literatura (Vieira; Ferreira; Gomes, 2015; Wolle, 1988). A cada iteração do modelo (1000 iterações), foi selecionado um valor dentro do intervalo definido para cada propriedade geotécnica e hidrológica (Tabela 1); o valor final de cada propriedade geotécnica foi definido como a média dos valores selecionados considerando todas as iterações, resultando no mapa final de suscetibilidade.

O SHALSTAB indica seis classes de estabilidade. Considerou-se nesta pesquisa como instáveis desde a classe Incondicionalmente Instável até a classe com o limiar crítico de precipitação de até 50mm/dia, que juntamente com o inventário de cicatrizes permitiu a produção de uma matriz de confusão para a obtenção das seguintes métricas de qualidade do modelo: a) sensibilidade (proporção de áreas corretamente classificadas como instáveis em relação ao total de áreas instáveis); b) especificidade (proporção de áreas corretamente classificadas como instáveis em relação ao total de áreas estáveis); e c) o escore F1 (média harmônica entre a precisão e a sensibilidade do modelo). Justifica-se esta escolha de classes pela necessidade de se estabelecer a qualidade do mapeamento destas áreas, pois estas foram as utilizadas na etapa seguinte como potenciais áreas de iniciação de escorregamentos para estimação das trajetórias e velocidades do processo.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos e hidrológicos utilizados para as iterações no modelo de suscetibilidade.

Propriedade geotécnica/hidrológica	Valor mínimo	Valor máximo	Referência
Densidade do solo (g/cm ³)	1.46	1.74	Wolle (1988)
Profundidade do solo (m)	0	2.5	
Condutividade hidráulica saturada (m/h)	0.00036	0.36	Vieira, Ferreira, Gomes (2015)
Ângulo de fricção interna (graus)	25	37	
Coesão efetiva (MPa)	0	0.011	

3.3. Simulação de trajetórias e mapeamento do perigo

A análise de perigo consistiu na estimação das potenciais trajetórias e velocidades de escorregamentos rasos com o modelo GPP (Wichmann, 2017), que possui dois módulos principais em sua estrutura: um para a definição de potenciais trajetórias a partir do método estocástico Random Walks, empregado em outros modelos de trajetória de movimentos de massa (Mergili et al., 2015; Mergili, Schwarz; Kociu, 2019); e o segundo para restringir as trajetórias possíveis a partir da simulação da fricção do material na superfície. Uma vez que o GPP permite a simulação de diferentes tipos de movimentos de massa, diferentes modelos de fricção estão disponíveis, sendo recomendado na literatura a utilização do modelo de fricção baseado em dois parâmetros para a simulação de escorregamentos rasos (PCM) (Perla; Cheng; Mcclung, 1980).

Neste trabalho, os dois módulos do GPP foram otimizados em um experimento fatorial completo realizado em duas etapas, seguindo uma abordagem adaptada de Goetz et al. (2021). Na primeira, foram otimizados os valores da simulação Random Walks, realizando inicialmente um primeiro experimento para identificar valores ótimos de cada um dos três parâmetros, seguida de outro experimento para avaliar a sensibilidade a pequenas variações nos valores de parâmetros identificados como mais importantes para o sucesso da simulação.

Na segunda etapa, os dois parâmetros do modelo de fricção foram otimizados realizando todas as combinações possíveis de valores. Ambas as etapas foram realizadas em uma área de teste e com valores de parâmetros dentro de um intervalo obtido na literatura (Tabela 2) (Goetz et al., 2021; Klade, 2022).

A aderência das simulações às áreas mapeadas no inventário foi avaliada a partir da Área Abaixo da Curva Receiver Operating Characteristics (AAC-ROC) (Zweig; Campbell, 1993). A parametrização ótima do modelo com ambos os módulos acoplados foi definida como aquela com maior valor de AAC-ROC. Por fim, foram computadas com estes parâmetros as trajetórias e velocidades de escorregamentos para toda a área de estudo, considerando como áreas de iniciação dos processos os terrenos com limiar crítico de precipitação de até 50mm/dia determinados pelo SHALSTAB. O mapa de frequência de trajetórias foi classificado em cinco classes de perigo (muito baixa, baixa, média, alta e muito alta), contendo, cada classe, 20% das trajetórias simuladas.

Tabela 2. Dados de entrada para a otimização das simulações de trajetória e velocidade.

	Dados de entrada	Valor	Descrição	Fonte
	MDE	-	Modelo digital de elevação	(Krieger et al., 2013)
	Áreas de iniciação	-	Áreas de liberação codificadas por IDs inteiros exclusivos, todas as outras células <i>NoData</i>	(Bonini et al., 2025)
Random Walk	Limiar de inclinação (°)	20 - 40	Determina a permissividade do fluxo divergente.	(Wichmann, 2017)
	Expoente de divergência	1.0 - 2.8	Responsável pelo controle da dispersão lateral.	
	Fator de persistência	1.0 - 1.5	Influencia a continuidade da trajetória do escorregamento.	
PCM	Coeficiente de fricção (μ)	0.2 - 0.8	Resistência basal ao movimento (controla o quanto o solo freia o fluxo)	
	Razão entre massa e resistência ao arrasto (M/D)	100 - 200	Inércia do fluxo em relação ao arrasto (mede a tendência de continuar em movimento).	

3.4. Elementos expostos

Para a análise dos elementos expostos, em um primeiro momento, foram analisadas as classes de uso do solo, mapeadas a partir da base do MapBiomas. Posteriormente, foram identificadas as edificações existentes na bacia do Camburi, conforme a base do OpenStreetMap, sendo a localização das edificações relacionada às classes das frequências de trajetórias. Os elementos considerados ameaçados foram aqueles localizados em áreas classificadas como de perigo alto e muito alto.

4. Resultados

4.1. Modelo de suscetibilidade

O modelo de suscetibilidade apresentou desempenho satisfatório na identificação dos escorregamentos registrados no inventário, alcançando sensibilidade de 0.865, especificidade de 0.457 e escore F1 de 0.720. Esse resultado pode estar relacionado às iterações de amostragem incorporadas ao modelo, que consideram os valores mínimos e máximos das propriedades geotécnicas e hidrológicas, permitindo sua variação dentro de um intervalo definido com base na literatura especializada. O valor máximo assumido pelo limiar crítico de precipitação para deflagração de escorregamentos rasos calculado pelo SHALSTAB foi de 218mm/dia, não havendo células na classe de limiares acima dos 400mm/dia (Figura 3). Aproximadamente 35% e 24% da área foi considerada, respectivamente, como incondicionalmente estável e incondicionalmente instável (Figura 4). Há uma predominância da classe entre zero e 50mm/dia (31%), com aproximadamente 6% da área com limiares entre 50 e 100mm/dia, 3% com limiares entre 100 e 200mm/dia e 0.15% com limiares entre 200 400mm/dia.

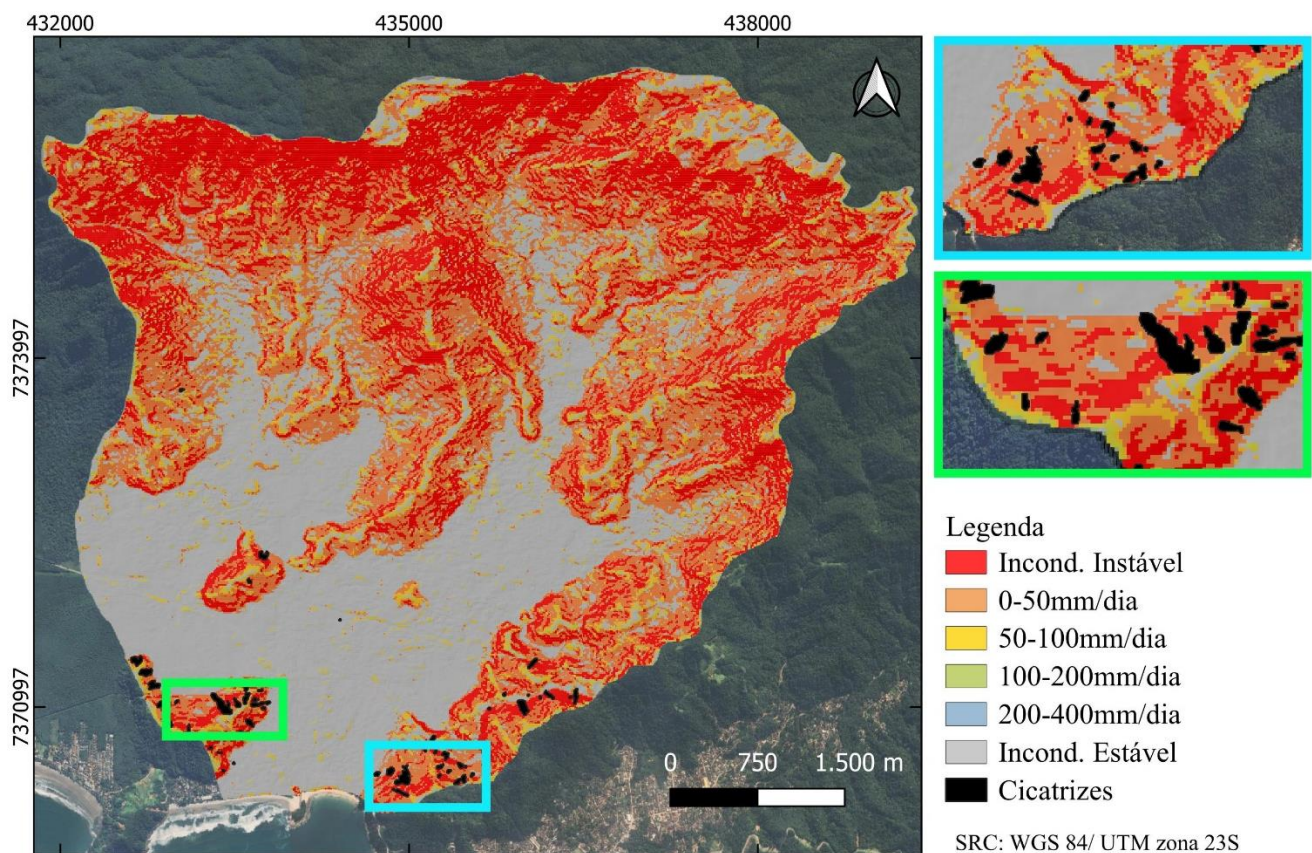


Figura 3. Mapa de suscetibilidade da bacia do rio Camburi.

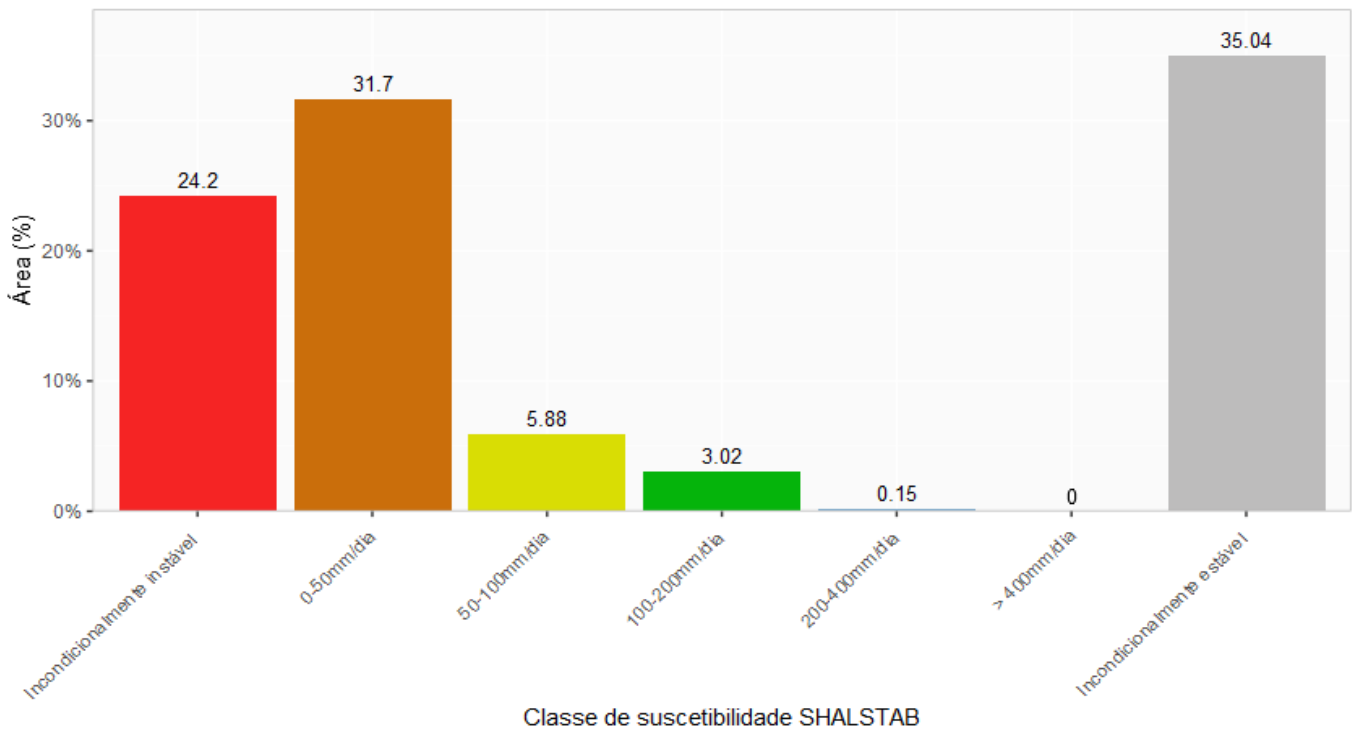


Figura 4. Distribuição das classes de suscetibilidade na bacia.

4.2. Simulação de trajetórias

Durante a otimização do GPP, foram geradas 102 combinações para o módulo de trajetórias potenciais. Inicialmente, 90 combinações únicas de parâmetros foram geradas. Este experimento inicial mostrou maior sensibilidade a variações do limiar de ângulo e do expoente de divergência, com menor influência do fator de persistência (Figura 5a). Os piores valores de AAC-ROC (i.e., abaixo de 0.500) foram obtidos com valores de limiar de ângulo abaixo de 30°, enquanto os melhores resultados foram obtidos para modelos com limiares de 35° (AAC-ROC = 0.604) e 40° (AAC-ROC = 0.628) (Figura 5a). Quanto ao expoente de divergência, os resultados do primeiro experimento não permitiram isolar sua influência. Logo, na segunda etapa de otimização do módulo de trajetórias potenciais o limiar de ângulo foi variado no intervalo identificado com melhores resultados (35 a 40°), expoente de divergência entre 1.0 e 2.0 com incrementos regulares de 0.2 e fator de persistência fixado em 1.5, resultando em outras doze combinações (Figura 5b). Os resultados deste procedimento permitiram identificar valores ótimos de 35° para o limiar de ângulo e 1.0 para o expoente de divergência (AAC-ROC = 0.854).

Para otimização do segundo módulo do GPP, correspondente ao modelo de fricção PCM, foram realizadas 42 combinações únicas de parâmetros (Figura 5c), que possuem valores de AAC-ROC entre 0.465 e 0.720. Os resultados mostraram que o modelo PCM possui maior sensibilidade ao coeficiente de fricção que à razão massa/arrasto (Figura. 5c). O melhor resultado foi obtido com coeficiente de fricção igual a 0.20 e razão massa/arrasto igual a 180. Com os parâmetros otimizados (Tabela 3), foram calculadas as trajetórias potenciais de escorregamentos com áreas de iniciação associadas às células com limiar crítico de precipitação igual ou inferior a 50mm/dia (Figura 3).

Tabela 3. Valores otimizados do GPP

Módulo do GPP	Parâmetro	Valor otimizado
Trajetórias potenciais	Limiar de ângulo de inclinação	35
	Expoente de divergência	1
	Fator de persistência	1.5
Modelo de fricção PCM	Coeficiente de fricção	0.2
	Razão massa/arrasto	180

As velocidades máximas ao longo das trajetórias simuladas assumiram valores entre zero (áreas não atravessadas por nenhuma simulação) e 32 m/s, com média de 11 m/s e desvio padrão de 8.0 m/s. As velocidades mais elevadas e, portanto, com maior potencial destrutivo, foram observadas em setores de alta encosta associados às zonas de ruptura dos escorregamentos, enquanto velocidades terminais foram observadas em zonas próximas ou diretamente nos fundos de vale (Figura 6). A distribuição de área da frequência de trajetórias simuladas mostrou tendência inversamente proporcional à convergência das trajetórias (Figura 7). Em aproximadamente 92% da bacia as células são atravessadas por menos de 50% das trajetórias potenciais, enquanto áreas afetadas em mais de 80% das trajetórias possíveis correspondem a menos de 1% da área total, sobretudo associadas a zonas de iniciação em setores de alta e média encosta e em fundos de vale onde o material deslizado tende a se depositar.

O mapa final de perigo, elaborado com base na frequência das trajetórias, mostra que 40% da área da bacia está classificada como de perigo baixo, seguida por 29% e 22% nas classes de perigo muito baixa e intermediária, respectivamente. Já o perigo alto abrange 6% da área da bacia, enquanto o perigo muito alto apenas 2%.

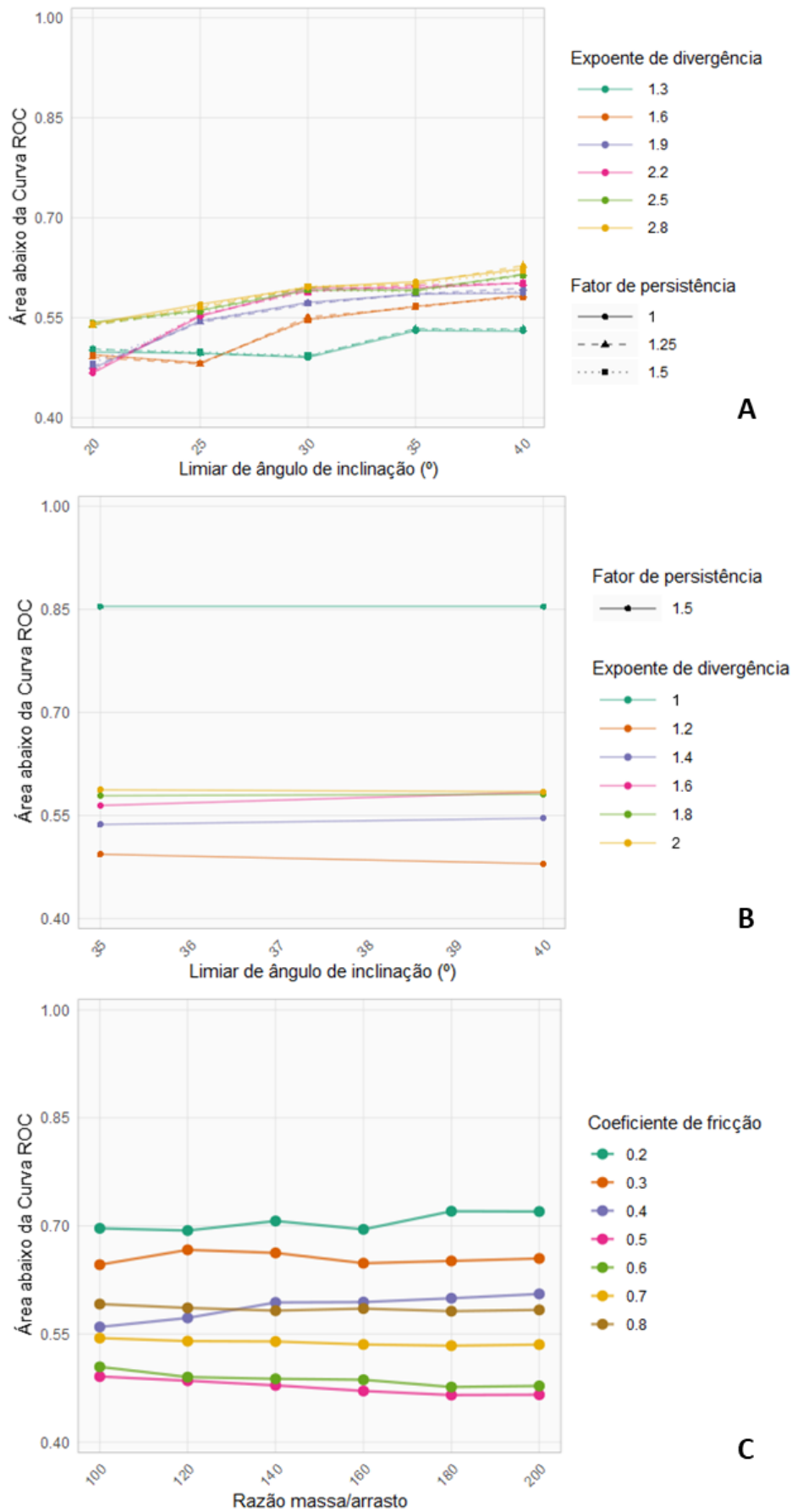


Figura 5. (a/b) Variação da AAC-ROC no módulo Random Walks. (c) variação da AAC-ROC no módulo PCM.

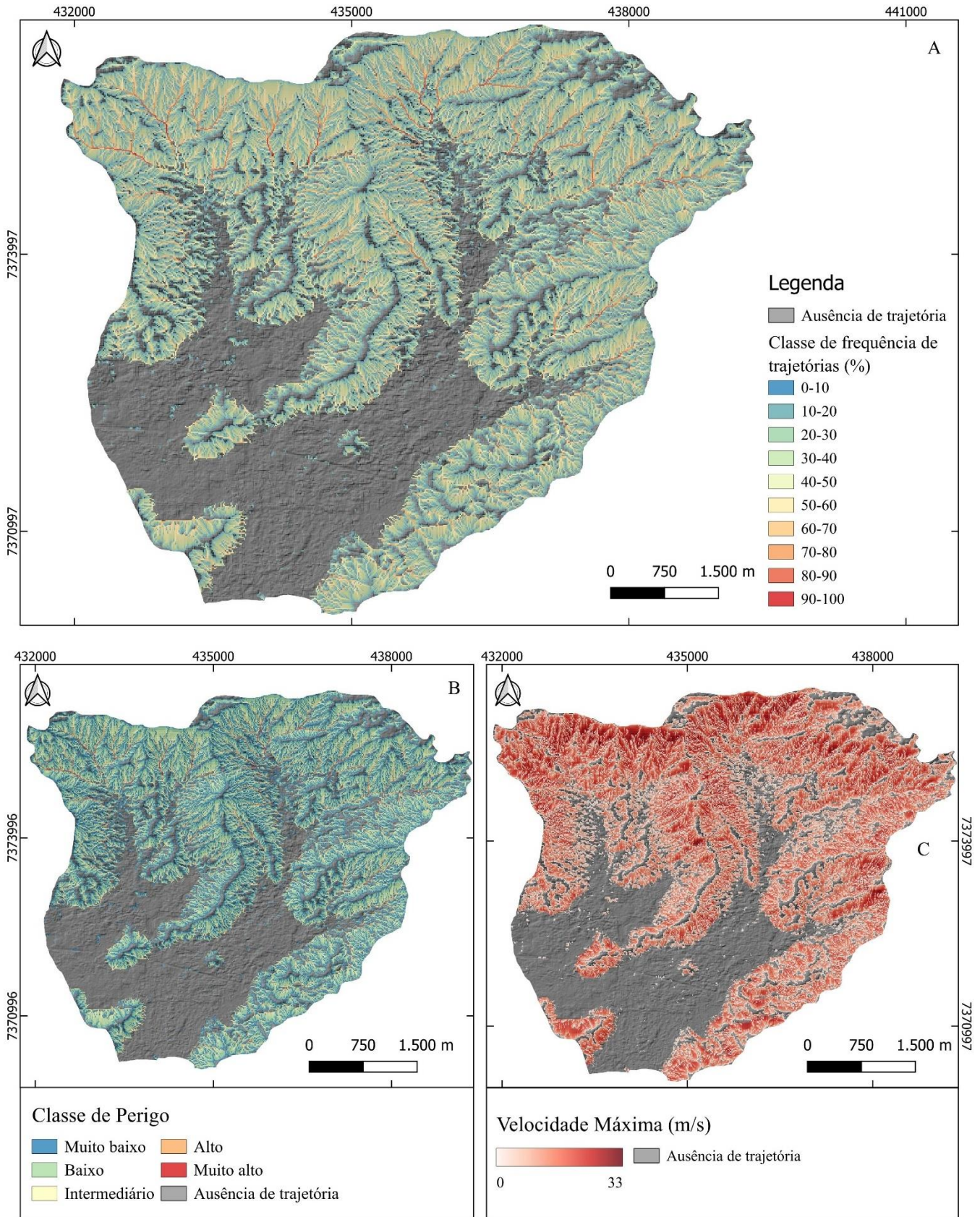


Figura 6. (a) Frequência de trajetórias normalizada e reclassificada; (b) Mapa de perigo classificado; (c) Velocidade máxima ao longo das trajetórias.

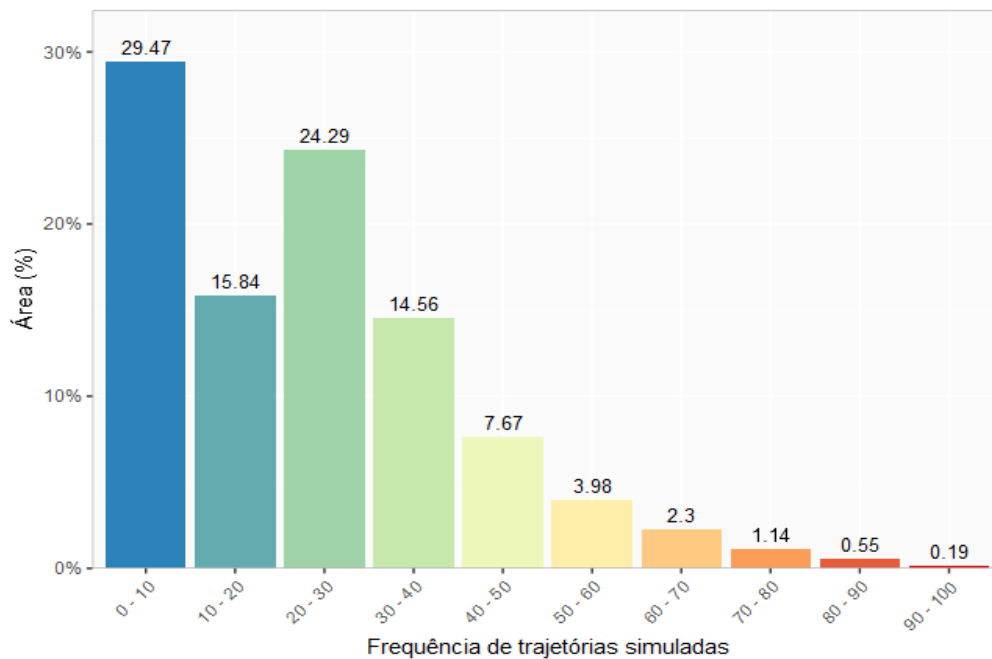


Figura 7. Área ocupada por cada classe do mapa de frequência de trajetórias simuladas.

4.3. Elementos expostos

Em relação ao uso do solo a classe de Formação Florestal ocupa a maior área da Bacia do Camburi, aproximadamente 76%, estando localizada principalmente nas vertentes íngremes da Serra do Mar e no Patamar de Paraitinga. As classes de Vegetação de Restinga, Área Urbana e Mosaico de Usos abrangem partes significativas da Planície Litorânea, ocupando 15,8%, 4,9% e 2,56% da área da bacia, respectivamente. As demais classes existentes abrangem uma área inferior a 0,3% da área da Bacia do Camburi. Já em relação aos elementos expostos, foram identificadas 3.667 edificações na bacia, localizadas, sobretudo na Planície Litorânea (91%) e nas vertentes da Serra do Mar (9%).

O resultado da suscetibilidade demonstra que as áreas mais suscetíveis estão localizadas, sobretudo, em áreas abrangidas pela classe de Formação Florestal (Figura 9). O mesmo ocorre com as classes de perigo (muito baixa a muito alta) que ocorrem, com maior frequência, nesta mesma classe de uso de solo. Já para as classes de uso do solo de Vegetação Restinga, Área Urbana e Mosaico de Usos, a classe de suscetibilidade abrangida é a incondicionalmente estável, enquanto em relação as classes de perigo, estas áreas estão localizadas majoritariamente em área de perigo inexistente, ou seja, locais não abrangidos pelas trajetórias simuladas.

Em relação às edificações, a grande maioria encontra-se localizada em áreas classificadas como de suscetibilidade incondicionalmente estável (94,4%), sendo que apenas 1,28% (47 edificações) encontram-se em área mapeada como incondicionalmente instável. Para a classe de suscetibilidade até 50 mm/dia foram identificadas 113 edificações (3,08%), enquanto para as classes de 50 a 100 mm/dia e 100 a 200 m/dia encontram-se apenas 0,9% (33) e 0,33% (12) das edificações (Figura 8).

Da mesma forma, aproximadamente 89,4% da área ocupada pelas edificações estão localizadas em área de perigo inexistente. Entretanto, 3,12 % da área das edificações está localizada na classe de perigo muito baixo, 4,53 % na classe de baixa e 2,38% na classe moderada. Apenas 0,57 % da área das edificações abrange as classes de perigo alta (0,55%) e muito alta (0,02%). Ressalta-se que uma mesma edificação pode ocupar áreas com diferentes graus de perigo.

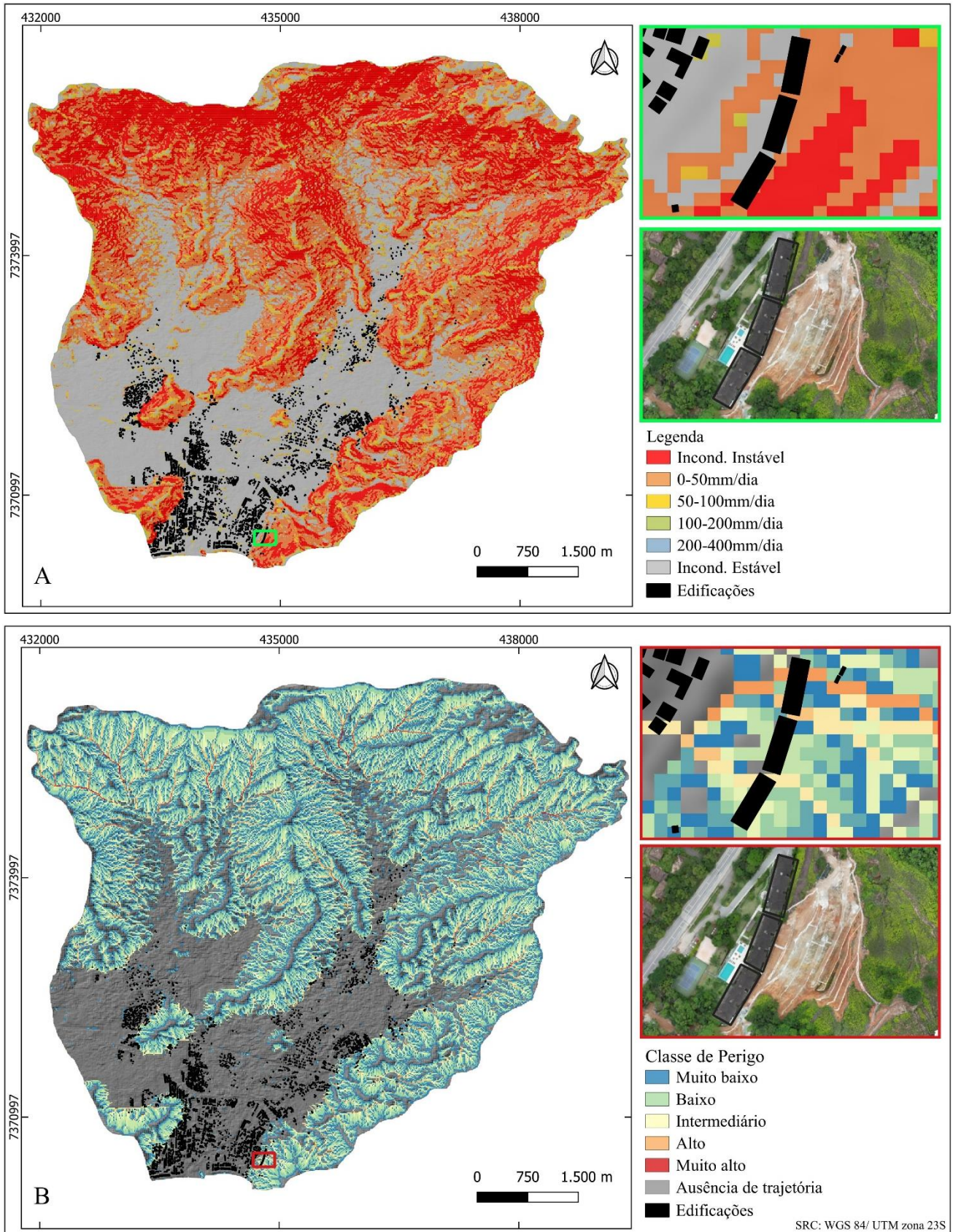


Figura 8. (a) Classes de suscetibilidade e edificações; (b) Classes de perigo e edificações.

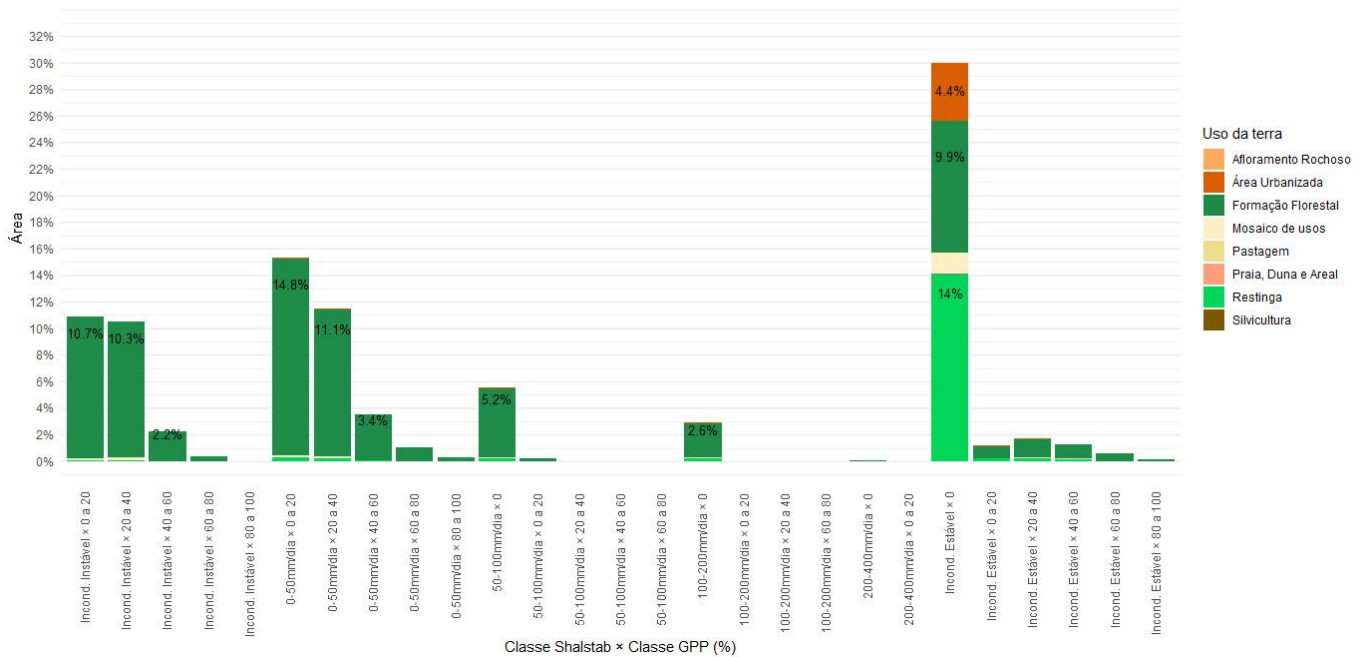


Figura 9. Classes do SHALSTAB e de frequência de trajetórias em relação ao uso do solo.

5. Discussão

5.1 Shalstab

O modelo foi considerado satisfatório na identificação das áreas suscetíveis à escorregamentos, apesar do seu valor de especificidade que indica um número significativo de falsos positivos, ou seja, áreas estáveis classificadas como instáveis. Entretanto, este valor pode ser justificado uma vez que as cicatrizes estão concentradas na porção sul da bacia e ocupam uma área mínima quando comparada à área total de aplicação do modelo. Apesar disso, o escore F1 demonstra um equilíbrio entre precisão e recall, reforçando a utilidade do modelo para mapeamento da suscetibilidade.

Os baixos valores de coesão, como já demonstrado por Guimarães (2000), reforçam a predominância do controle topográfico na deflagração dos escorregamentos. Como não havia dados distribuídos espacialmente sobre as propriedades do solo, a simplificação do modelo com coesão próxima a zero demonstrou-se metodologicamente mais adequada, permitindo que o SHALSTAB, que privilegia o controle topográfico, operasse com maior eficiência. Em contrapartida, os ângulos de atrito utilizados tiveram média relativamente alta, ajudando a controlar a superestimação das áreas instáveis. Os valores de condutividade hidráulica saturada refletem os desafios associados à alta variabilidade espacial deste parâmetro, devido à ausência de dados distribuídos espacialmente e às descontinuidades hidráulicas em profundidades críticas (entre 1 m e 2,5 m), (Vieira; Ferreira; Gomes, 2015). A profundidade do solo obteve baixa variação entre os parâmetros testados, que pode ser justificada pela ocorrência majoritária dos cambissolos na bacia.

As áreas classificadas como incondicionalmente instáveis estão concentradas, majoritariamente, nas altas encostas da Serra do Mar, em altitudes superiores a 400 metros, onde predominam declividades acentuadas e o uso e cobertura do solo é dominado por formações florestais. Esses setores também coincidem com a ocorrência de cambissolos, que são solos rasos e mal desenvolvidos, características que favorecem a infiltração rápida da água e, conseqüentemente, a instabilidade das encostas. Já as áreas de suscetibilidade mais próximas às zonas de ocupação estão associadas a limiares críticos de precipitação de até 100 mm/dia, estendem-se por aproximadamente 200 metros e ocorrem, em sua maioria, sobre cambissolos.

Uma das limitações do modelo refere-se à definição das classes de suscetibilidade por meio dos limiares de precipitação. No presente estudo, uma extensa área foi classificada como suscetível sob chuvas de até 50 mm/dia. Contudo, considerando que a área de estudo apresenta uma precipitação anual que pode alcançar 2.500 mm, é comum que eventos de 50 mm/dia sejam recorrentes ao longo do ano, sem que, necessariamente, resultem em

escorregamentos. Estudos anteriores na Serra do Mar já ressaltaram essa tendência de superestimação de áreas instáveis, que é justificada pelo fato do SHALSTAB modelar o potencial de instabilidade com base em condições idealizadas e generalizadas, dependentes da topografia e com simplificações hidrológicas (Bonini et al., 2020; Guimarães, 2000; Vieira et al., 2018; Vieira; Ramos, 2015). A acurácia do modelo também é limitada pela dificuldade de obtenção de dados detalhados e espacialmente distribuídos sobre propriedades do solo, cobertura vegetal e dinâmica hídrica local. Ainda assim, tendo em vista a necessidade de inserir os valores de precipitação na modelagem do perigo, o modelo se mostrou adequado em relação a outras abordagens que requerem séries históricas de precipitação e que nem sempre estão disponíveis.

5.2. Gravitational Process Path – GPP

O fator de persistência influencia o quão diretamente a trajetória simulada segue a direção anterior, simulando a inércia do material em movimento. Portanto, diante de sua pouca variação nas simulações realizadas, entende-se que as trajetórias analisadas tendem a seguir uma trajetória contínua e com poucas mudanças abruptas de direção, já que percorrem as encostas íngremes da Serra do Mar onde a geometria do relevo orienta fortemente os deslocamentos. O limiar do ângulo de inclinação é responsável pela definição do percurso do fluxo, permitindo ou não, maiores áreas de espalhamento lateral. Portanto, os melhores valores de AAC-ROC para maiores ângulos de inclinação demonstram que as trajetórias não tendem a seguir necessariamente a célula com menor declive, espalhando-se lateralmente com certa frequência e, por consequência, aumentando a área do processo. Diante desses resultados o expoente de divergência, que controla a probabilidade do material se espalhar lateralmente, especialmente em áreas de menor inclinação, obteve um valor ótimo mais baixo, equilibrando o alto valor do limiar de ângulo de inclinação (Wichmann, 2017).

O coeficiente de atrito, principal responsável pelo comportamento do processo ao longo das trajetórias, determina o ponto de parada do material e o início da sua deposição. O valor ótimo encontrado foi de 0.2, aproximando-se do valor sugerido por Wichmann (2017) para lavouras, o que é coerente com as cicatrizes mapeadas, já que boa parte delas situa-se nas áreas cobertas pelos mosaicos de usos. Essa cobertura descontínua, aliada aos cambissolos pouco desenvolvidos e à alta declividade, facilita o deslocamento dos materiais e contribui para maior alcance da trajetória. Já a razão massa-arrasto influencia, principalmente, a velocidade em partes mais íngremes do percurso. Entretanto, essa razão tem pouca influência no cálculo das trajetórias, o que pode ser atribuído ao problema de unicidade desse parâmetro, que decorre da capacidade de diferentes combinações de μ e M/D produzirem a mesma distância de trajetória, o que introduz redundância matemática (Perla; Cheng; Mcclung, 1980).

Ressalta-se que as trajetórias simuladas pelo modelo GPP são geradas a partir de um mapa prévio de suscetibilidade a escorregamentos, que define as áreas de ruptura. Como os escorregamentos rasos tendem a apresentar trajetórias relativamente curtas em comparação com fluxos de detritos, os caminhos simulados pelo GPP permanecem, em grande parte, restritos às zonas previamente classificadas como instáveis pelo modelo de suscetibilidade. Dessa forma, a eficácia do GPP está diretamente condicionada à qualidade e precisão do modelo de entrada.

5.3. Elementos expostos

Aproximadamente 77% das edificações estão localizadas em área classificada como urbanizada, que representa locais com ocupação humana e superfícies construídas, ou seja, áreas identificadas como impermeabilizadas pelo mapeamento do MapBiomias. A Serra do Mar é predominantemente recoberta por áreas classificadas como Formação Florestal e abriga diversas unidades de conservação e áreas legalmente protegidas, como o Parque Estadual da Serra do Mar, Reservas de Mata Atlântica e Áreas de Preservação Permanente (APPs), em terrenos com alta declividade. Tais restrições legais visam impedir a ocupação dessas regiões ambientalmente sensíveis. Ressalta-se que essas áreas, marcadas por elevada declividade, também coincidem com zonas de maior suscetibilidade a escorregamentos. Neste contexto, foram identificadas ao menos 160 edificações situadas em área de suscetibilidade mapeada como incondicionalmente instável, mesmo sob condições de chuva inferiores a 50 mm/dia.

No que diz respeito ao perigo, observa-se que cerca de 5% das edificações se encontram em setores com alguma indicação de perigo, embora menos de 1% esteja localizada em áreas classificadas como de perigo alto ou

muito alto. Assim, entende-se que as construções tendem a ser afetadas por trajetórias específicas de escorregamentos, não coincidindo necessariamente com todas as zonas potenciais de ruptura. Ainda assim, mesmo diante de uma baixa recorrência da frequência das trajetórias, há a possibilidade de as edificações serem atingidas por eventos esporádicos, que podem apresentar elevado potencial de impacto.

Embora a maioria das edificações esteja situada em áreas classificadas como de perigo inexistente ou baixo, predominantemente em setores de planície, é relevante destacar que, em eventos extremos, são comuns os processos complexos, nos quais escorregamentos podem desencadear fluxos de detritos e lama, ampliando significativamente a área de impacto. No entanto, este trabalho não contemplou a modelagem ou análise desses fluxos, o que representa uma restrição na avaliação completa dos perigos associados.

Ao comparar as classes de suscetibilidade com os setores mapeados como área de risco pelo IPT em 2018, na bacia do rio Camburi, observa-se que o Setor 1, classificado como R3, é definido como incondicionalmente instável pelo SHALSTAB, assim como o Setor 2, classificado como área de monitoramento. Já o Setor 3, também classificado como monitoramento, está contido na classe de instabilidade com limiar de precipitação para deflagração de escorregamentos de até 50mm/dia. Em relação ao perigo, os setores mapeados pelo IPT estão inseridos em área classificadas como de perigo baixo a médio, enquanto há outros locais na classe de perigo alto, que não foram classificados formalmente como setores de risco pelo órgão.

6. Conclusão

Os escorregamentos são processos naturais que se tornam ameaças quando ocorrem em áreas próximas à ocupação humana. Por isso, torna-se fundamental o uso de ferramentas capazes de mapear a suscetibilidade e o perigo a estes fenômenos com o intuito de orientar medidas preventivas. Neste estudo, os modelos empregados para a análise da suscetibilidade e do perigo foram considerados satisfatórios. Entretanto, é importante ressaltar que tais modelos possuem limitações significativas devido à ausência de dados hidrológicos e geotécnicos espacialmente distribuídos que diminuem sua eficiência. Ademais, a pesquisa evidenciou a viabilidade da calibração de modelos por meio de procedimentos estatísticos, destacando sua praticidade na definição de parâmetros ótimos para modelos ainda pouco utilizados no Brasil como é o caso do *Gravitational Process Path*.

Em relação aos elementos expostos, embora a diferença seja discreta, o grau de perigo associado às edificações é superior à sua suscetibilidade, o que indica que a trajetória dos escorregamentos exerce influência mais significativa do que o local de sua ruptura. O baixo número de elementos expostos ao perigo pode, em parte, ser atribuídos ao fato de que a calibração do modelo foi direcionada especificamente para a previsão da trajetória de escorregamentos rasos. No entanto, em eventos extremos, é comum a ocorrência de processos em cadeia, nos quais escorregamentos iniciais podem desencadear fluxos subsequentes de detritos.

A rotina de trabalho adotada e os resultados apresentados poderão contribuir para futuras análises de perigo no município de São Sebastião e em outras áreas da Serra do Mar. Além disso, a análise dos elementos expostos poderá contribuir para a elaboração de medidas preventivas na bacia do rio Camburi.

Contribuição dos autores: Concepção e metodologia S.B.C. B.C.V. e J.E.B.; coleta de dados e análise formal: S.B.C., M.T.S.O. e J.E.B.; redação do manuscrito: S.B.C.; redação e revisão: M.T.S.O., J.E.B., T.D.M. e B.C.V.; revisão crítica: M.T.S.O., J.E.B., T.D.M. e B.C.V.; aprovação final do manuscrito: todos os autores. Todos os autores leram e concordaram com a versão final do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pelo CNPq, por meio de recursos concedidos pela Chamada Universal (Processos: 409314/2023-4; 305371/2023-1); pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Processos: #2021/04621-6, #2024/01662-1 e #2022/0132-6); e pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo (PPGF).

Agradecimentos: Agradecemos aos revisores deste artigo pelas contribuições; à Defesa Civil de São Sebastião pelo apoio técnico e logístico durante o trabalho de campo; e ao e ao Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

1. AGLIARDI, F; CROSTA, G. B. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 40, no 4, p. 455–471, 2003.
2. ALCÁNTARA-AYALA, Irasema. Landslides in a changing world. *Landslides*, 15 jan. 2025. DOI: 10.1007/s10346-024-02451-1.
3. AVELAR, André S.; NETTO, Ana L. Coelho; LACERDA, Willy A.; BECKER, Leonardo B.; MENDONÇA, Marcos B. Mechanisms of the Recent Catastrophic Landslides in the Mountainous Range of Rio de Janeiro, Brazil. *Landslide Science and Practice*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 265–270. DOI: 10.1007/978-3-642-31337-0_34.
4. AZZONI, A; BARBERA, G. L; ZANINETTI, A. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, vol. 32, p. 709–724, 1995.
5. BONINI, José Eduardo; BATEIRA, Carlos Valdir de Meneses; DIAS, Vivian Cristina; MARTINS, Tiago Damas; VIEIRA, Bianca Carvalho. Suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir de parâmetros morfométricos e dos modelos SHALSTAB e do Valor Informativo. *Confins*, vol. 46, 2020. DOI:10.4000/confins.30323.
6. BONINI, José Eduardo; SANCHES ROSS, Jurandyr Luciano; MARTINS, Tiago D.; VIEIRA, Bianca Carvalho. Escorregamentos rasos em São Luiz do Paraitinga (SP, Brasil) (2009-2010). *Physis Terrae - Revista Ibero-Afro-Americana de Geografia Física e Ambiente*, vol. 2, no 2, p. 85–99, 27 jan. 2021. DOI:10.21814/physisterrae.3076.
7. BONINI, José Eduardo; MARTINS, Tiago Damas; SUGIYAMA, Marina Tamaki de Oliveira; VIEIRA, Bianca Carvalho. Landslide inventory of the 2023 Serra do Mar disaster (Brazil). *Discover Geoscience* 2025 3:1, vol. 3, no 1, p. 1–17, 22 abr. 2025. DOI 10.1007/S44288-025-00153-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44288-025-00153-2>. Acessado em: 28 abr. 2025.
8. BONINI, José Eduardo; VIEIRA, Bianca Carvalho; MARTINS, Tiago Damas. Semiautomatic inventory and geomorphological characterization of mass movements using high-resolution images and open-source software in the Ribeira de Iguape Valley, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 119, p. 104029, nov. 2022. DOI: 10.1016/j.jsames.2022.104029.
9. CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, vol. 8, no 7, p. 1991–2007, 7 jul. 2015. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.
10. COROMINAS, J.; VAN WESTEN, C.; FRATTINI, P.; CASCINI, L.; MALET, J.-P.; FOTOPOULOU, S.; CATANI, F.; VAN DEN EECKHAUT, M.; MAVROULI, O.; AGLIARDI, F.; PITILAKIS, K.; WINTER, M. G.; PASTOR, M.; FERLISI, S.; TOFANI, V.; HERVÁS, J.; SMITH, J. T. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 24 nov. 2013. DOI:10.1007/s10064-013-0538-8.
11. DO PINHO, Thiago Machado; AUGUSTO FILHO, Oswaldo. Landslide susceptibility mapping using the infinite slope, SHALSTAB, SINMAP, and TRIGRS models in Serra do Mar, Brazil. *Journal of Mountain Science*, vol. 19, n° 4, p. 1018–1036, 13 abr. 2022. DOI:10.1007/s11629-021-7057-z.
12. CPRM - GEOLOGICAL SURVEY OF BRAZIL. Maps of Susceptibility to Gravitational Movements 1:25,000. Explanatory Technical Note. Bitar, OY (Org), 2017.
13. DORREN, L; KÜHNE, R. Comparing the 3D rockfall simulation models Rockyfor3D and RAMMS: ROCKFALL at a case study site in Switzerland. *INTERPRAEVENT 2016 – Extended Abstracts*, p. 2–3, 2016.
14. FERNANDES, Nelson F.; GUIMARÃES, Renato F.; GOMES, Roberto A.T.; VIEIRA, Bianca C.; MONTGOMERY, David R.; GREENBERG, Harvey. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. *CATENA*, vol. 55, no 2, p. 163–181, jan. 2004. DOI:10.1016/S0341-8162(03)00115-2.

15. G1. Temporal devastador no litoral norte de SP completa um mês. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2023/03/19/temporal-devastador-no-litoral-norte-de-sp-completa-um-mes-confira-um-resumo-da-tragedia.ghtml>. Acessado em: 19 mar. 2025.
16. GOETZ, Jason; KOHRS, Robin; PARRA HORMAZÁBAL, Eric; BUSTOS MORALES, Manuel; ARANEDA RIQUELME, María Belén; HENRÍQUEZ, Cristián; BRENNING, Alexander. Optimizing and validating the Gravitational Process Path model for regional debris-flow runout modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 21, no 8, p. 2543–2562, 25 ago. 2021. DOI:10.5194/nhess-21-2543-2021.
17. GOMES, Roberto A. T.; GUIMARÃES, Renato F.; CARVALHO, Osmar A.; FERNANDES, Nelson F.; VARGAS, Eurípedes A.; MARTINS, Éder S. Identification of the affected areas by mass movement through a physically based model of landslide hazard combined with an empirical model of debris flow. *Natural Hazards*, vol. 45, no 2, p. 197, 1 maio 2008. DOI:10.1007/s11069-007-9160-z.
18. GÓMEZ, Derly; GARCÍA, Edwin F.; ARISTIZÁBAL, Edier. Spatial and temporal landslide distributions using global and open landslide databases. *Natural Hazards*, vol. 117, no 1, p. 25–55, 1 maio 2023. DOI:10.1007/s11069-023-05848-8.
19. GRUBER, F. E.; MERGILI, M. Regional-scale analysis of high-mountain multi-hazard and risk indicators in the Pamir (Tajikistan) with GRASS GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 13, no 11, p. 2779–2796, 7 nov. 2013. DOI: 10.5194/nhess-13-2779-2013.
20. GUIMARÃES, R. F. Utilização de um Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis a Escorregamentos Rasos com Controle Topográfico: Adequação e Calibração em Duas Bacias de Drenagem. 2000. 327 f. Tese de Doutorado – UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.
21. GUIMARÃES, Renato Fontes; MONTGOMERY, David R.; GREENBERG, Harvey M.; FERNANDES, Nelson Ferreira; TRANCOSO GOMES, Roberto Arnaldo; DE CARVALHO, Osmar Abílio. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology*, vol. 69, no 1–2, p. 99–108, abr. 2003. DOI:10.1016/S0013-7952(02)00263-6.
22. HUNGR, Oldrich; EVANS, S. G.; BOVIS, M. J.; HUTCHINSON, J. N. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, vol. 7, no 3, p. 221–238, 1 ago. 2001. DOI: 10.2113/gseegeosci.7.3.221.
23. IBGE. Censo de 2022. 2022. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm_source=ibge&utm_medium=home&utm_campaign=portal. Acessado em: 13 jan. 2024.
24. IBGE. Mapa geológico do Brasil. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html?=&t=downloads>. Acessado em: 19 jan. 2024.
25. IBGE. Mapa pedológico do Brasil. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html?=&t=downloads>. Acessado em: 19 jan. 2024.
26. IPT. Mapeamento de áreas de risco de movimentos de massa no município de São Sebastião, SP. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2018.
27. IPT - INSTITUTE OF TECHNICAL RESEARCH OF THE STATE OF SÃO PAULO; CPRM - GEOLOGICAL SURVEY OF BRAZIL. Maps of Susceptibility to Gravitational Movements 1:25,000. Explanatory Technical Note, Bitar, OY (Org), p. 53, 2014.
28. JONES, Fred O. Landslides of Rio de Janeiro and the Serra das Araras escarpment, Brazil. [S. l.: s. n.], 1973. DOI: 10.3133/pp697.
29. KANJI, Milton A.; CRUZ, Paulo T.; MASSAD, Faiçal. Debris flow affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil. *Landslides*, vol. 5, no 1, p. 71–82, 28 fev. 2008. DOI: 10.1007/s10346-007-0110-3.

30. KLADE, Martina. Reichweitenmodellierung von flachgründigen Hangrutschungen mit dem Gravitational Process Path Model in ausgewählten Gemeinden des Steirischen Beckens. 2022. Masterarbeit – Universität Graz, 2022.
31. KRIEGER, Gerhard; ZINK, Manfred; BACHMANN, Markus; BRÄUTIGAM, Benjamin; SCHULZE, Daniel; MARTONE, Michele; RIZZOLI, Paola; STEINBRECHER, Ulrich; WALTER ANTONY, John; DE ZAN, Francesco; HAJNSEK, Irena; PAPATHANASSIOU, Kostas; KUGLER, Florian; RODRIGUEZ CASSOLA, Marc; YOUNIS, Marwan; BAUMGARTNER, Stefan; LÓPEZ-DEKKER, Paco; PRATS, Pau; MOREIRA, Alberto. TanDEM-X: A radar interferometer with two formation-flying satellites. *Acta Astronautica*, vol. 89, p. 83–98, ago. 2013. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.03.008.
32. MAPBIOMAS. Coleção 2 (beta) de Mapas Anuais de Cobertura e Uso da Terra do Brasil com 10 metros de resolução espacial. Disponível em: https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/lulc_10m/collection_2/integration/mapbiomas_10m_collection2_integration_v1-classification_2023.tif. Acessado em: 14 fev. 2025.
33. MARENGO, Jose A.; CUNHA, Ana P.; SELUCHI, Marcelo E.; CAMARINHA, Pedro I.; DOLIF, Giovanni; SPERLING, Vinicius B.; ALCÂNTARA, Enner H.; RAMOS, Andrea M.; ANDRADE, Marcio M.; STABILE, Rodrigo A.; MANTOVANI, José; PARK, Edward; ALVALA, Regina C.; MORAES, Osvaldo L.; NOBRE, Carlos A.; GONCALVES, Demerval. Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18th–19th, 2023, in the city of São Sebastião, São Paulo, Brazil: from meteorological causes to early warnings. *Natural Hazards*, vol. 120, no 8, p. 7997–8024, 28 jun. 2024. DOI: 10.1007/s11069-024-06558-5.
34. MARTINS, T; OKA-FIORI, C; VIEIRA, B; MONTGOMERY, D. Assessment of Lidar-derived DTMs for landslide susceptibility mapping: Application in the Brazilian subtropical forest. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*. [S. l.]: CRC Press, 2016. p. 1389–1392. DOI: 10.1201/b21520-170.
35. MARTINS, Tiago Damas; VIEIRA, Bianca Carvalho; FERNANDES, Nelson Ferreira; OKAFIORI, Chisato; MONTGOMERY, David R. Application of the SHALSTAB model for the identification of areas susceptible to landslides: Brazilian case studies. *Revista de Geomorfologie*, vol. 19, no 1, p. 136–144, 30 dez. 2017. DOI: 10.21094/rg.2017.015.
36. MCDOUGALL, Scott. 2014 Canadian Geotechnical Colloquium: Landslide runout analysis – current practice and challenges. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 54, no 5, p. 605–620, maio 2017. DOI: 10.1139/cgj-2016-0104.
37. MEIS, M.R.M; SIL, J.X. Considerações geomorfológicas a propósito dos movimentos de massa ocorridos no Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, vol. 30, no 1, 1968.
38. MERGILL, M.; KRENN, J.; CHU, H.-J. r.randomwalk v1, a multi-functional conceptual tool for mass movement routing. *Geoscientific Model Development*, vol. 8, no 12, p. 4027–4043, 16 dez. 2015. DOI: 10.5194/gmd-8-4027-2015.
39. MERGILL, Martin; SCHWARZ, Leonhard; KOCIU, Arben. Combining release and runout in statistical landslide susceptibility modeling. *Landslides*, vol. 16, no 11, p. 2151–2165, 1 nov. 2019. DOI: 10.1007/s10346-019-01222-7.
40. MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. A Dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo: estudo geográfico sob forma de atlas. São Paulo: Instituto de Geografia (USP), 1973.
41. MONTGOMERY, David R.; DIETRICH, William E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, vol. 30, no 4, p. 1153–1171, 9 abr. 1994. DOI: 10.1029/93WR02979.
42. O GLOBO. Após tragédia São Sebastião tenta evitar que moradores voltem a áreas de risco. 2023. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/noticia/2023/02/apos-tragedia-sao-sebastiao-tenta-evitar-que-moradores-voltem-a-areas-de-risco.ghtml>. Acessado em: 21 mar. 2025.
43. PAWLEY S. Rsagacmd: Linking R with the Open-Source “SAGA-GIS” Software. 2024. R package version 0.4.3. Disponível em: <https://stevenpawley.github.io/Rsagacmd/>. Acessado em: 6 mar. 2025.
44. PELLEGGATTI, Cesar Henrique Gonçalves; GALVANI, Emerson. Avaliação da precipitação na Serra do Mar - SP em eventos de diferentes intensidade e duração. *GEOUSP: espaço e tempo*, no 27, p. 147–148, 2010.

45. PERLA, R.; CHENG, T. T; MCCLUNG, D. M. A two-parameter model of snow-avalanche motion. *J. Glaciol.*, vol. 26, p. 197–207, 1980.
46. R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. 2021. R: A language and environment for statistical computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acessado em: 6 mar. 2025.
47. RICKENMANN, Dieter. Runout prediction methods. *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, [s. d.]. p. 305–324, 2007. DOI: 10.1007/3-540-27129-5_13.
48. VARNES, D.J. Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice. *Natural Hazards*, vol. Unesco, no Paris, 1984.
49. VIEIRA, Bianca Carvalho; FERNANDES, Nelson Ferreira; AUGUSTO FILHO, Oswaldo; MARTINS, Tiago Damas; MONTGOMERY, David R. Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, no 6, p. 260, 27 mar. 2018. DOI: 10.1007/s12665-018-7436-0.
50. VIEIRA, Bianca Carvalho; FERREIRA, Fabiana Souza; GOMES, Maria Carolina Villaça. PROPRIEDADES FÍSICAS E HIDROLÓGICAS DOS SOLOS E OS ESCORREGAMENTOS RASOS NA SERRA DO MAR PAULISTA. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*, vol. 34, p. 307, 23 set. 2015. DOI: 10.5380/raega.v34i0.40739.
51. VIEIRA, Bianca Carvalho; GRAMANI, Marcelo Fischer. Serra do Mar: The Most “Tormented” Relief in Brazil. In: VIEIRA, Bianca Carvalho; SALGADO, André Augusto Rodrigues; SANTOS, Leonardo José Cordeiro (orgs.). *Landscapes and Landforms of Brazil*. [S. l.]: Dordrecht: Springer, 2015. p. 285–297.
52. VIEIRA, Bianca Carvalho; MARTINS, Tiago Damas; DA SILVA, Telma Mendes; BONINI, José Eduardo. How far have we come? Review of main public policies to reduce landslide impacts in Brazil. *Journal of Mountain Science*, vol. 21, no 9, p. 2891–2904, 10 set. 2024. DOI: 10.1007/s11629-024-8898-z.
53. VIEIRA, Bianca Carvalho; RAMOS, Henrique. Aplicação do modelo Shalstab para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). *Geography Department University of Sao Paulo*, vol. 29, p. 161, 17 jun. 2015. DOI: 10.11606/rdg.v29i0.102087.
54. WICHMANN, Volker. The Gravitational Process Path (GPP) model (v1.0) – a GIS-based simulation framework for gravitational processes. *Geoscientific Model Development*, vol. 10, no 9, p. 3309–3327, 8 set. 2017. DOI: 10.5194/gmd-10-3309-2017.
55. WOLLE, C. M. Análise dos escorregamentos translacionais rasos numa região da Serra do Mar. 1988. 406 f. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.
56. ZWEIG, M. H; CAMPBELL, G. Receiver-operating characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine. *Clinical Chemistry*, vol. 39, no 4, p. 561–577, 1993.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.