

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

SOFIA BONFOGO CAVICHIOLI

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

SÃO PAULO
2025

SOFIA BONFOGO CAVICHIOLI

**AVALIAÇÃO DO PERIGO A ESCORREGAMENTOS RASOS NA BACIA DO RIO
CAMBURI, MUNICÍPIO DE SÃO SEBASTIÃO – SP.**

Trabalho de Graduação Integrado (TGI) apresentado
ao Departamento de Geografia da Faculdade de
Filosofia, Letras e Ciências Humanas, da
Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Área de Concentração: Geografia Física

Orientador: Prof.^a Dr.^a Bianca Carvalho Vieira

SÃO PAULO

2025

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

Ca Cavichioli, Sofia Bonfogo
AVALIAÇÃO DO PERIGO A ESCORREGAMENTOS RASOS NA
BACIA DO RIO CAMBURI, MUNICÍPIO DE SÃO SEBASTIÃO - SP.
/ Sofia Bonfogo Cavichioli; orientadora Bianca
Carvalho Vieira - São Paulo, 2025.
41 f.

TGI (Trabalho de Graduação Individual)- Faculdade
de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da
Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia.

1. SHALSTAB. 2. Gravitational Process Path. 3.
Serra do Mar. I. Vieira, Bianca Carvalho , orient.
II. Título.

CAVICHIOLI, SOFIA BONFOGO. Avaliação do perigo a escorregamentos rasos na bacia do rio Camburi, município de São Sebastião – SP. Trabalho de Graduação Integrado (TGI) apresentado à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____	Instituição _____
Julgamento _____	Assinatura _____

Prof. Dr. _____	Instituição _____
Julgamento _____	Assinatura _____

Prof. Dr. _____	Instituição _____
Julgamento _____	Assinatura _____

Prof. Dr. _____	Instituição _____
Julgamento _____	Assinatura _____

Ao papai que – com mãos na terra – muito antes do bacharel, me ensinou o significado de “geo”; e à mamãe que – na prática – muito antes da licenciatura, me revelou as dores e as delícias do significante lecionar.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que financiou minha pesquisa de iniciação científica.

À Bianca, minha orientadora, a quem carinhosamente chamo de diva. Agradeço não só a orientação firme nesses últimos dois anos, mas claro, as risadas, taças de vinho, corridas - que eu nem sempre participei - e obviamente, os puxões de orelha. Você foi essencial na minha formação.

Ao Tiago, e sua paciência admirável, desde a pesquisa até a escalada; ao Zé, pela ajuda e amizade indispensáveis; à minha parceira de pesquisa, esportes e viagens, Marina; à Bia e à Ana, pela amizade e crises de risos.

Ao meu sempre e precioso quarteto: amiga Amanda, Ana e Laura, pela identificação profunda, por me salvarem durante toda a graduação, fazendo de momentos comuns e catastróficos, especiais.

Às minhas queridíssimas amigas/irmãs de longa data, às que compartilharam teto e vida na Terra Grande, e às presentes mesmo em longas distâncias, sem vocês eu seria um desastre!

Evidentemente, não podia deixar de mencionar os tantos geógrafos que primeiro me inspiraram, em especial: minha madrinha, Lu; e minha primeira professora de geografia, minha xará, e hoje, amiga, Sofia.

E claro, aos meus pais, pela família sempre presente, pelo apoio incondicional e por fazerem o possível e o impossível para me verem feliz! Vocês são absolutamente tudo para mim!

RESUMO

CAVICHIOLO, Sofia Bonfogo. **Avaliação do perigo a escorregamentos rasos na bacia do rio Camburi, município de São Sebastião – SP.** 2025. 41f. Trabalho de Graduação Individual (TGI) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2025.

Os escorregamentos rasos são processos naturais recorrentes em áreas de elevada declividade, solos pouco profundos e intensa pluviosidade, como ocorre na Serra do Mar, e podem se tornar desastres quando atingem áreas ocupadas, resultando em impactos sociais, econômicos e ambientais significativos. O município de São Sebastião (SP) registrou, em fevereiro de 2023, um evento extremo que causou dezenas de mortes e milhares de desabrigados, reforçando a necessidade de aprimorar os estudos de suscetibilidade e perigo a esses fenômenos. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o perigo a escorregamentos rasos na bacia do rio Camburi. O mapeamento da suscetibilidade foi realizado com o SHALSTAB, que apresentou bom desempenho com sensibilidade de 0,865, especificidade de 0,457 e escore F1 de 0,720, identificando áreas instáveis associadas, sobretudo, a limiares de precipitação até os 50mm/dia em encostas íngremes e solos rasos. O perigo foi estimado a partir do GPP, que apresentou desempenho razoável ($AAC-ROC = 0,720$), com ambas as componentes acopladas. Os resultados apontaram predominância das classes de perigo baixo e muito baixo, mas também evidenciaram setores de perigo alto e muito alto concentrados em fundos de vale. A análise dos elementos expostos revelou 3.667 edificações na bacia, das quais aproximadamente 5% estão em setores de perigo, e menos de 1% em áreas de perigo elevado. Apesar do baixo número, há edificações em setores instáveis e em trajetórias de escorregamentos, evidenciando sobreposição entre ocupação irregular e risco geomorfológico. 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 causa mais danos aos elementos expostos do que a suscetibilidade.

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

ABSTRACT

CAVICHIOLO, Sofia Bonfogo. **Shallow landslide hazard assessment in the Camburi river catchment, São Sebastião municipality – SP**. 2025. 41f. Undergraduate Thesis – Faculty of Philosophy, Languages and Literature, and Human Sciences, University of São Paulo, São Paulo, 2025.

Shallow landslides are recurring natural processes in areas with high slopes, shallow soils and intense rainfall, as occurs in the Serra do Mar, and can become disasters when they reach occupied areas, resulting in significant social, economic and environmental impacts. In February 2023, the municipality of São Sebastião (SP) recorded an extreme event that caused dozens of deaths and thousands of homeless people, reinforcing the need to improve studies of susceptibility and hazard to these phenomena. In this context, the aim of this study was to assess the hazard of shallow landslides in the Camburi river basin. Susceptibility mapping was carried out using SHALSTAB, which performed well with a sensitivity of 0.865, specificity of 0.457 and F1 score of 0.720, identifying unstable areas associated above all with precipitation thresholds of up to 50mm/day on steep slopes and shallow soils. Hazard was estimated using the GPP, which showed reasonable performance (AAC-ROC = 0.720), with both components coupled. The results showed a predominance of low and very low hazard classes, but also high and very high hazard sectors concentrated in valley bottoms. The analysis of exposed elements revealed 3,667 buildings in the basin, of which approximately 5% are in hazardous sectors, and less than 1% in high hazard areas. Despite the low number, there are buildings in unstable sectors and on landslide paths, showing an overlap between irregular occupation and geomorphological risk. Although the difference is slight, the degree of danger associated with buildings is greater than their susceptibility, indicating that the trajectory of landslides causes more damage to exposed elements than susceptibility.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evento de fevereiro de 2023 no município de São Sebastião.....	13
Figura 2 - (a) Escorregamentos rasos na Ilha Grande (RJ) em 2010 (b) Movimentos de massa generalizados na Serra do Mar Fluminense em 2011.....	15
Figura 3 - Localização da bacia do rio Camburi (a) Litologia; (b) Elevação.....	20
Figura 4 - Mapa de suscetibilidade da bacia do rio Camburi.....	25
Figura 5 - Distribuição das classes de suscetibilidade na bacia.	25
Figura 6 - (a/b) Variação da AAC-ROC no módulo Random Walks. (c) variação da AAC-ROC no módulo PCM.	29
Figura 7 - (a) Frequência de trajetórias normalizada e reclassificada; (b) Mapa de perigo classificado; (c) Velocidade máxima ao longo das trajetórias.	30
Figura 8 - Área ocupada por cada classe do mapa de frequência de trajetórias simuladas.	31
Figura 9 - (a) Uso e Ocupação do Solo; (b) Uso e Ocupação do Solo e Edificações.....	33
Figura 10 - Classes do SHALSTAB e de frequência de trajetórias em relação ao uso do solo.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros geotécnicos e hidrológicos utilizados para o modelo de suscetibilidade.	22
Tabela 2 - Dados de entrada para a otimização das simulações de trajetória e velocidade.	23
Tabela 3 - Valores otimizados do GPP	27

Sumário

1.INTRODUÇÃO E OBJETIVO	12
2.EMBASAMENTO TEÓRICO	14
2.1 Movimentos de massa	14
2.2 Modelos de previsão de suscetibilidade	15
2.3 Modelos de previsão de perigo	17
3.ÁREA DE ESTUDO	18
4.METODOLOGIA.....	21
4.1. Levantamento de dados	21
4.2 Mapeamento de suscetibilidade.....	21
4.2 Simulação das trajetórias e mapeamento do perigo.....	22
3.4. Elementos expostos	24
5.RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5.1. Mapeamento de suscetibilidade.....	24
5.2 Simulação das trajetórias e mapeamento de perigo.....	27
5.3 Elementos expostos	32
6.CONCLUSÃO.....	36
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	36

1.INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Os movimentos de massa são processos naturais que podem gerar impactos expressivos, tanto no meio físico quanto no social, resultando em prejuízos econômicos, ambientais e, sobretudo, em perdas humanas. A elevação no número de fatalidades observada ao longo do último século está diretamente associada à intensificação da ocupação de áreas suscetíveis a esses processos (Alcántara-Ayala, 2025; Gómez; García; Aristizábal, 2023). Em termos de densidade de movimentos de massa por quilômetro quadrado, o Brasil ocupa a vigésima posição mundial; contudo, quando se considera o número de óbitos por milhão de habitantes, o país sobe para o décimo primeiro lugar nesse ranking (Gómez; García; Aristizábal, 2023). Tal disparidade ressalta como a vulnerabilidade social, somada à concentração populacional em áreas críticas, agrava as consequências desses eventos.

Na Serra do Mar, em especial, a combinação de vertentes íngremes, solos pouco profundos e chuvas intensas e prolongadas cria condições propícias para a deflagração frequente de escorregamentos e fluxos gravitacionais (Avelar et al., 2013; Bonini et al., 2021; Bonini; Vieira; Martins, 2022; Fernandes et al., 2004; Guimaraes et al., 2003; Kanji; Cruz; Massad, 2008). Entre 1928 e 2013, foram registradas aproximadamente 3.330 fatalidades associadas a esses processos na Serra do Mar, sendo que cerca de 43% desse total concentrou-se entre os anos de 2000 e 2013 (Vieira; Gramani, 2015). Mais recentemente, em fevereiro de 2023, os municípios de São Sebastião e Ilhabela (SP) sofreram um dos eventos mais severos já documentados, marcado por escorregamentos rasos, fluxos de detritos e inundações (Figura 1). O desastre ocasionou 46 mortes, 40 desaparecimentos e mais de 1.600 pessoas desabrigadas (Marengo et al., 2024), além de provocar prejuízos significativos às infraestruturas e ao setor turístico local. Estudos indicam que pelo menos 585 escorregamentos foram deflagrados nesse evento (Bonini et al., 2025), que contou com um acumulado pluviométrico de 626 mm em apenas 24 horas (Marengo et al., 2024).



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

Diante da periodicidade e do impacto dos escorregamentos, a identificação e avaliação do risco, definido pelo “número esperado de vidas perdidas, pessoas feridas, danos a propriedades e perturbação das atividades econômicas devido a um fenômeno prejudicial, em uma determinada área e para um determinado período”(Varnes, 1984), torna-se fundamental. Para a validação do risco fazem-se necessárias a interação entre as análises de suscetibilidade, perigo, vulnerabilidade dos elementos expostos e os danos potenciais decorrentes de um fenômeno natural (Corominas et al., 2013; Hungr et al., 2001).

Posto a necessidade de aprimorar as estratégias de gestão de risco, cresce o interesse pelo uso de modelos de base física capazes de simular o comportamento desses processos. No entanto, a maior parte das aplicações no litoral norte de São Paulo ainda se concentra na modelagem da suscetibilidade (Bonini et al., 2020; Fernandes et al., 2004; Martins et al., 2016; Vieira; Ramos, 2015) ou seja, na identificação das áreas com maior potencial de ruptura. Por outro lado, são escassos os estudos voltados à quantificação do perigo, que envolvem a simulação da trajetória dos escorregamentos.

Nesse sentido, destaca-se o modelo *Gravitational Process Path* (GPP) (Wichmann, 2017), que combina simulação estocástica da trajetória com a propagação do material mobilizado a partir de parâmetros físicos simplificados, como atrito basal, perda de massa e variabilidade direcional. Estudos anteriores comprovaram sua aplicabilidade, demonstrando

resultados consistentes quando calibrado para contextos geomorfológicos específicos (Goetz et al., 2021; Klade, 2022). Apesar de seu potencial, o uso do GPP no Brasil ainda é incipiente, sobretudo em áreas tropicais, carecendo de aplicações que envolvam validação a partir de eventos reais 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, utilizando o GPP para a simulação de trajetórias e identificando os elementos expostos (edificações) existentes na bacia.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Movimentos de massa

Os movimentos de massa são processos exogenéticos e atuam como os principais formadores de relevo em regiões montanhosas e em terrenos íngremes no mundo todo (Sidle; Pearce; O'Loughlin, 1985). Sua deflagração ocorre a partir da perturbação das condições que controlam a estabilidade dos taludes, por meio de atividades humanas, por exemplo. Grande parte desses fenômenos são deflagrados por eventos meteorológicos intensos ou sísmicos (Sidle; Pearce; O'Loughlin, 1985).

A literatura especializada apresenta uma ampla variedade de classificações para os movimentos de massa, reflexo da diversidade de materiais envolvidos, mecanismos de instabilidade e objetivos distintos dos pesquisadores. Essa multiplicidade de critérios, que incluem aspectos como velocidade, tipo de material, geometria do movimento e conteúdo de água, frequentemente gera ambiguidades na terminologia empregada (Crozier, 1986; Guidicini; Nieble, 1983). Segundo Bierman e Montgomery (2014), esses processos classificam-se em três grupos: quedas e tombamentos, fluxos (ex.: lama e detritos) e escorregamentos (translacionais e rotacionais).

Os escorregamentos podem ser classificados de acordo com o tipo de plano de ruptura (Figura 2). Os escorregamentos profundos (rotacionais), apresentam superfície de ruptura curva, de concavidade voltada para cima, estando geralmente associados a solos mais espessos (Guidicini; Nieble, 1983; Selby, 1993). Em contraste, os escorregamentos rasos (translacionais) correspondem a movimentos de massa rápidos, cuja superfície de ruptura é predominantemente planar e paralela à encosta, ocorrendo em solos pouco profundos, com espessura variando entre 0,5 e 5,0 m. Essa ruptura tende a acompanhar descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas, como acamamentos, fraturas, contatos entre solo e rocha ou entre horizontes pedológicos. Tais

processos são comumente deflagrados por eventos pluviométricos intensos, que promovem o aumento da poro-pressão positiva e a consequente ruptura da vertente. Esse tipo de movimento configura-se como o mais recorrente em áreas de relevo íngreme, como a Serra do Mar, sobretudo durante a estação chuvosa (Bierman; Montgomery, 2014; Fernandes; Amaral, 1996; Selby, 1993).

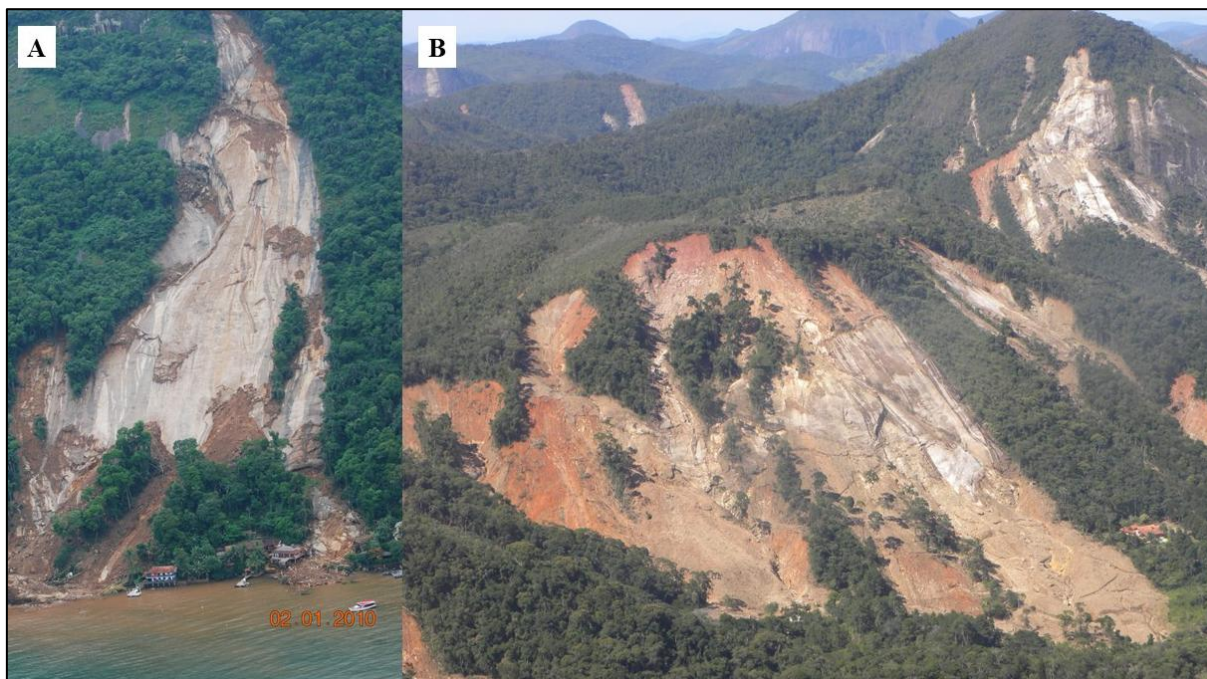


Figura 2 - (a) Escorregamentos rasos na Ilha Grande (RJ) em 2010 (b) Movimentos de massa generalizados na Serra do Mar Fluminense em 2011 **Fonte:** (a) Nelson Fernandes, 2010; (b) Bianca Vieira, 2011.

2.2 Modelos de previsão de suscetibilidade

A suscetibilidade do terreno indica uma condição de potencialidade para a ocorrência de processos naturais, sem que eles tenham necessariamente sido deflagrados. Dessa forma, sua análise envolve a identificação de áreas com maior propensão ao início desses processos, com base nas características morfológicas do terreno. A avaliação da suscetibilidade pode ser considerada a primeira etapa na análise de perigo e risco à deslizamentos (Corominas et al., 2013; Guzzetti et al., 1999).

Diferentes métodos, divididos em qualitativos e quantitativos, são utilizados na avaliação da suscetibilidade. Os métodos qualitativos baseiam-se na utilização de inventários e na análise dos fatores condicionantes presentes na área, a partir do conhecimento do pesquisador (Corominas et al., 2013; Crozier, 2005). Já os métodos quantitativos englobam análises estatísticas, bivariadas ou multivariadas, aplicadas à identificação de áreas instáveis

(Dias et al., 2021; Kanungo et al., 2006; Lee, 2005), bem como modelos matemáticos de base física, que representam o fenômeno por meio de equações. Embora esses modelos sejam frequentemente considerados mais objetivos, por reduzirem a interferência direta do pesquisador na etapa de mapeamento, é importante destacar que todos os métodos envolvem algum grau de subjetividade. Nos modelos estatísticos, essa subjetividade está associada, principalmente, à seleção das variáveis explicativas, ao tratamento dos dados e à definição dos parâmetros de calibração. Nos modelos de base física, por sua vez, ela decorre das hipóteses adotadas para a ruptura, da representação dos processos hidrológicos nas encostas e da escolha dos parâmetros geotécnicos, muitas vezes obtidos de forma indireta ou a partir de valores médios da literatura (Bonini et al., 2020; Vieira; Martins; Listo, 2017; Vieira; Ramos, 2015).

Na última categoria insere-se o modelo matemático de base física SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*) (Montgomery; Dietrich, 1994) (Equação 1). 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-Coulumb e de um modelo hidrológico de estado estacionário.

$$\log \frac{q}{T} = \left(\frac{\sin \theta}{a/b} \left(\frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right) \right) \quad (1)$$

Na qual q é a precipitação crítica de ruptura da encosta (m); T é a transmissividade do solo (m²/dia); a é a área de contribuição (m²); b é o comprimento do contorno da célula (m); c' é a coesão efetiva do solo (MPa); θ é o ângulo de inclinação da encosta (radianos); ρ_w é a densidade da água (kN/m³); ρ_s é a densidade do solo saturado (g/cm³); g é a aceleração gravitacional (m/s²); z é a espessura do solo (m); e ϕ é ângulo de atrito interno do solo (graus).

Montgomery e Dietrich (1994) estabeleceram quatro classes de estabilidade para a interpretação dos resultados do modelo: (i) Incondicionalmente Instável, referente a áreas que se mantêm suscetíveis ao movimento mesmo em condições secas; (ii) Instável, associada a porções do terreno que podem se tornar instáveis sob determinadas condições; (iii) Estável, em que a área de contribuição é insuficiente para deflagrar o processo; e (iv) Incondicionalmente Estável, caracterizada por setores que permanecem estáveis mesmo quando saturados. Vale ressaltar que o modelo indica um índice de estabilidade relativa, expresso na quantidade da chuva crítica e não a frequência de iniciação dos escorregamentos.

Os primeiros estudos preditivos com a utilização do modelo foram desenvolvidos nos Estados Unidos, a partir do trabalho de Montgomery e Dietrich (1989), que demonstrou sua eficiência na identificação e classificação da estabilidade de encostas íngremes. No contexto brasileiro, pesquisas semelhantes vêm sendo conduzidas desde os trabalhos pioneiros de Guimarães et al. (2003), no Rio de Janeiro, e de Fernandes et al. (2004). Posteriormente, destacam-se as aplicações realizadas na Serra do Mar (Bonini et al., 2020; Do Pinho; Augusto Filho, 2022; Martins et al., 2016; Vieira et al., 2018; Vieira; Ramos, 2015), cujos resultados têm se mostrado satisfatórios para a previsão de áreas suscetíveis em condições de clima tropical úmido.

2.3 Modelos de previsão de perigo

De acordo com Varnes (1984), o conceito de perigo em contextos de deslizamento refere-se à probabilidade de ocorrência de um evento específico com magnitude definida, normalmente representado pela área ou volume afetado. Nesse sentido, a análise de perigo em movimentos de massa visa estimar não apenas a probabilidade espacial e temporal de ocorrência, mas também compreender a trajetória e a intensidade do fenômeno (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). Os 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 de rígidos (Azzoni; Barbera; Zaninetti, 1995; Dorren; Kuhne, 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 sequências 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. Nesse contexto, insere-se o modelo *Gravitational Process Path* (GPP) (Wichmann, 2017), cuja aplicabilidade já foi demonstrada em investigações anteriores, as quais evidenciam resultados consistentes quando devidamente calibrado para diferentes contextos geomorfológicos (Goetz et al., 2021; Klade, 2022).

Inicialmente o modelo foi desenvolvido para simular a trajetória de avalanches, entretanto pode ter seus parâmetros ajustados para simular diversos processos de movimentação de massa como deslizamentos, corridas de detritos e quedas de blocos. Implementado no SAGA GIS, o modelo oferece flexibilidade e modularidade para a representação de diversos tipos de processo (Wichmann, 2017).

A principal vantagem do GPP está na baixa exigência de parâmetros de entrada, uma vez que demanda, essencialmente, apenas um Modelo Digital de Terreno (MDT) e a delimitação das áreas de início do processo. Embora seja possível incorporar parâmetros complementares, a sua utilização não é imprescindível. Tal característica confere ao modelo elevada aplicabilidade em contextos nos quais informações detalhadas sobre propriedades geotécnicas não estão disponíveis.

O funcionamento do GPP fundamenta-se na simulação do deslocamento de uma massa sobre um modelo digital de elevação, desde a área de início até a zona de deposição. Essa dinâmica é representada pela integração de três módulos: o processo de propagação, frequentemente modelado por meio do *Random Walk*, que possibilita a reprodução de múltiplas trajetórias via simulação de Monte Carlo; a estimativa da distância de alcance, usualmente realizada pelo PCM Model (Perla; Cheng; McClung, 1980), baseado em um modelo de atrito bidimensional; e, por fim, a etapa de deposição, na qual o relevo é ajustado de modo a representar o acúmulo do material transportado ao longo do percurso.

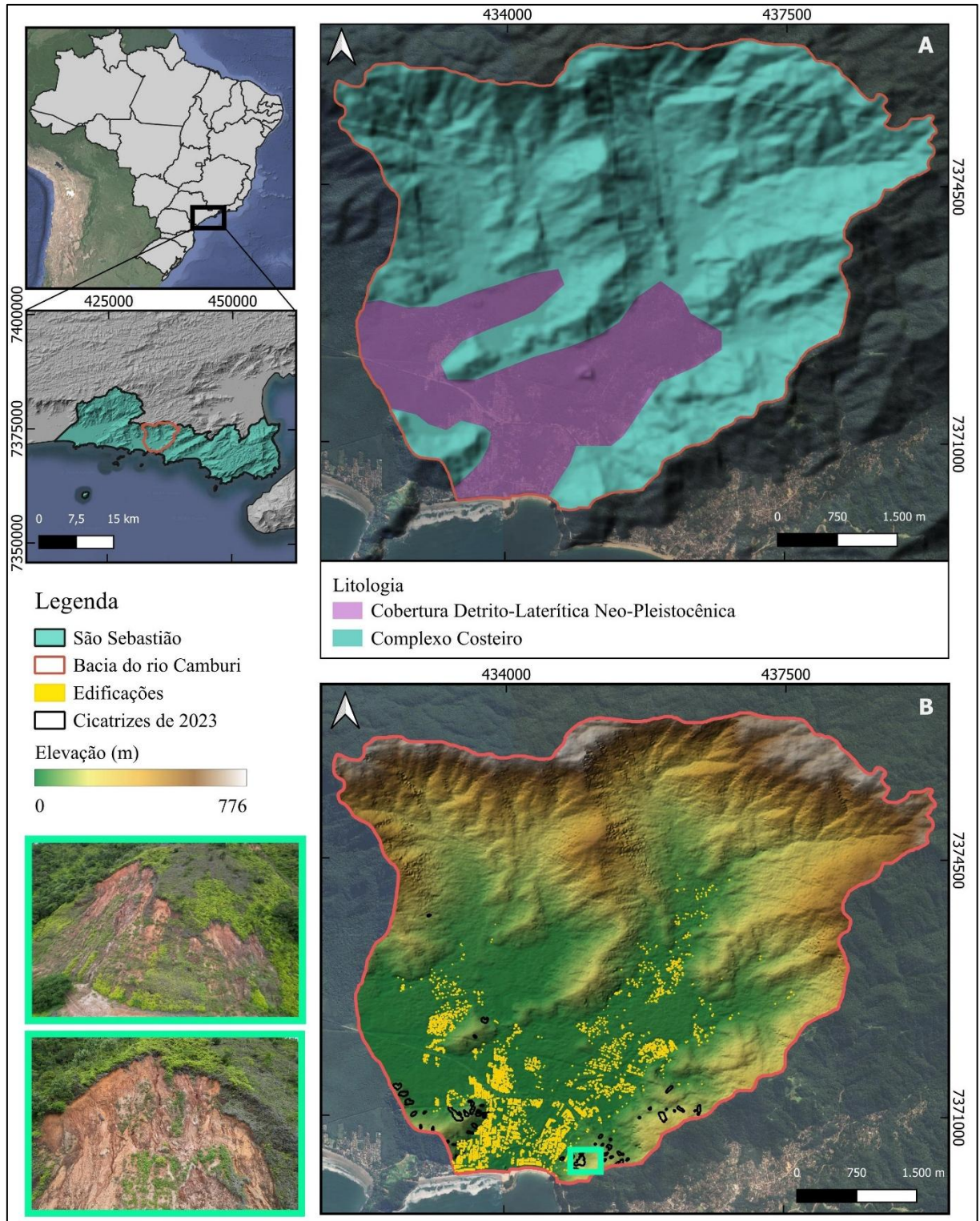
3.ÁREA DE ESTUDO

O município de São Sebastião está localizado no litoral norte do estado de São Paulo, a cerca de 200 km da capital paulista, possuindo aproximadamente 82 mil habitantes e cerca de 400 km² de área (IBGE, 2022). A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do rio Camburi, que abrange o bairro homônimo, em São Sebastião, sendo que no Sistema Integrado de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SIGRH), ela se enquadra no UGRHI 3, tendo o próprio relevo da Serra do Mar como divisor topográfico.

Com aproximadamente 37 km², a bacia do rio Camburi foi fortemente impactada pelo evento pluviométrico extremo de fevereiro de 2023, quando foram registradas 51 cicatrizes de escorregamentos em encostas próximas às áreas de ocupação (Figura 3). O mapeamento de riscos conduzido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em 2018 identificou, no bairro, áreas ocupadas por moradias próximas a encostas naturais e taludes de corte, onde o padrão construtivo varia de médio a elevado. O levantamento delimitou três setores distintos: dois deles vinculados ao Condomínio Sol Maior, um classificado como de Risco Alto (R3 – SSB-06-01) e outro como Setor de Monitoramento (SM – SSB-06-02), além de um terceiro setor (SSB-06-03), igualmente enquadrado como Setor de Monitoramento.

Do ponto de vista geológico, as unidades litoestratigráficas da bacia são divididas em dois domínios principais (IBGE, 2023a): o complexo costeiro, datado do Neoproterozóico Criogeniano, constituído por rochas cristalinas como granitos, gnaisses e migmatitos; e as coberturas detríticas do Quaternário Pleistoceno Superior. A área insere-se em três compartimentos geomorfológicos regionais: Serra do Mar, Planície Litorânea e Patamar de Paraitinga. Em termos pedológicos apresenta predominância de cambissolos háplicos aluminicos, com textura argilosa e média (IBGE, 2023b).

Inserida no domínio da Serra do Mar, cuja vegetação foi caracterizada por Joly, Leitão Filho e Silva (1991), a bacia do rio Camburi possui três formações vegetais diferentes, mata de altitude, mata de encosta e mata de planície litorânea, de acordo com a variação altitudinal, refletindo a forte correlação entre relevo e cobertura vegetal. Ressalta-se que, no contexto climático, há predominância de um regime pluviométrico elevado, que considera a região como a mais úmida do estado de São Paulo, com índices anuais que variam entre 1.500 mm e 2.500 mm, na área entre as praias de Boracéia e Maresias, que abrange os bairros do Sahy e de Camburi (Monteiro, 1973). Essa expressiva pluviosidade, típica da vertente oceânica da Serra do Mar, decorre da influência orográfica que intensifica a condensação e o volume de precipitação (Monteiro, 1973; Pellegatti; Galvani, 2010).



4.METODOLOGIA

4.1. Levantamento de dados

Os dados empregados foram organizados em três categorias: (a) informações de elevação; (b) registros das ocorrências de escorregamentos; e (c) dados referentes ao uso da terra e aos elementos expostos. O Modelo Digital de Elevação (MDE) TanDEM-X, com resolução espacial de 12 metros e acurácia vertical de 10 metros (Krieger et al., 2013), foi utilizado como base topográfica para as simulações. As cicatrizes do evento pluviométrico de 2023 foram obtidas a partir do inventário elaborado por Bonini et al. (2025), enquanto o mapeamento do uso e cobertura da terra foi extraído da base *MapBiomias* (Coleção 2 Beta, resolução de 10 m)(MapBiomias, 2025). Para a identificação das edificações e infraestrutura, recorreu-se à base colaborativa *OpenStreetMap*, permitindo a localização dos elementos expostos na bacia do Rio Camburi.

4.2 Mapeamento 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 (Bonini et al., 2020; Do Pinho; Augusto Filho, 2022; Listo; Gomes; Vieira, 2018; Martins et al., 2016; Vieira; Ramos, 2015).

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 50 mm/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.

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	

Tabela 1 - Parâmetros geotécnicos e hidrológicos utilizados para o modelo de suscetibilidade.

4.2 Simulação das trajetórias e mapeamento do perigo

A etapa de análise do perigo envolveu a simulação das trajetórias e velocidades potenciais de escorregamentos rasos, a partir do modelo de base física GPP (*Gravitational Process Path*), desenvolvido por Wichmann (2017). O modelo possui dois módulos principais: o primeiro define as trajetórias prováveis a partir do método estocástico *Random Walks*, comumente utilizado em modelos de propagação de movimentos de massa (Mergili; Krenn; Chu, 2015; Mergili; Schwarz; Kociu, 2019); o segundo módulo é responsável por restringir e ajustar as trajetórias, considerando a fricção e resistência basal do material em deslocamento sobre a superfície topográfica. Entre os diferentes modelos de fricção disponíveis na estrutura do GPP, optou-se pela aplicação do two-parameter friction model (PCM), proposto por Perla, Cheng e McClung (1980). Esse modelo relaciona o movimento do fluxo à resistência basal, permitindo estimar a influência da inércia e da rugosidade do terreno sobre o deslocamento do material, sendo amplamente recomendado na literatura para simulações de escorregamentos rasos (Wichmann, 2017).

A parametrização do GPP foi realizada em duas etapas complementares, conforme abordagem adaptada de Goetz et al. (2021), com base em um experimento fatorial completo. Na primeira etapa, buscou-se otimizar os parâmetros associados ao módulo *Random Walks*: limiar do ângulo de inclinação, expoente de divergência e fator de persistência. Inicialmente, foram testadas diversas combinações de valores dentro dos intervalos recomendados por Wichmann (2017), a fim de identificar aqueles que proporcionassem melhor correspondência

entre as trajetórias simuladas e as cicatrizes mapeadas. Em seguida, executou-se um segundo experimento para avaliar a sensibilidade do modelo a pequenas variações nesses parâmetros, selecionando as combinações mais estáveis e coerentes com a dinâmica geomorfológica local.

A segunda etapa consistiu na calibração dos parâmetros do modelo de fricção (PCM), testando-se todas as combinações possíveis entre o coeficiente de atrito (μ) e a razão entre massa e resistência ao arrasto (M/D), conforme intervalos propostos por Goetz et al. (2021) e Klade (2022) (Tabela 2). Assim como na etapa anterior, cada simulação foi comparada ao inventário de cicatrizes para quantificação da aderência espacial entre as trajetórias modeladas e as áreas efetivamente afetadas.

A eficácia das simulações foi avaliada pelo índice da Área Abaixo da Curva ROC (AAC-ROC) (Zweig; Campbell, 1993), que expressa a capacidade do modelo em distinguir corretamente as áreas afetadas daquelas não impactadas. A configuração considerada ótima correspondeu àquela que apresentou o maior valor de AAC-ROC, resultando na parametrização final do modelo com ambos os módulos acoplados.

A partir dessa parametrização, foram executadas as simulações para toda a área da bacia do rio Camburi, utilizando como áreas de liberação as células classificadas como instáveis pelo modelo SHALSTAB, ou seja, aquelas com limiar crítico de precipitação ≤ 50 mm/dia. O resultado foi um raster de frequência de trajetórias, representando a intensidade de passagem dos fluxos em cada célula do terreno. Por fim, o mapa de frequência foi reclassificado em cinco níveis de perigo, muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, de modo que cada classe correspondesse a 20% do total da frequência acumulada. Esse procedimento permitiu identificar as zonas mais suscetíveis ao impacto direto dos escorregamentos, subsidiando a análise dos elementos expostos na etapa subsequente.

	Dados de entrada	Valor	Descrição	Fonte
	MDE	-	Modelo digital de elevação	(Krieger et al., 2013)
	Release areas	-	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 atrito (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).	

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

3.4. Elementos expostos

A avaliação dos elementos expostos teve início com o levantamento das classes de uso e ocupação do solo, elaborado a partir dos dados disponibilizados pelo *MapBiomas* (Coleção 2 Beta, resolução de 10 m) (MapBiomas, 2025). Em seguida, realizou-se a identificação das edificações presentes na bacia do rio Camburi, com base nas informações do *OpenStreetMap*. A partir disso, a distribuição espacial das construções foi relacionada às classes de frequência de trajetórias geradas pelo modelo. Foram considerados elementos potencialmente ameaçados aqueles situados em áreas enquadradas nas categorias de perigo alto e muito alto.

5.RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Mapeamento de suscetibilidade

O modelo apresentou bom desempenho na identificação das áreas instáveis (sensibilidade = 0,865), embora a baixa especificidade (0,457) indique uma tendência à superestimação das áreas suscetíveis. Assim, os resultados sugerem que, apesar de o procedimento de amostragem dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos ter sido adequado para reproduzir as cicatrizes mapeadas, ainda há limitações na capacidade do modelo de discriminar de forma precisa as áreas efetivamente estáveis. O SHALSTAB estimou um limiar crítico máximo de precipitação de 218 mm/dia para a deflagração de escorregamentos rasos, não sendo identificadas células associadas a valores superiores a 400 mm/dia (Figura 4). A análise espacial indicou que cerca de 35% da área apresenta comportamento incondicionalmente estável, enquanto 24% foi classificada como incondicionalmente instável (Figura 5). Observa-se predominância das células pertencentes à faixa de 0 a 50 mm/dia (31%), seguidas por aproximadamente 6% entre 50 e 100 mm/dia, 3% entre 100 e 200 mm/dia e 0,15% entre 200 e 400 mm/dia.

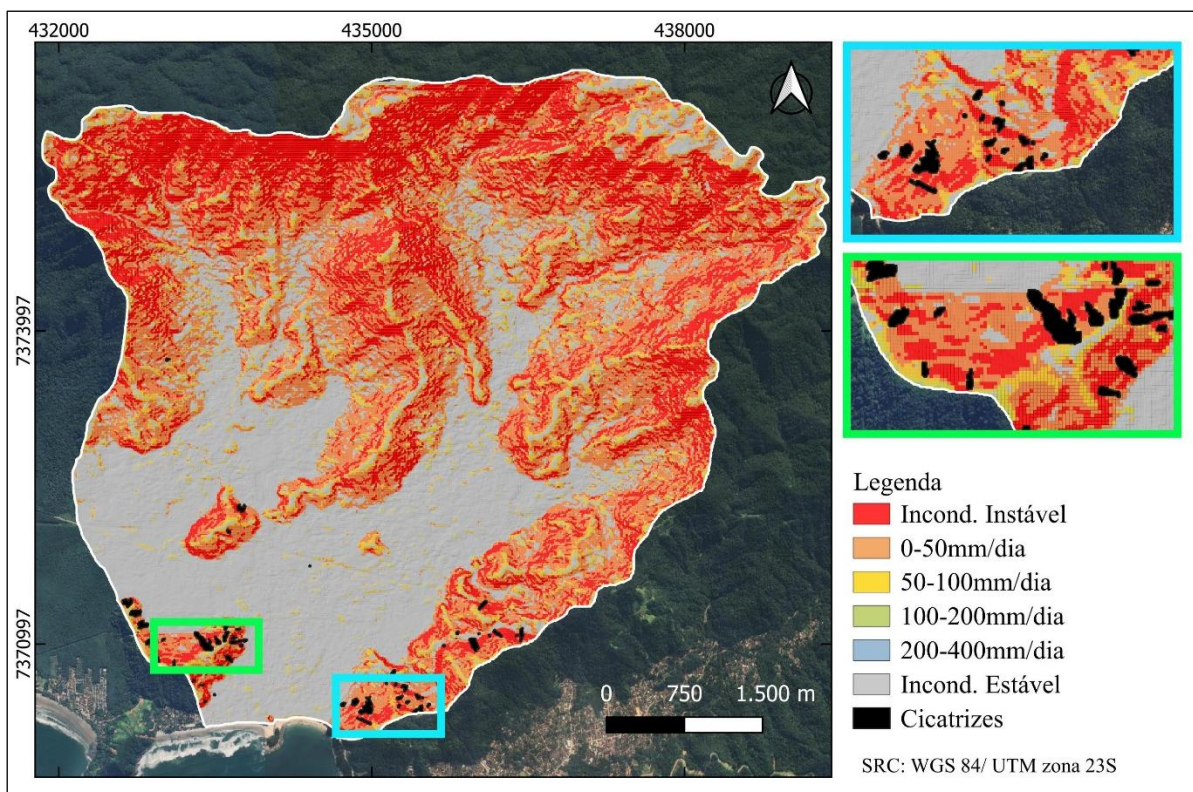


Figura 4 - Mapa de suscetibilidade da bacia do rio Camburi.

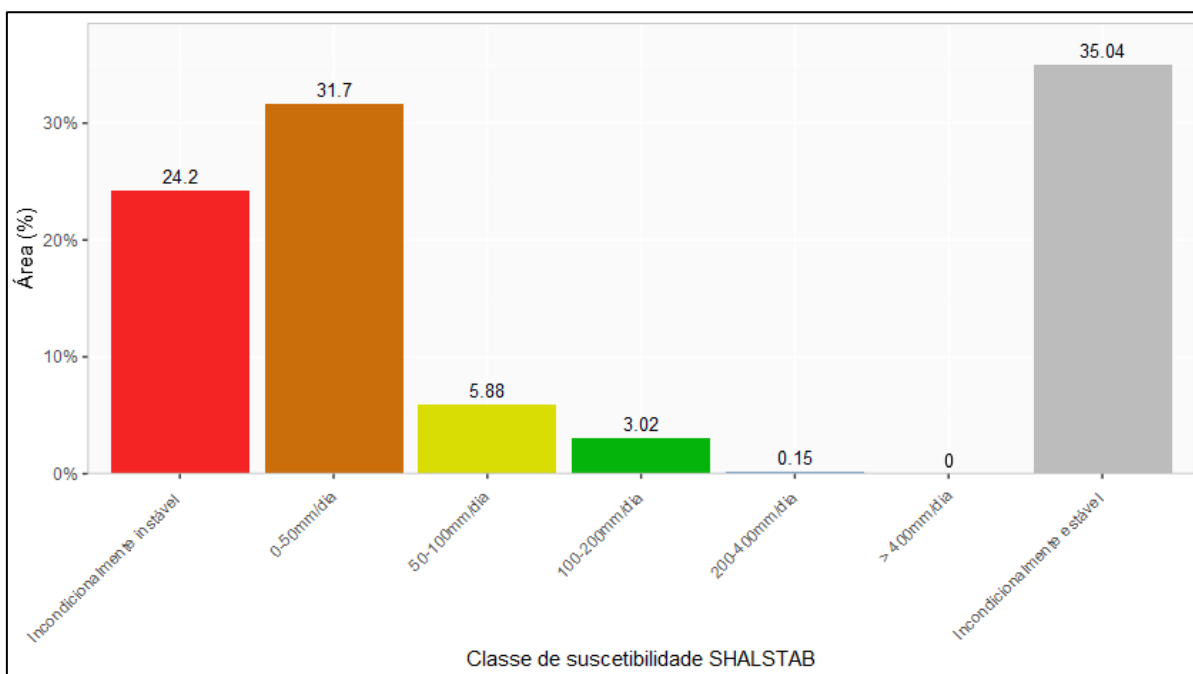


Figura 5 - Distribuição das classes de suscetibilidade na bacia.

O desempenho do modelo SHALSTAB revelou-se satisfatório na delimitação das áreas potencialmente instáveis, mesmo diante do valor reduzido de especificidade, o que indica a presença de falsos positivos (setores estáveis classificados como suscetíveis). Essa limitação,

contudo, é esperada em aplicações de escala regional, nas quais a área ocupada por cicatrizes de escorregamentos corresponde a uma fração muito pequena do total analisado. Entretanto, o escore F1 obtido neste estudo indica equilíbrio entre precisão e sensibilidade, confirmando a adequação do modelo para fins de mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos rasos.

A análise dos resultados reforça o papel preponderante da topografia na deflagração dos escorregamentos, sobretudo devido à adoção de baixos valores de coesão, estratégia metodológica coerente com a ausência de dados geotécnicos distribuídos espacialmente. Assim como observado por Guimarães et al. (2003), a parametrização com coesão próxima de zero privilegia o controle morfométrico, permitindo que o SHALSTAB opere de forma mais eficiente em ambientes tropicais íngremes, como a Serra do Mar. A utilização de ângulos de atrito relativamente elevados auxiliou na redução da superestimação das áreas instáveis, enquanto a condutividade hidráulica saturada apresentou grande variabilidade espacial, influenciada tanto pela heterogeneidade do solo quanto pelas descontinuidades hidráulicas entre 1 e 2,5 m de profundidade (Vieira; Ferreira; Gomes, 2015). A profundidade do solo mostrou pouca variação entre os cenários testados, reflexo da predominância de Cambissolos rasos e pouco desenvolvidos, típicos das vertentes serranas.

As áreas classificadas como incondicionalmente instáveis concentram-se nas encostas mais íngremes da Serra do Mar, em altitudes superiores a 400 m, recobertas por formações florestais que favorecem a infiltração e o acúmulo de água no solo. Essas condições, combinadas à reduzida espessura dos solos, potencializam a saturação e a instabilidade das vertentes. Em contrapartida, nas porções mais baixas e próximas às zonas urbanizadas, predominam limiares críticos de precipitação superiores a 100 mm/dia e altitudes inferiores a 200 m, indicando maior estabilidade relativa.

Uma limitação relevante do modelo diz respeito à definição das classes de suscetibilidade com base nos limiares de precipitação. No presente estudo, grandes porções da bacia foram classificadas como suscetíveis sob chuvas de até 50 mm/dia, um valor comum em regiões com precipitação média anual em torno de 2.500 mm. Essa superestimação de áreas instáveis já foi documentada em outros trabalhos na Serra do Mar (Bonini et al., 2020; Vieira et al., 2018; Guimarães et al., 2003) e decorre da própria natureza simplificada do modelo, que representa condições idealizadas e estacionárias de equilíbrio entre infiltração e estabilidade.

Apesar dessas limitações, tendo em vista a necessidade de inserir os valores de precipitação na modelagem do perigo, o SHALSTAB mostrou-se adequado em relação a outras abordagens que requerem séries históricas de precipitação e que nem sempre estão disponíveis. A facilidade de parametrização e a dependência de variáveis disponíveis, como declividade e

área de contribuição, tornam o modelo particularmente útil para avaliações preliminares de perigo e planejamento territorial, sobretudo em regiões com escassez de dados geotécnicos e hidrológicos.

5.2 Simulação das trajetórias e mapeamento de perigo

Durante o processo de calibração do modelo GPP, foram testadas 102 combinações de parâmetros no módulo de trajetórias potenciais. Na etapa inicial, foram geradas 90 combinações únicas, nas quais se observou maior sensibilidade às variações do limiar de ângulo e do expoente de divergência, enquanto o fator de persistência apresentou influência menos significativa (Figura 6a). Os valores mais baixos de AAC-ROC, inferiores a 0,500, ocorreram quando o limiar de ângulo foi configurado abaixo de 30°, ao passo que os desempenhos mais elevados foram obtidos para 35° (AAC-ROC = 0,604) e 40° (AAC-ROC = 0,628). A partir desses resultados, a segunda fase de otimização concentrou-se nos intervalos mais promissores, variando o limiar de ângulo em 35° e 40°, o expoente de divergência de 1,0 a 2,0 com incrementos de 0,2, e mantendo o fator de persistência fixo em 1,5, totalizando doze novas combinações avaliadas (Figura 6b). Essa etapa permitiu identificar como parâmetros ótimos o limiar de ângulo de 35° e o expoente de divergência igual a 1,0, com desempenho máximo de AAC-ROC = 0,854 (Cavichioli et al., no prelo)

A calibração subsequente, referente ao segundo módulo do GPP, o modelo de fricção PCM, envolveu 42 combinações únicas de parâmetros (Figura 6c), com resultados de AAC-ROC variando entre 0,465 e 0,720. Nessa etapa, verificou-se que o PCM apresenta maior sensibilidade ao coeficiente de fricção do que à razão massa/arrasto. O melhor desempenho foi alcançado com coeficiente de fricção igual a 0,20 e razão massa/arrasto de 180. A partir desses parâmetros otimizados (Tabela 3), foram calculadas as trajetórias potenciais de escorregamentos, considerando como áreas de iniciação aquelas associadas a células com limiar crítico de precipitação igual ou inferior a 50 mm/dia (Figura 4) (Cavichioli et al., no prelo).

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

Tabela 3 - Valores otimizados do GPP.

A análise espacial das trajetórias simuladas (Figura 7a) evidencia uma clara relação inversa entre a frequência de passagem e a área afetada, indicando que a maioria do terreno apresenta baixa recorrência de trajetórias potenciais. Conforme mostra o gráfico de distribuição (Figura 8), cerca de 29,47 % da bacia é atravessada por trajetórias em até 10 % das simulações, enquanto as classes de 20–30 % e 30–40 % representam 24,29 % e 14,56 % da área total, respectivamente. Já os setores atingidos em mais de 70 % das simulações são extremamente restritos, somando menos de 1 % da área da bacia, o que confirma a tendência inversamente proporcional entre a extensão das áreas afetadas e o grau de convergência das trajetórias.

As zonas de maior frequência concentram-se principalmente nas encostas médias e altas e nos fundos de vale, locais onde a morfologia do terreno favorece a convergência dos fluxos e a deposição do material transportado. As áreas de alta declividade, associadas às zonas de ruptura dos escorregamentos, também se destacam por apresentarem maiores velocidades simuladas, que variam entre 0 m/s (em regiões não atingidas) e 33 m/s, com média de 11 m/s e desvio padrão de 8 m/s (Figura 7c). Essa variação indica que os setores de topo e meia encosta possuem maior potencial destrutivo, enquanto as velocidades terminais, mais reduzidas, predominam nas áreas de deposição, próximas aos canais fluviais.

O mapa de perigo (Figura 7b) sintetiza esses resultados, demonstrando que 40 % da área da bacia é classificada como de perigo baixo, seguida por 29 % de perigo muito baixo e 22 % de perigo intermediário. As áreas enquadradas nas categorias de perigo alto e muito alto representam 6 % e 2 %, respectivamente, concentrando-se principalmente nas vertentes íngremes da Serra do Mar.

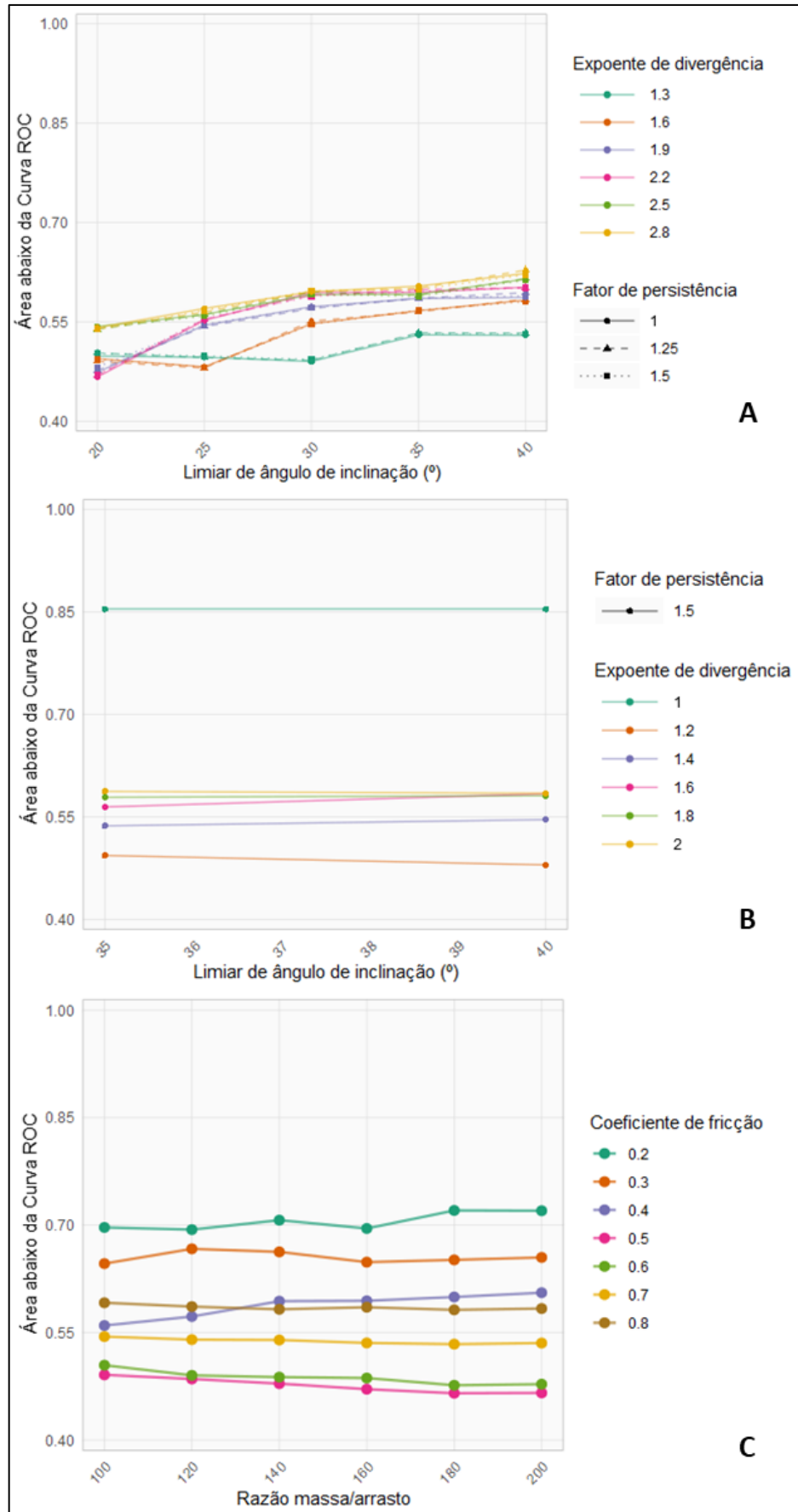


Figura 6 - (a/b) Variação da AAC-ROC no módulo Random Walks. (c) variação da AAC-ROC no módulo PCM.

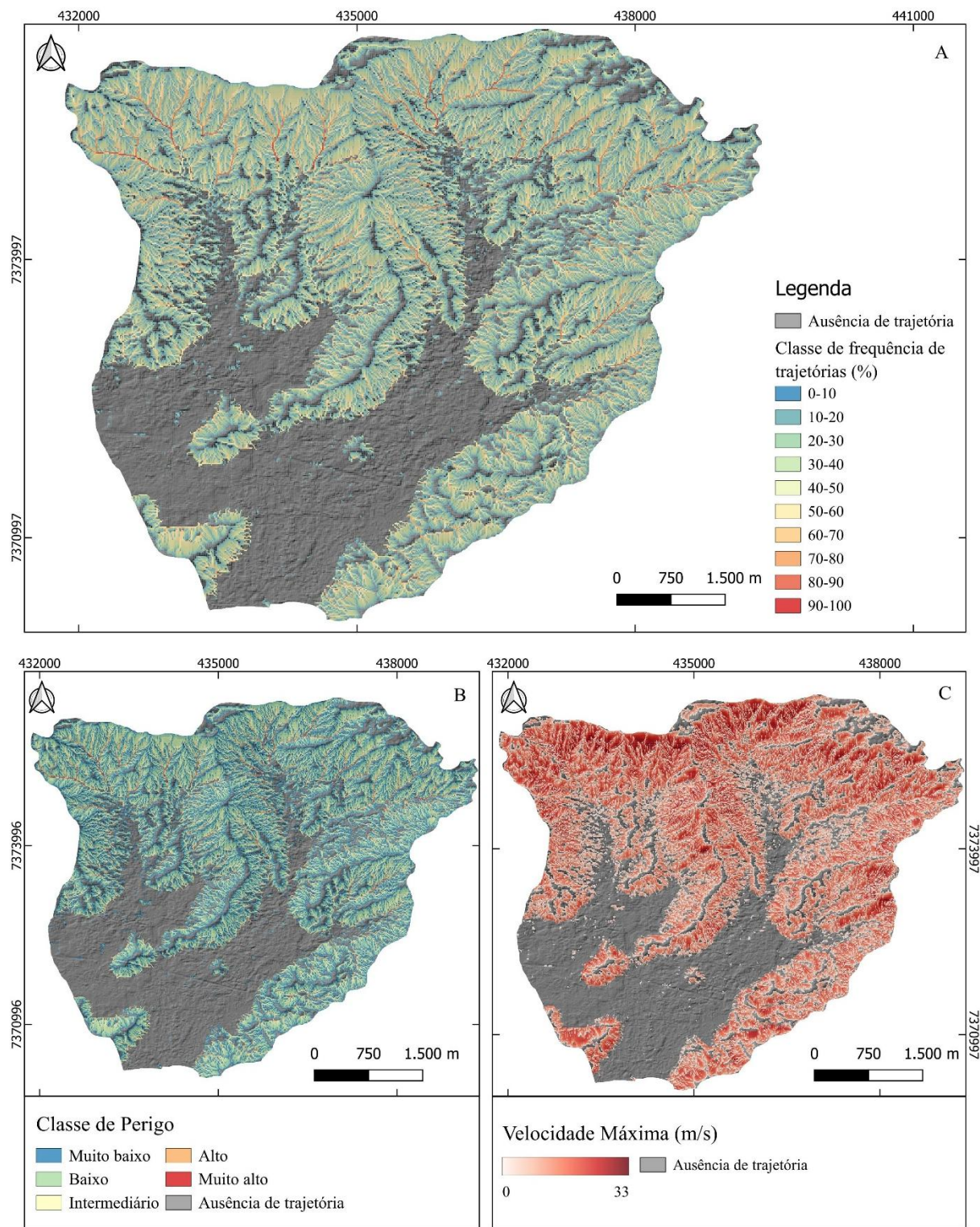


Figura 7 - (a) Frequência de trajetórias normalizada e reclassificada; (b) Mapa de perigo classificado; (c) Velocidade máxima ao longo das trajetórias.

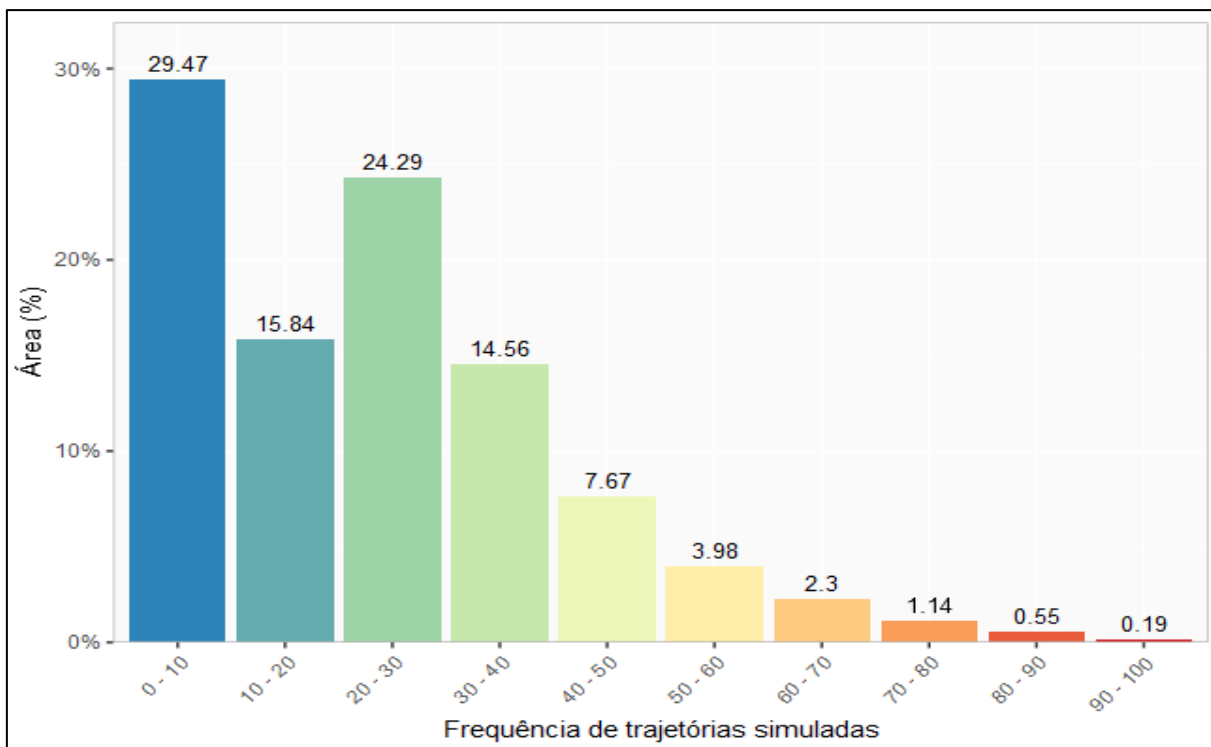


Figura 8 - Área ocupada por cada classe do mapa de frequência de trajetórias simuladas.

O fator de persistência, cuja variação nas simulações foi reduzida, mostrou-se adequado para representar a continuidade das trajetórias nas encostas íngremes, onde a geometria fortemente controlada do relevo direciona o deslocamento dos fluxos. A baixa variabilidade deste parâmetro reforça que o material tende a seguir trajetórias retilíneas e pouco divergentes, compatíveis com a morfologia fortemente dissecada da área.

O limiar de inclinação (35°) foi o parâmetro com maior sensibilidade, evidenciando que ângulos mais elevados permitem a reprodução de trajetórias mais realistas e com maior dispersão lateral. Esse resultado concorda com o comportamento descrito por Wichmann (2017) e por Goetz et al. (2021), em que valores entre 35° e 40° maximizam a acurácia das simulações ao evitar confinamentos excessivos do fluxo. O expoente de divergência ótimo (1.0) atenuou o efeito do alto limiar de inclinação, equilibrando a amplitude de dispersão lateral e evitando a superposição de trajetórias em áreas de baixa declividade.

O módulo de fricção (PCM) apresentou maior sensibilidade ao coeficiente μ do que à razão M/D. O valor ótimo obtido ($\mu = 0,20$) enquadra-se na faixa típica de fluxos de baixa viscosidade, o que, à primeira vista, mostra-se coerente com a natureza dos escorregamentos rasos predominantes na Serra do Mar e coincide com o limite inferior sugerido por Wichmann

(2017). Essa magnitude de atrito basal, relativamente reduzida, também pode estar associada ao fato de parte das cicatrizes ocorrerem áreas próximas ocupadas, onde a cobertura florestal é descontínua e o solo encontra-se mais exposto, podendo favorecer maior mobilidade do material. Por outro lado, é importante reconhecer que o valor de $\mu = 0,20$ pode não representar integralmente o comportamento físico dos escorregamentos em setores recobertos por vegetação densa, que tende a aumentar o atrito e a viscosidade efetiva do fluxo. Assim, o coeficiente calibrado reflete adequadamente as condições geomorfológicas das áreas de encosta menos vegetadas e próximas à ocupação, mas deve ser interpretado com cautela em contextos de densa cobertura florestal, onde o comportamento reológico tende a divergir daquele estimado pelo modelo. A razão $M/D = 180$ indica inércia relativamente elevada nas porções de maior declividade, porém com influência limitada sobre o comprimento final das trajetórias, corroborando o problema de não unicidade entre μ e M/D , apontado por Perla et al. (1980).

O desempenho geral ($AAC-ROC = 0,720$) demonstra que, mesmo com restrições de dados, o GPP apresentou boa capacidade de representar o comportamento espacial dos escorregamentos rasos. Essa coerência evidencia a aplicabilidade do modelo em ambientes tropicais úmidos, ainda pouco explorados, e confirma sua sensibilidade adequada aos parâmetros topográficos e físicos mais relevantes.

Contudo, algumas limitações devem ser reconhecidas. Primeiramente, a precisão do GPP depende diretamente da qualidade do mapa de suscetibilidade, de modo que eventuais superestimações nas áreas instáveis repercutem na delimitação das trajetórias simuladas. Esse comportamento é observado, por exemplo, no modelo SHALSTAB, que tende a superestimar as áreas instáveis, conforme apontado por Michel, Kobiyama e Goerl (2014) e Vieira et al. (2018), o que pode influenciar as etapas subsequentes de simulação. Além disso, como o modelo não considera variações geológicas nem volumes específicos de material, as simulações tendem a representar a propagação média do processo, e não eventos isolados. A calibração baseada apenas em desempenho espacial ($AAC-ROC$) não permite avaliar a acurácia quantitativa das velocidades e dos volumes depositados, limitação também destacada por Klade (2022).

5.3 Elementos expostos

A análise do uso e cobertura do solo evidencia o predomínio da classe de Formação Florestal, que representa aproximadamente 76% da área total da bacia do rio Camburi e corresponde aos setores de maior declividade e altitude. As classes de Vegetação de Restinga, Área Urbana e Mosaico de Usos também possuem expressão significativa, ocupando 15,8%,

4,9% e 2,56% da área da bacia, respectivamente, predominando nas porções mais planas da Planície Litorânea. As demais categorias de uso e cobertura, de ocorrência pontual, representam conjuntamente menos de 0,3% da área total (Figura 9).

No que se refere aos elementos expostos, foram identificadas 3.667 edificações dentro da área da bacia, concentradas majoritariamente na Planície Litorânea (91%), com 9% situadas nas vertentes da Serra do Mar. Essa distribuição reflete a relação direta entre a ocupação humana e os setores de menor declividade, embora parte das construções esteja inserida em áreas de risco potencial.

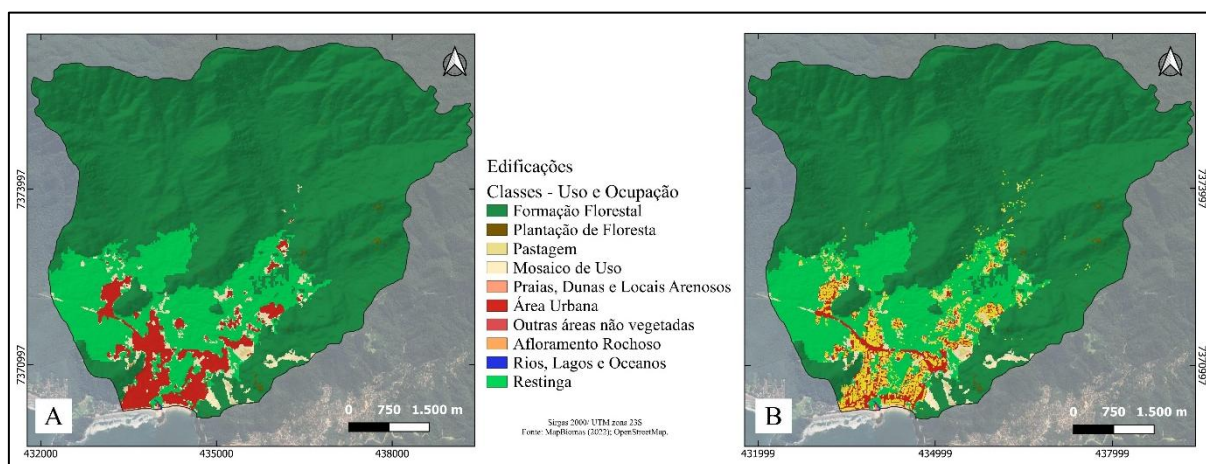


Figura 9 - (a) Uso e Ocupação do Solo; (b) Uso e Ocupação do Solo e Edificações.

Os resultados do modelo de suscetibilidade indicam que as áreas mais instáveis coincidem predominantemente com a Formação Florestal, reforçando a influência da morfologia e dos solos rasos na predisposição aos escorregamentos (Figura 10). Padrão semelhante é observado para o mapa de perigo, no qual as classes que variam de muito baixa a muito alta ocorrem com maior frequência nessa mesma categoria de uso e cobertura do solo. Em contrapartida, as classes de Vegetação de Restinga, Área Urbana e Mosaico de Usos correspondem, em sua maioria, à classe incondicionalmente estável, e as áreas urbanizadas localizam-se majoritariamente em zonas de perigo inexistente, ou seja, fora do alcance das trajetórias simuladas de escorregamentos.

Em relação às edificações, a maior parcela encontra-se em áreas classificadas como incondicionalmente estáveis (94,4%), enquanto 1,28% (47 edificações) está inserida em áreas incondicionalmente instáveis. Nas classes de suscetibilidade associadas a limiares críticos de precipitação de até 50 mm/dia, foram identificadas 114 edificações (3,08%), ao passo que as faixas de 50 a 100 mm/dia e 100 a 200 mm/dia abrangem 33 (0,9%) e 12 (0,33%) edificações, respectivamente.

De maneira análoga, cerca de 89,4% da área edificada está situada em setores de perigo inexistente, o que demonstra a concentração da ocupação em terrenos estáveis. As demais edificações distribuem-se entre as classes de perigo muito baixo (3,12%), baixo (4,53%) e moderado (2,38%), enquanto apenas 0,57% correspondem às classes de perigo alto (0,55%) e muito alto (0,02%). Ressalta-se que, em alguns casos, uma mesma edificação pode abranger mais de uma classe de perigo, especialmente nas áreas de transição entre a planície e as encostas.

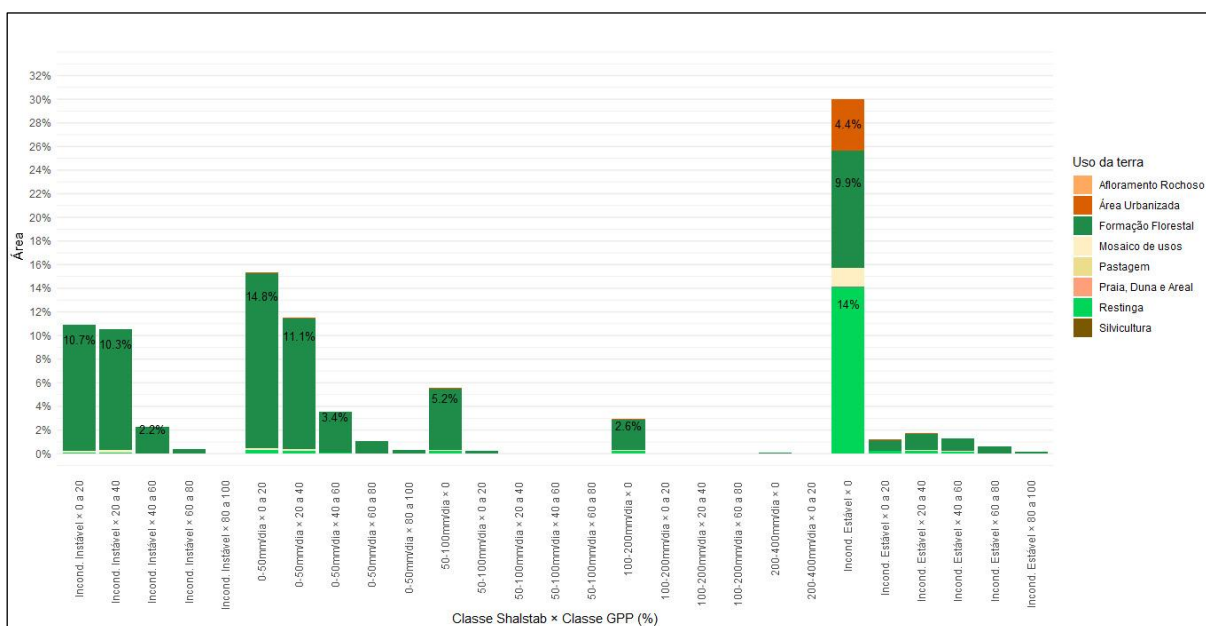


Figura 10- Classes do SHALSTAB e de frequência de trajetórias em relação ao uso do solo.

Cerca de 77% das edificações da bacia estão inseridas em áreas classificadas como urbanizadas, correspondentes a setores de ocupação humana consolidada e superfícies construídas, segundo o mapeamento do MapBiomas. Em contraposição, a Serra do Mar apresenta-se amplamente recoberta por Formação Florestal, abrangendo 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), situadas predominantemente em terrenos de elevada declividade. A legislação ambiental que restringe o uso dessas áreas tem como finalidade conter a expansão urbana sobre setores sensíveis e ecologicamente frágeis. Contudo, destaca-se que tais porções do relevo, além de possuírem alta declividade, coincidem com zonas de maior suscetibilidade a escorregamentos, o que reforça seu papel como áreas de atenção prioritária.

Nesse contexto, verificou-se que 206 edificações se encontram inseridas em algum nível de classe suscetível, o que evidencia a presença de ocupações em áreas de risco potencial. Em relação ao perigo, observa-se que 389 edificações se encontram enquadradas em classes de perigo, número que representa quase o dobro do identificado para a suscetibilidade. Desse total, aproximadamente 60 edificações correspondem a áreas classificadas como de perigo alto ou muito alto.

Apesar de a maior parte das edificações estar localizada em áreas classificadas como de perigo inexistente ou baixo, predominantemente associadas aos setores de planície, é importante salientar que, durante eventos pluviométricos extremos, podem ocorrer processos de natureza complexa, nos quais os escorregamentos atuam como mecanismos deflagradores de fluxos de detritos e lama, ampliando de forma significativa as áreas potencialmente afetadas. Ressalta-se, contudo, que a presente pesquisa não incluiu a modelagem específica desses fluxos, o que constitui uma limitação na representação integral dos perigos geomorfológicos, especialmente no que se refere à estimativa da extensão real das zonas de impacto em cenários de precipitação extremos.

Ao confrontar as classes de suscetibilidade obtidas com os setores de risco mapeados pelo IPT (2018) para a bacia do rio Camburi, verifica-se uma correspondência expressiva entre os resultados. O Setor 1, classificado pelo IPT como de Risco Alto (R3), foi enquadrado pelo modelo SHALSTAB como incondicionalmente instável, padrão também observado no Setor 2, definido como área de monitoramento. Já o Setor 3, igualmente identificado como de monitoramento, coincide com a classe de instabilidade associada a limiares críticos de precipitação de até 50 mm/dia, indicando coerência entre as metodologias. Em relação ao perigo, os três setores delimitados pelo IPT situam-se majoritariamente nas classes de perigo baixo a médio, embora tenham sido identificadas outras áreas classificadas como de perigo alto que não constam nos setores oficiais de risco, o que sugere a existência de novas áreas em situação de perigo ainda não incorporadas aos levantamentos institucionais.

Por fim, a comparação entre os resultados obtidos e o mapeamento de risco do IPT (2018) reforça a necessidade de atualização periódica desses diagnósticos, uma vez que novas ocupações vêm se consolidando em áreas suscetíveis e em perigo. A articulação entre instrumentos técnicos de mapeamento e políticas públicas de controle de uso e ocupação do solo é, portanto, essencial para reduzir a vulnerabilidade de comunidades instaladas em zonas de instabilidade potencial e prevenir a ampliação do risco geomorfológico no litoral norte paulista.

6.CONCLUSÃO

Do ponto de vista metodológico, a integração dos modelos SHALSTAB e GPP demonstrou-se eficiente para representar tanto as áreas de instabilidade potencial quanto as rotas preferenciais de propagação dos escorregamentos. Essa abordagem integrada permite compreender espacialmente o perigo, mesmo sob restrições de dados geotécnicos e hidrológicos. Contudo, a ausência de simulações de fluxos de detritos constitui uma limitação relevante, pois tais processos podem expandir as áreas de impacto e afetar edificações situadas em zonas atualmente classificadas como seguras. Futuras aplicações poderiam incorporar modelos complementares, a fim de aprimorar a representação de processos complexos e oferecer subsídios mais precisos para o planejamento territorial e a mitigação de desastres.

Ressalta-se que os resultados obtidos também demonstram a viabilidade da calibração de modelos físicos por meio de procedimentos estatísticos, evidenciando sua eficiência na definição de parâmetros ótimos e na adaptação de metodologias ainda pouco exploradas no Brasil, como o modelo *Gravitational Process Path* (GPP).

Em relação aos elementos expostos, observa-se que, embora a diferença seja discreta, o grau de perigo associado às edificações é superior à suscetibilidade, indicando que a propagação das trajetórias dos escorregamentos possui influência mais ampla sobre o terreno do que os locais pontuais de ruptura. Tal resultado evidencia que o impacto potencial não se restringe às áreas instáveis identificadas pelo modelo de suscetibilidade, mas se estende a setores situados ao longo das rotas preferenciais de deslocamento do material mobilizado.

A metodologia empregada e os resultados obtidos neste estudo constituem uma base técnica relevante para o aperfeiçoamento de futuras análises de perigo no município de São Sebastião e em outras porções da Serra do Mar. Ademais, a avaliação dos elementos expostos apresentada oferece subsídios importantes para a formulação de medidas preventivas e estratégias de gestão de risco voltadas à bacia do rio Camburi, contribuindo para o planejamento territorial e a mitigação de impactos associados aos movimentos de massa.

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

AGLIARDI, F.; CROSTA, G. B. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 40, n. 4, p. 455–471, 2003.

ALCÁNTARA-AYALA, Irasema. Landslides in a changing world. *Landslides*, 15 jan. 2025.

AVELAR, André S. *et al.* Mechanisms of the Recent Catastrophic Landslides in the Mountainous Range of Rio de Janeiro, Brazil. *In: Landslide Science and Practice*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 265–270.

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*, v. 32, p. 709–724, 1995.

BIERMAN, Paul R.; MONTGOMERY, David R. Hillslope. *In: Key Concepts in Geomorphology*. 2014. ed. New York: W.H. Freeman & Co Ltd, 2014. p. 145–178.

BONINI, José Eduardo *et al.* Suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir de parâmetros morfométricos e dos modelos SHALSTAB e do Valor Informativo. *Confins*, v. 46, 2020.

BONINI, José Eduardo *et al.* Escorregamentos rasos em São Luiz do Paraitinga (SP, Brasil) (2009-2010). *Physis Terrae - Revista Ibero-Afro-Americana de Geografia Física e Ambiente*, v. 2, n. 2, p. 85–99, 27 jan. 2021.

BONINI, José Eduardo *et al.* Landslide inventory of the 2023 Serra do Mar disaster (Brazil). *Discover Geoscience* 2025 3:1, v. 3, n. 1, p. 1–17, 22 abr. 2025.

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*, v. 119, p. 104029, nov. 2022.

COROMINAS, J. *et al.* Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 24 nov. 2013.

CROZIER, M. J. Multiple-occurrence regional landslide events in New Zealand: Hazard management issues. *Landslides*, v. 2, n. 4, p. 247–256, 12 dez. 2005.

CROZIER, Michael J. “Landslides: Causes, Consequences and Environment”. Croom Helm Australia Pty. Ltd., London, p. 252, 1986.

DIAS, Helen Cristina *et al.* Statistical-based shallow landslide susceptibility assessment for a tropical environment: a case study in the southeastern Brazilian coast. *Natural Hazards*, v. 108, n. 1, p. 205–223, 1 ago. 2021.

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*, v. 19, n. 4, p. 1018–1036, 13 abr. 2022.

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.

FERNANDES, Nelson F. *et al.* Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. *CATENA*, v. 55, n. 2, p. 163–181, jan. 2004.

FERNANDES, Nelson Ferreira; AMARAL, Cláudio Pameiro do. Movimentos de Massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, Antonio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista da (Orgs.). Geomorfologia e Meio Ambiente. [S.l.]: Bertrand Brasil, 1996. p. 123–194.

GOETZ, Jason *et al.* Optimizing and validating the Gravitational Process Path model for regional debris-flow runout modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 21, n. 8, p. 2543–2562, 25 ago. 2021.

GÓMEZ, Derly; GARCÍA, Edwin F.; ARISTIZÁBAL, Edier. Spatial and temporal landslide distributions using global and open landslide databases. *Natural Hazards*, v. 117, n. 1, p. 25–55, 1 maio 2023.

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*, v. 13, n. 11, p. 2779–2796, 7 nov. 2013.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.

GUIMARÃES, Renato Fontes *et al.* Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology*, v. 69, n. 1–2, p. 99–108, abr. 2003.

GUZZETTI, Fausto *et al.* Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, v. 31, n. 1–4, p. 181–216, dez. 1999.

HUNGR, Oldrich *et al.* A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, v. 7, n. 3, p. 221–238, 1 ago. 2001.

IBGE. Censo de 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm_source=ibge&utm_medium=home&utm_campaign=portal>. Acesso em: 13 jan. 2024.

IBGE. Mapa Geológico do Brasil. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 18 jan. 2025a.

IBGE. Mapa Pedológico do Brasil. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 18 jan. 2025b.

IPT. Mapeamento de áreas de risco de movimentos de massa no município de São Sebastião, SP. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2018.

JOLY, C. A.; LEITÃO FILHO, H. F.; SILVA, S. M. O Patrimônio Florístico. Rio de Janeiro: Index, 1991.

KANJI, Milton A.; CRUZ, Paulo T.; MASSAD, Façal. Debris flow affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil. *Landslides*, v. 5, n. 1, p. 71–82, 28 fev. 2008.

KANUNGO, D. P. *et al.* A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. *Engineering Geology*, v. 85, n. 3–4, p. 347–366, 21 jun. 2006.

KLADE, Martina. Reichweitenmodellierung von flachgründigen Hangrutschungen mit dem Gravitational Process Path Model in ausgewählten Gemeinden des Steirischen Beckens. Masterarbeit—[S.l.]: Universität Graz, 2022.

KRIEGER, Gerhard *et al.* TanDEM-X: A radar interferometer with two formation-flying satellites. *Acta Astronautica*, v. 89, p. 83–98, ago. 2013.

LEE, Saro. Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 26, n. 7, p. 1477–1491, 10 abr. 2005.

LISTO, Fabrizio de Luiz Rosito; GOMES, Maria Carolina Villaça; VIEIRA, Bianca Carvalho. AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA COM O MODELO TRIGRS. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19, n. 1, 1 jan. 2018.

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>. Acesso em: 14 fev. 2025.

MARENGO, Jose A. *et al.* 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*, v. 120, n. 8, p. 7997–8024, 28 jun. 2024.

MARTINS, T. *et al.* Assessment of Lidar-derived DTMs for landslide susceptibility mapping: Application in the Brazilian subtropical forest. *In: Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice.* [S.l.]: CRC Press, 2016. p. 1389–1392.

MCDUGALL, Scott. 2014 Canadian Geotechnical Colloquium: Landslide runout analysis — current practice and challenges. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 54, n. 5, p. 605–620, maio 2017.

MERGILI, M.; KRENN, J.; CHU, H. J. r.randomwalk v1, a multi-functional conceptual tool for mass movement routing. *Geoscientific Model Development*, v. 8, n. 12, p. 4027–4043, 16 dez. 2015.

MERGILI, Martin; SCHWARZ, Leonhard; KOCIU, Arben. Combining release and runout in statistical landslide susceptibility modeling. *Landslides*, v. 16, n. 11, p. 2151–2165, 1 nov. 2019.

MICHEL, Gean Paulo; KOBİYAMA, Masato; GOERL, Roberto Fabris. 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, 18 jul. 2014.

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.

MONTGOMERY, David R.; DIETRICH, William E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, v. 30, n. 4, p. 1153–1171, 9 abr. 1994.

PELLEGATTI, Cesar Henrique Gonçalves; GALVANI, Emerson. Avaliação da precipitação na Serra do Mar - SP em eventos de diferentes intensidade e duração. *GEOUSP: espaço e tempo*, n. 27, p. 147–148, 2010.

PERLA, R. ,; CHENG, T. T.; MCCLUNG, D. M. A two-parameter model of snow-avalanche motion. *J. Glaciol.*, v. 26, p. 197–207, 1980.

RICKENMANN, Dieter. Runout prediction methods. *In: Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 305–324.

SELBY, M. J. Mass Wasting of Soils. *In: Hillslope Materials and Processes*. 2. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 1993. p. 249–355.

SIDLE, Roy C.; PEARCE, Andrew J.; O'LOUGHLIN, Colin L. Significance of Soil Mass Movement. *In: Hillslope Stability and Land Use*. First edition ed. [S.l.]: American Geophysical Union's Water Resources, 1985. p. 1–9.

VARNES, D. J. Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice. *Natural Hazards*, v. Unesco, n. Paris, 1984.

VIEIRA, Bianca Carvalho *et al.* Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 77, n. 6, p. 260, 27 mar. 2018.

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*, v. 34, p. 307, 23 set. 2015.

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.

VIEIRA, Bianca Carvalho; MARTINS, Tiago Damas; LISTO, Fabrizio de Luiz Rosito. Previsão de escorregamentos rasos utilizando modelos matemáticos em bases físicas. *In: GUNTHER, WR; CICCOTTI, L.; RODRIGUES, AC (Orgs.). Desastres: múltiplas abordagens e desafios*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

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*, v. 29, p. 161, 17 jun. 2015.

WICHMANN, Volker. The Gravitational Process Path (GPP) model (v1.0) – a GIS-based simulation framework for gravitational processes. *Geoscientific Model Development*, v. 10, n. 9, p. 3309–3327, 8 set. 2017.

WOLLE, C. M. Análise dos escorregamentos translacionais rasos numa região da Serra do Mar. Tese de Doutorado—São Paulo: Universidade de São Paulo, 1988.

ZWEIG, M. H.; CAMPBELL, G. Receiver-operating characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine. *Clinical Chemistry*, v. 39, n. 4, 1993.