

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

**MATHEUS PICOLI DE ALMEIDA**

**AVALIAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE À ESCORREGAMENTOS**  
**TRANSLACIONAIS RASOS NA BACIA DO RIO CAMBURI, SÃO**  
**SEBASTIÃO-SP**

São Paulo

2025

MATHEUS PICOLI DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE À ESCORREGAMENTOS  
TRANSLACIONAIS RASOS NA BACIA DO RIO CAMBURI, 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. Dr<sup>a</sup>. 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.

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

A447a Almeida, Matheus Picoli de  
Avaliação de suscetibilidade à escorregamentos  
translacionais rasos na bacia do Rio Camburi, São  
Sebastião - SP / Matheus Picoli de Almeida;  
orientadora Bianca Carvalho Vieira - São Paulo, 2025.  
64 f.

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

1. Escorregamentos Rasos. 2. SHALSTAB. 3. São  
Sebastião. 4. Suscetibilidade. I. Vieira, Bianca  
Carvalho, orient. II. Título.

ALMEIDA, Matheus Picoli de. **Avaliação de suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos na bacia do Rio Camburi, 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 \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Michelly e Samuel, que fizeram o possível e impossível para que eu pudesse realizar os meus sonhos, sempre oferecendo incentivo e acolhimento.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Bianca Carvalho Vieira, por todo o apoio e orientação durante este trabalho, seus ensinamentos foram muito importantes para nortear o meu trabalho.

Aos meus amigos de graduação e vida, que estiveram do meu lado ao longo de toda a minha trajetória, sem eles a jornada teria sido muito mais difícil e menos empolgante.

Aos colegas de estágio e pesquisa do Instituto Butantan e Secretaria do Verde e Meio Ambiente de São Paulo, que me apoiaram em inúmeros momentos e me ensinaram muito. Agradeço também aos colegas do GPmorfo, por toda ajuda no desenvolvimento deste trabalho e na modelagem aplicada.

Por fim, agradeço ao Departamento de Geografia e a Universidade de São Paulo, a graduação me proporcionou experiências inesquecíveis e ampliou meus horizontes em termos que jamais poderia imaginar.

Muito obrigado!

## RESUMO

ALMEIDA, Matheus Picoli de. **Avaliação de suscetibilidade à escorregamentos translacionais rasos na bacia do Rio Camburi, 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.

Os movimentos gravitacionais de massa são fenômenos naturais exogenéticos que ocorrem em diversas condições climáticas e geomorfológicas, sendo frequentemente associados a grandes impactos socioeconômicos e estruturais, especialmente em terrenos íngremes, como na Serra do Mar. A utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e modelos matemáticos tem sido cada vez mais importante na avaliação de áreas de risco, permitindo análises mais detalhadas dos fatores que contribuem para os escorregamentos na tomada de decisões e prevenção. Este estudo se propõe a avaliar a suscetibilidade a escorregamentos rasos na bacia do Rio Camburi, em São Sebastião (SP), utilizando parâmetros topográficos e o modelo SHALSTAB, com o objetivo de contribuir para a prevenção de desastres naturais na região. Para analisar a suscetibilidade foram utilizados valores de parâmetros geotécnicos e hidrológicos, além de combinar com parâmetros topográficos de hipsometria, curvatura, ângulo, orientação de encosta e área de contribuição, validados por índices de Frequência(F), Concentração de Cicatrizes(CC) e Potencial de Escorregamentos(PE), realizados por meio de um inventário de cicatrizes. Os resultados mostraram importante influência da topografia, concentrando os processos de escorregamento em intervalos de 50-100m, ângulos de 20 a 40°, em curvaturas côncavas ou convexas orientadas para N,NO e NE. O modelo de suscetibilidade se mostrou efetivo quando validado pelos índices e inventário, apresentando mais de 70% das cicatrizes em áreas consideradas instáveis pelo modelo. No geral, considera-se que o uso do modelo e da avaliação dos parâmetros topográficos é fundamental para análises preditivas, no entanto, é importante que trabalhos futuros realizem simulações com dados mais próximos da localidade, juntamente de um inventário de cicatrizes mais detalhado.

Palavras-chave: Escorregamentos Rasos, SHALSTAB, São Sebastião (SP), Suscetibilidade

## ABSTRACT

DE ALMEIDA, Matheus Picoli. **Avaliação de suscetibilidade à escorregamentos translacionais rasos na bacia do Rio Camburi, 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.

Mass movements are exogenic natural phenomena that occur under various climatic and geomorphological conditions, often associated with significant socioeconomic and structural impacts, especially in steep terrains, such as the Serra do Mar. The use of Geographic Information Systems (GIS) and mathematical models has become increasingly important in assessing risk areas, allowing for more detailed and accurate analyses of the factors contributing to landslides, thereby aiding decision-making focused on prevention. This study aims to assess the susceptibility to shallow landslides in the Camburi River basin, in São Sebastião (SP), using topographic parameters and the SHALSTAB model, with the goal of contributing to the prevention of natural disasters in the region. To analyze susceptibility, geotechnical and hydrological parameters were used, combined with topographic parameters such as hypsometry, curvature, slope angle, orientation, and contributing area, validated by the Frequency (F), Scar Concentration (CC), and Landslide Potential (PE) indices, obtained through a scar inventory. The results showed a significant influence of topography, concentrating landslide processes in areas of 50-100 meters, with slope angles between 20 and 40°, in concave or convex curvatures oriented towards the N, NW, and NE. The susceptibility model proved effective when validated by the indices and inventory, with 70% of the scars found in areas considered unstable by the model. Overall, it is considered that the use of the model and the evaluation of topographic parameters are essential for predictive analyses. However, it is important that future studies perform simulations with data closer to the locality, along with a more detailed scar inventory, focusing particularly on rupture areas.

**Keywords:** Shallow landslides, SHALSTAB, São Sebastião (SP), landslides susceptibility

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1-</b> ESCORREGAMENTOS NA VILA SAHY, SÃO SEBASTIÃO - SP . FONTE: O GLOBO, 2023. .....	12
<b>FIGURA 2 -</b> PERFIL ESQUEMÁTICO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE QUEDA E RASTEJO. FONTE: USGS, 2014. ....	15
<b>FIGURA 3 -</b> PERFIL ESQUEMÁTICO DE CORRIDAS(DEBRIS-FLOW) FONTE: USGS, 2014.....	15
<b>FIGURA 4 -</b> TIPOS DE ESCORREGAMENTOS. MODIFICADO DE BIERMAN E MONTGOMERY (2014). .....	16
<b>FIGURA 5 -</b> (A) ESQUEMA DE ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL RASO, (B) ESCORREGAMENTOS NO VALE DO RIO MOGI, SERRA DO MAR (SP). FONTE: USGS, 2014; ARQUIVO IPT ,1985 .....	17
<b>FIGURA 6 -</b> APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NA ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE. NESTA PESQUISA FORAM APRESENTADOS MÚLTIPLOS CENÁRIOS UTILIZANDO DIFERENTES PARÂMETROS FONTE: VIEIRA, 2007 .....	22
<b>FIGURA 7 -</b> MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO CAMBURI .....	23
<b>FIGURA 8 -</b> FLUXOGRAMA DE PROCEDIMENTOS PARA A GERAÇÃO DOS MAPAS DE SUSCETIBILIDADE. ....	25
<b>FIGURA 9 -</b> MAPA DAS ÁREAS CONSIDERADAS E DESCARTADAS DA BACIA DO RIO CAMBURI, EM AMARELO ESTÃO REPRESENTADAS AS ÁREAS DESCONSIDERADAS PARA A ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE. ....	27
<b>FIGURA 10 -</b> INTERFACE DAS FERRAMENTAS UTILIZADAS PARA A GERAÇÃO DOS MODELOS PREDITIVOS. ....	29
<b>FIGURA 11 -</b> AMOSTRAS PARA A CRIAÇÃO DAS CLASSES ESPECTRAIS DO SCP .....	31
<b>FIGURA 12 -</b> HISTOGRAMAS GERADOS NO SAGA GIS COM DADOS DA BACIA TOTAL E RECORTE DAS CICATRIZES .....	33
<b>FIGURA 13 -</b> INVENTÁRIO DE CICATRIZES OBTIDO PELA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA, AO TODO FORAM MAPEADAS 53 CICATRIZES QUE SE CONCENTRARAM NA PORÇÃO SUL DA BACIA .....	34
<b>FIGURA 14 –</b> (A) OBRAS DE CONTENÇÃO E REPARO NO CONDOMÍNIO BRISAS DO CAMBURYZINHO (B) CICATRIZ DE ÁREA DE 6.000M <sup>2</sup> LOCALIZADA EM ENCOSTA ACIMA DO CONDOMÍNIO. FONTE: TIAGO MARTINS (DRONE DJI AIR 2S).....	35



<b>FIGURA 15</b> - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA ÁREA DAS CICATRIZES. ....	36
<b>FIGURA 16</b> - DISTRIBUIÇÃO DAS CICATRIZES EM RELAÇÃO À ÁREA OCUPADA POR CADA UMA .	36
<b>FIGURA 17</b> - SÉRIE TEMPORAL DAS ÁREAS MAIS AFETADAS POR ESCORREGAMENTOS .....	37
<b>FIGURA 18</b> - ESPÉCIES PIONEIRAS OCUPANDO ÁREAS AFETADAS POR ESCORREGAMENTOS .....	38
<b>FIGURA 19</b> - ÁREA DE PLANÍCIE DA BACIA DO RIO CAMBURI, AO FUNDO, INDICADOS PELA SETAS, ESTÃO LOCALIZADOS OUTROS PONTOS DE MAIOR CONCENTRAÇÃO DE CICATRIZES.....	39
<b>FIGURA 20</b> - MAPA HIPSOMÉTRICO DA BACIA DO RIO CAMBURI, AS CICATRIZES SE ENCONTRAM NAS PORÇÕES INFERIORES, EM ELEVAÇÕES ATÉ 250M. ....	40
<b>FIGURA 21</b> - ÍNDICES DE F,CC E PE (HIPSOMETRIA).....	41
<b>FIGURA 22</b> - MAPA DE ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DE ENCOSTAS .....	42
<b>FIGURA 23</b> - ÍNDICES DE F,CC E PE (ÂNGULO DE INCLINAÇÃO).....	43
<b>FIGURA 24</b> - : MAPA DE ASPECTO DA BACIA DO RIO CAMBURI. ....	44
<b>FIGURA 25</b> - ÍNDICES DE F,CC E PE DA ORIENTAÇÃO DE ENCOSTAS .....	45
<b>FIGURA 26</b> - MAPA DE CURVATURA (EM PERFIL) DA BACIA DO RIO CAMBURI .....	46
<b>FIGURA 27</b> - ÍNDICES DE F,CC E PE DAS CURVATURAS.....	47
<b>FIGURA 28</b> - MAPA DE ÁREAS DE CONTRIBUIÇÃO DA BACIA DO RIO CAMBURI. ....	48
<b>FIGURA 29</b> - ÍNDICES DE F,CC E PE DAS ÁREAS DE CONTRIBUIÇÃO .....	49
<b>FIGURA 30</b> - MODELO 3D DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE .....	50
<b>FIGURA 31</b> - MAPA DE SUSCETIBILIDADE GERADO PELO MODELO SHALSTAB .....	51
<b>FIGURA 32</b> - ÍNDICES F E CC - CLASSES SUSCETIBILIDADE.....	52
<b>FIGURA 33</b> - ÍNDICE PE - CLASSES SUSCETIBILIDADE .....	52
<b>FIGURA 34</b> - EXEMPLO DE POLÍGONO DO INVENTÁRIO DE CICATRIZES ENQUADRANDO ÁREAS DE DEPÓSITO.....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

USP	Universidade de São Paulo
SHALSTAB	Shallow Slope Stability Model
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
CPRM	Cia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico do Brasil)
SAGA GIS	<i>System for Automated Geoscientific Analyses</i>
MDE	Modelo de Elevação
CC	Concentração de Cicatrizes
F	Frequência
PE	Potencial de Escorregamentos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E OBJETIVO .....</b>	<b>12</b>
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>14</b>
2.1	Movimentos de Massa.....	14
2.2	Modelo de Previsão SHALSTAB.....	18
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>23</b>
<b>4.</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>25</b>
4.1	Delimitação da bacia, dados topográficos e análise morfométrica.....	26
4.2	Aplicação do Modelo SHALSTAB .....	28
4.3	Inventário de Cicatrizes.....	30
4.4	Validação do Modelo SHALSTAB .....	32
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>34</b>
5.1	Inventário de Cicatrizes .....	34
5.2	Mapa de Hipsometria.....	40
5.3	Mapa de Ângulo de Encosta.....	42
5.4	Mapa de Orientação de Encostas.....	44
5.5	Mapa de Curvatura .....	46
5.6	Mapa de Áreas de Contribuição .....	48
5.7	Mapa de Suscetibilidade – Modelo SHALSTAB.....	50
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Os movimentos gravitacionais de massa são processos exogenéticos naturais que ocorrem em diferentes condições climáticas e geomorfológicas, estando muitas vezes associados a grandes danos socioeconômicos e estruturais (IPT, 1991). Esses fenômenos representam um grande problema social e ambiental, sobretudo em relevos íngremes, como na Serra do Mar. O desastre de fevereiro de 2023 no município de São Sebastião, localizado no litoral norte do estado de São Paulo, constitui um exemplo da gravidade destes processos. Neste evento, ocorreram inúmeros movimentos de massa, atingindo comunidades de Juquehy, Praia da Baleia e Vila Sahy (Figura 1). Com mais de 600 mm de chuva em menos de 24 horas, foram desencadeados escorregamentos e corridas de detritos, que destruíram infraestruturas e causaram 65 mortes (Marengo et al, 2023).



*Figura 1- Escorregamentos na Vila Sahy, São Sebastião - SP . Fonte: O Globo, 2023.*

A Serra do Mar é um complexo sistema orográfico que apresenta um conjunto de escarpas festonadas com cerca de 1.000 km de extensão, abrangendo a costa Sul e Sudeste do Brasil. Segundo Ab’Saber (1950), esse conjunto de planaltos, morros e escarpas constitui um alinhamento de escarpas costeiras de “fronts” abruptos e dissimétricos voltados para o oceano, possuindo feições de um gigantesco paredão terminal. Por ser uma área submetida a altas

pluviosidades médias anuais e episódios prolongados de chuvas, envolve intensa participação de movimentações de massa (Almeida e Carneiro, 1998).

A frequência e periculosidade destes processos demandou soluções governamentais cada vez mais robustas, como a Lei nº 12.608/2012 (BRASIL, 2012), que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). No entanto, embora a prevenção de eventos seja de grande relevância para o crescimento ordenado das cidades, as ações nacionais nesse sentido ainda são consideradas insuficientes (CPRM, 2018). Dessa forma, a avaliação de instabilidade da Serra do Mar é uma exigência, além de instrumento fundamental para os estudos de prevenção e redução de desastres naturais (Almeida e Carneiro, 1998).

O desenvolvimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) proporcionou a aplicação de novos métodos na avaliação das áreas de risco e seu mapeamento, como o uso de modelos para representar processos reais. Com o aumento na capacidade de processamento de informações e a sobreposição de dados, a análise pode ser feita por diferentes perspectivas, que podem ser subdivididas em abordagens heurísticas, estatísticas e determinísticas (Van Westen et al, 1996).

Os modelos de bases físicas desempenham papel fundamental na análise de estabilidade de taludes e outros sistemas complexos. Tais modelos utilizam equações para fornecer dados qualitativos e quantitativos sobre o comportamento de processos físicos e sua relação com os fatores de desencadeamento (Guzzetti et al, 1999). De maneira geral, os métodos preditivos operam com base em enfoques hidrológicos e de estabilidade de taludes, atuando como uma combinação de diversas frentes (Silva, 2006).

Diante da variedade de modelos e métodos de análise, este trabalho visa avaliar a suscetibilidade a escorregamentos rasos na bacia do Rio Camburi (São Sebastião - SP), utilizando parâmetros geomorfológicos e o SHALSTAB, um modelo matemático de bases físicas.

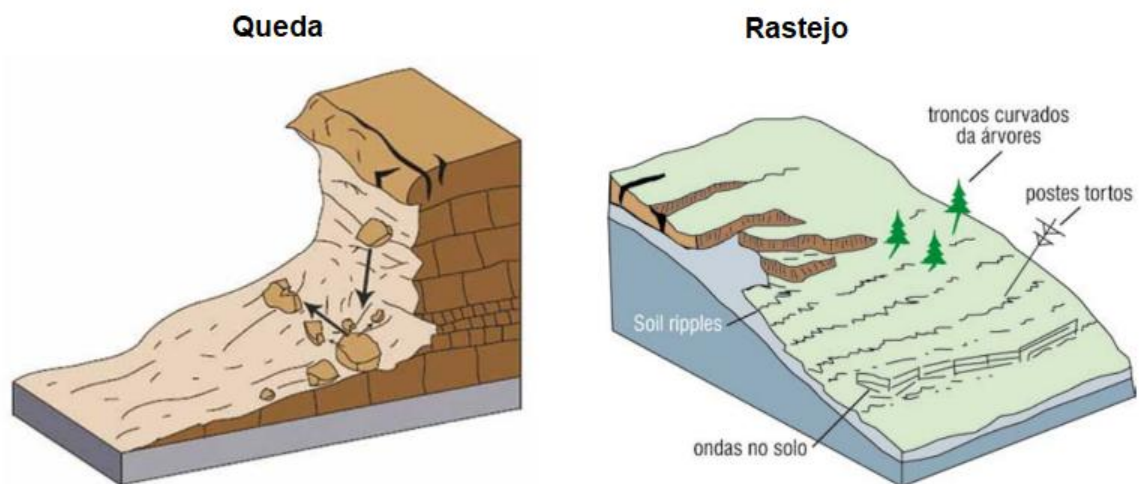
## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Movimentos de Massa**

O uso do termo Movimento de Massa é comumente utilizado de forma geral para se referir aos movimentos de descida de solo e rochas pela ação da gravidade (IPT, 1991). A natureza diversa destes eventos implica uma grande variedade de fatores condicionantes e processos, que são categorizados conforme suas especificidades. Diversos autores propuseram distintas classificações, normalmente seguindo critérios como plano de ruptura e tipo de material envolvido (Guidicini e Nieble, 1984). Nas classificações pioneiras destacam-se os estudos de Sharpe (1938) que identificou os movimentos de massa com base em diversos fatores, como o tipo e geometria do movimento, sua magnitude, a velocidade do processo, tipo de material e sedimento, além de outros critérios, como os aspectos hidráulicos e planos de ruptura (Fernandes e Amaral, 1996).

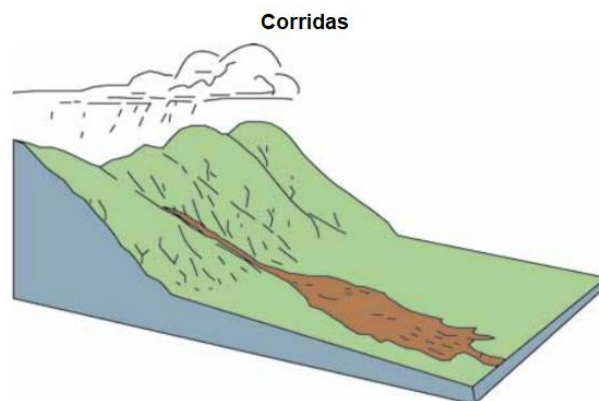
Dentre os diversos sistemas classificatórios existentes na literatura, Fernandes e Amaral (1996) destacam a proposta de Varnes(1958), que estabelece três principais categorias subdivididas em escorregamentos, quedas ou escoamentos (fluxos) ou até mesmo uma forma complexa de combinação das mesmas. Destacam-se também os estudos de Crozier (1986) e Selby (1993), e em âmbito nacional, os trabalhos de Freire (1965) e Guidicini e Nieble (1984) propuseram diferentes terminologias.

Os movimentos classificados como queda estão relacionados a encostas íngremes e paredões rochosos sem a presença de superfícies de deslizamento, resultando na queda de blocos ou lascas de rocha pela ação da gravidade (Guidicini e Nieble, 1984). A ocorrência deste processo está relacionada com a presença de descontinuidades na rocha (fraturas, bandamentos, etc) e por cenários com processos intempéricos já avançados. O rastejo, ou *creep*, é um movimento de massa gravitacional caracterizado pela lenta movimentação do solo, ocorrendo em escalas de centímetros/ano. A Figura 2 é a representação esquemática dos processos apresentados (Fernandes e Amaral, 1996).



**Figura 2 - Perfil esquemático dos movimentos gravitacionais de queda e rastejo. Fonte: USGS, 2014.**

As corridas (*debris-flow*) se caracterizam pelo movimento rápido, nos quais o material e sedimento mobilizado se comporta como um fluido viscoso, sendo composto de lama, solo, blocos, vegetação e outros elementos. Segundo Wolle e Carvalho (1994), este movimento ocorre em terrenos com ravinas ou vales estreitos ao longo das encostas, onde o material é posteriormente depositado nas áreas de menor declividade. Os autores caracterizam este movimento por seu caráter hidrodinâmico e excesso de água em sua deflagração.



**Figura 3 - Perfil esquemático de corridas(*debris-flow*) Fonte: USGS, 2014.**

Segundo Fernandes e Amaral (1996), os **escorregamentos** são definidos como movimentos rápidos que possuem planos definidos de ruptura, sendo caracterizados em função de sua forma. De acordo com Bierman e Montgomery (2014), os escorregamentos são

subdivididos em categorias de rupturas rasas ou profundas, denominados de translacionais e rotacionais, respectivamente. (Fernandes e Amaral, 1996; Bierman e Montgomery, 2014).

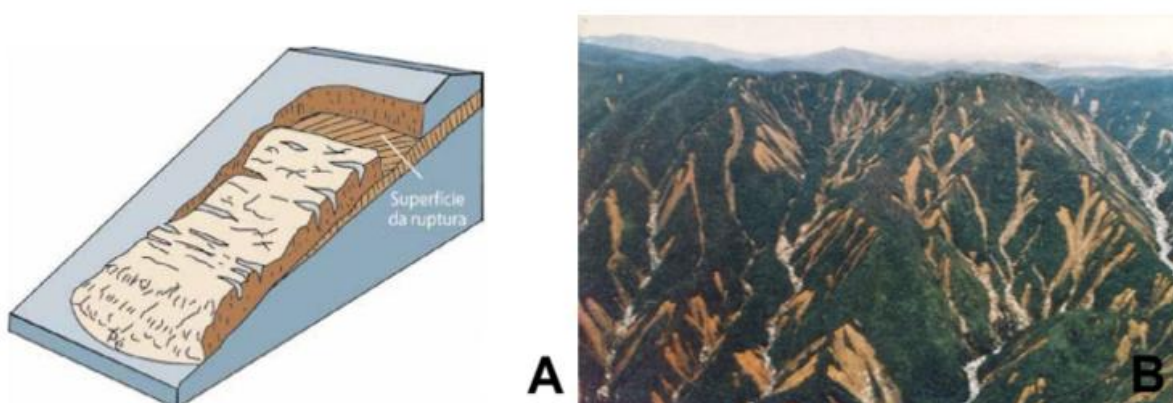


**Figura 4 - Tipos de escorregamentos. Modificado de Bierman e Montgomery (2014).**

Os escorregamentos rotacionais, ou *slumps*, apresentam uma superfície de ruptura em formato curvo, onde o material se move com uma concavidade voltada para cima. Sendo comumente associados a áreas com solos mais profundos e homogêneos, com maior infiltração e percolação da água (Selby, 1993; Guidicini e Nieble, 1984).

Sendo o mais frequente tipo de movimento de massa nas áreas de encostas da Serra do Mar e enfoque do presente trabalho, os escorregamentos translacionais possuem a superfície de ruptura planar, paralela ao plano da encosta, acompanhando as discontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas no interior do material (Fernandes e Amaral, 1996). Os autores ainda ressaltam que a ocorrência dos escorregamentos translacionais está relacionada com a existência de solos pouco profundos, com medidas que variam de 0,5m a 5,0m. Nas encostas da Serra do Mar, os escorregamentos translacionais rasos são processos recorrentes, sobretudo nas estações chuvosas, estando localizados nas áreas de média e altas encostas (De Ploey e Cruz, 1979).





**Figura 5 - (A) Esquema de escorregamento translacional raso, (B) Escorregamentos no Vale do Rio Mogi, Serra do Mar (SP). Fonte: USGS, 2014; Arquivo IPT ,1985**

A deflagração dos escorregamentos translacionais rasos está relacionada com a sobreposição de diversas forçantes sobre a encosta. Nesse aspecto, os condicionantes da instabilidade são a geologia (litologia, composição e estrutura), a morfologia e a hidrogeologia (águas superficiais e subterrâneas) da encosta (Bassaneli et al, 2016). Além disso, segundo Selby (1993), inúmeras outras variáveis atuam nesse sistema podendo atenuar ou aumentar a tensão cisalhante, tais fatores vão desde níveis atômicos, com reações físico-químicas (como hidratação/ressecamento de argilas ou mudanças catiônicas), fatores respectivos ao uso e ocupação do solo, mineralogia e até eventos de grande magnitude como terremotos e vulcanismo. O autor ainda relaciona a deflagração destes movimentos com precipitações intensas, com a alteração das pressões de água dentro do solo e da rocha e a sua consequente ruptura (Selby, 1993).

Apesar de serem eventos naturais, tais processos podem apresentar magnitudes significativas, mobilizando uma grande quantidade de sedimentos e configurando perigo para as populações que ocupam as encostas. Segundo Macedo e Sandre (2022), de 1988 a 2022, aproximadamente 4146 pessoas foram vítimas de movimentos de massa no Brasil, sendo que o estado de São Paulo ocupa o segundo lugar no ranking de óbitos, logo atrás do Rio de Janeiro. Os autores reiteram que o número de vítimas tem intensa correlação com fatores sociais e pressões econômicas para a ocupação de áreas de encostas, sobretudo em cidades maiores. Além disso, nota-se uma “ciclicidade” do fenômeno, com uma tendência de eventos mais graves ocorrendo em intervalos de 6 a 7 anos (Macedo e Sandre, 2022).

## 2.2 Modelo de Previsão SHALSTAB

Os modelos podem ser definidos como idealizações da realidade, apresentando limites de representação e simplificação de um mundo real complexo (Silva e Catelli, 2019). No âmbito das análises preditivas de susceptibilidade existem diversas abordagens, como as estatísticas e determinísticas, sendo mais utilizadas abordagens que contemplam tanto a aplicação de ferramentas estatísticas quanto o desenvolvimento e uso de modelos matemáticos (determinísticos ou estocásticos), além do uso de abordagens heurísticas que combinam diferentes mapas com aspectos pedológicos, litológicos e outros fatores (Guzzetti et al., 1999).

Dentre as principais abordagens na análise estão inseridos os inventários para validação e compreensão mais detalhada dos processos. Estes estudos mapeiam e registram deslizamentos do passado usando recursos como imagens de satélite, aerofotografias, inspeções em campo e dados de séries históricas (Fernandes e Amaral, 1996).

Na análise da suscetibilidade a escorregamentos rasos destacam-se os modelos heurísticos e os modelos matemáticos de bases físicas. Os modelos matemáticos baseados em princípios físicos funcionam por meio de equações que representam os processos físicos, além disso, esses modelos permitem prever a suscetibilidade a deslizamentos em diferentes cenários, com uma variação nos inputs estabelecidos (Guzzetti et al., 1999; Van Westen, 2004; Vieira e Martins, 2016).

O modelo SHALSTAB é um modelo matemático com bases físicas que visa determinar a suscetibilidade de determinadas áreas à ocorrência de escorregamentos translacionais rasos (Dietrich et al., 1993; Montgomery e Dietrich, 1994; Dietrich e Montgomery, 1998). Operando em escala de bacia hidrográfica, este método é utilizado para realizar análises com base em fatores topográficos e hidrológicos para definir em diferentes classes a estabilidade da área, apresentando uma série de vantagens, como a possibilidade de uso gratuito e maior aplicabilidade em cenários com escassez de dados (Dietrich e Montgomery, 1998).

As bases teóricas para a aplicação do SHALSTAB dividem-se em duas partes. A primeira delas corresponde ao modelo de estabilidade que deriva da equação de Mohr-Coulomb, utilizando-se o modelo do talude infinito. Este módulo (**Equação 1**) parte de algumas simplificações, como a desconsideração dos efeitos de borda e extremidades, a aplicação de

constância em alguns atributos e a possível desconsideração de certos fatores, como a coesão presente no solo (Dietrich e Montgomery, 1998).

$$\frac{h}{Z} = \frac{\rho s}{\rho a} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \quad (1)$$

$h$  = Altura do nível da água (m)

$Z$  = Espessura do solo (m)

$s$  = Densidade do solo (kg/m<sup>3</sup>)

$a$  = Densidade da específica da água (kg/m<sup>3</sup>)

$\theta$  = Ângulo de inclinação da encosta (graus)

$\phi$  = Ângulo de atrito (graus)

Dietrich e Montgomery (1998) definem que a razão  $h/Z$  consiste na proporção da coluna de solo saturado e ainda apontam que a equação demonstra a possibilidade de ocorrência de rupturas em casos onde não há saturação do solo.

O segundo módulo refere-se a um modelo hidrológico (TOPOG) que considera um fluxo subsuperficial constante. A composição deste modelo, de acordo com O'loughlin (1986), estabelece um índice de umidade que correlaciona controles topográficos e hidrológicos, considerando a precipitação como um valor constante. Conforme demonstra as **Equações 2 e 3** é possível definir tal modelo em função da razão  $h/Z$  descrita anteriormente.

$$W = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin \theta} \quad (2) \quad \text{ou} \quad \frac{h}{Z} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin \theta} \quad (3)$$

Sendo:

$W$  = Índice de umidade

$q$  = Precipitação (mm/dia)

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

a = área de contribuição (m<sup>2</sup>)

b = Comprimento do limite inferior de a (m)

θ = ângulo de atrito interno (°)

A combinação dos modelos de estabilidade e hidrologia, por meio da razão h/Z e as equações descritas por Montgomery e Dietrich (1994) obtém-se a **Equação 4**, que define o funcionamento do modelo em sua operação automatizada. Nota-se que a referida equação não considera valores de coesão.

$$Q = \frac{T}{(a/b)} \operatorname{sen} \theta \frac{\rho_s}{\rho_a} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \quad (4)$$

Assim:

Q = Precipitação necessária para a ruptura (mm)

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

a = Área de contribuição (m<sup>2</sup>)

b = Comprimento do contorno da célula (m)

θ = Ângulo da encosta (graus)

φ = Ângulo de atrito interno (graus)

ρ<sub>s</sub> = Densidade do solo (kN/m<sup>3</sup>)

Dado a combinação do modelo hidrológico e do modelo de estabilidade, Montgomery e Dietrich (1994) pontuam que este esquema pode se alterar em função da disponibilidade ou não de dados para a aplicação nos *inputs* (entrada). Assim, os resultados do modelo podem ser categorizados, segundo os autores, em diferentes classes de estabilidade, sendo elas **Incondicionalmente Estável** (podendo ser saturado ou não saturado), **Estável e não saturado**, **Instáveis** (saturado ou não) e **Incondicionalmente Instáveis** (saturado ou não saturado) (Guimarães, 2003). A Tabela 1 abaixo demonstra as condições que o modelo utiliza para a categorização dos resultados.

CLASSE DE ESTABILIDADE	CONDIÇÃO
(A) Incondicionalmente estável e saturado	$a/b > (T/Q)\text{sen}\theta$ e $\tan\theta \leq \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s)$
(B) Incondicionalmente estável e não saturado	$a/b < (T/Q)\text{sen}\theta$ e $\tan\theta \leq \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s)$
(C) Estável e não saturado	$\frac{a}{b} < \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \frac{T}{Q} \text{sen}\theta$ $a/b < (T/Q)\text{sen}\theta \text{ e } \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\phi$
(D) Instável e não saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \frac{T}{Q} \text{sen}\theta$ $a/b < (T/Q)\text{sen}\theta \text{ e } \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\phi$
(E) Instável e saturado	$\frac{a}{b} > \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \frac{T}{Q} \text{sen}\theta$ $a/b > (T/Q)\text{sen}\theta \text{ e } \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\phi$
(F) Incondicionalmente instável e não saturado	$\tan\theta > \tan\phi$ e $a/b < (T/Q)\text{sen}\theta$
(G) Incondicionalmente instável e saturado	$\tan\theta > \tan\phi$ e $a/b > (T/Q)\text{sen}\theta$

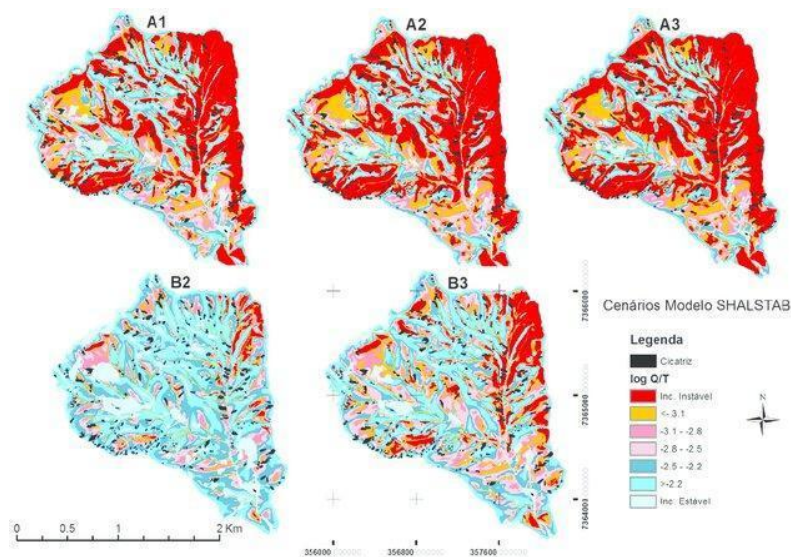
**Tabela 1 - Condições de Estabilidade Fonte: Vieira, 2007, adaptado de Dietrich e Montgomery, 1998.**

Se tratando de um modelo que opera com parâmetros simplificados, o SHALSTAB pode ser aplicado em inúmeras situações e testado com dados de campo para a sua validação (Dietrich e Montgomery, 1998). No entanto, Dietrich e Montgomery (1998) destacam que a qualidade dos dados topográficos deve ser criteriosa, juntamente com um mapeamento de cicatrizes de deslizamentos; os autores reforçam que a efetividade do método está principalmente relacionada às cicatrizes que se enquadram nos valores baixos da razão  $q/T$ .

A simplificação proposta por este modelo implica na supressão de algumas variáveis. Neste aspecto, os autores mencionam a uniformização da recarga, caracterizando-a como um sistema estacionário, ou seja, sem variáveis hidráulicas e geotécnicas, bem como a desconsideram de certos parâmetros como fluxos hortonianos e por vezes os valores de coesão do solo; além de ignorar aspectos da vegetação, considerando principalmente situações de baixa resistência de raízes, como apontam em:

[Este modelo] delimita as áreas mais propensas a deslizamentos rasos devido aos efeitos topográficos de superfície na resposta hidrológica. Isso é mais apropriado para modelar deslizamentos rasos controlados topograficamente, comuns em terrenos íngremes, altamente dissecados e com cobertura de solo. Embora as suposições incorporadas no modelo, especialmente o modelo hidrológico em estado estacionário, impeçam seu uso como uma ferramenta para prever a frequência de início de deslizamentos, o modelo avalia a estabilidade relativa conforme expressa pela precipitação crítica em estado estacionário (Montgomery & Dietrich, 1994, p. 1116)

Apesar das limitações levantadas, o SHALSTAB ainda é capaz de apresentar resultados satisfatórios, “o modelo caracteriza-se pela redução do aspecto subjetivo, como encontrado nos métodos heurísticos, o que possibilita a determinação de níveis de risco em valores absolutos” (Van Westen et al., 1997; Barredo et al., 2000).

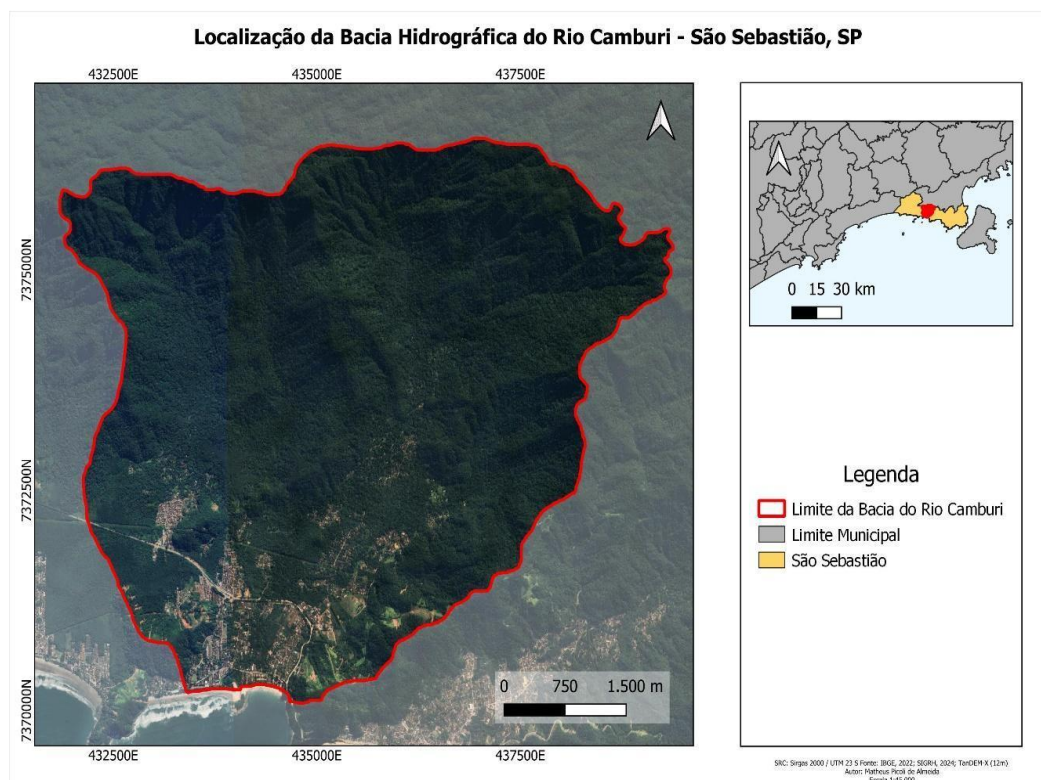


**Figura 6 - Aplicação do modelo SHALSTAB na análise de suscetibilidade. Nesta pesquisa foram apresentados múltiplos cenários utilizando diferentes parâmetros Fonte: Vieira, 2007**

Os primeiros trabalhos preditivos utilizando o modelo foram realizados nos Estados Unidos nos trabalhos de Dietrich et. al. (1986) e Montgomery e Dietrich (1989), se mostrando eficiente na identificação e classificação da estabilidade de encostas íngremes. No Brasil, estudos semelhantes têm sido realizados, destacando os trabalhos pioneiros de Guimarães (2003) no Rio de Janeiro, bem como Fernandes et al. (2004), Gomes et al. (2005) e Vieira (2007). As aplicações deste modelo sob condições de clima tropical úmido apresentaram resultados satisfatórios na previsão de áreas suscetíveis. (Figura 6).

### 3 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Rio Camburi, localizada no município de São Sebastião, SP apresenta feições características do litoral norte paulista, elevada pela Serra do Mar em sua parte norte e banhada pelo Oceano Atlântico na porção sul (Figura 7).



**Figura 7 - Mapa de localização da Bacia do Rio Camburi**

O Rio Camburi deságua em praia de mesmo nome. A parte elevada do terreno e as declividades acentuadas da Serra do Mar apresentam uma morfodinâmica complexa que ocasionam processos de movimentos de massa, foco deste estudo, além da relevância no contexto do município de São Sebastião nos eventos recentes.

“Sua gênese [Serra do Mar] vincula-se a vários ciclos de dobramentos acompanhados de metamorfismos regionais, falhamentos e extensas intrusões. As diversas fases orogenéticas do pré-Cambriano foram sucedidas por ciclos de erosão. O processo epirogenético pós-Cretáceo que perdurou pelo menos até

o Terciário Médio gerou o soerguimento da Plataforma Sul Americana, reativou falhamentos antigos e produziu escarpas acentuadas como a Serra da Mantiqueira e do Mar. (ROSS, 1990, n.p)

Nos aspectos litológicos e pedológicos, segundo Ross e Moroz (1997), há a predominância de gnaisses e granitos pré-Cambrianos. Na pedologia, é observada a ocorrência de solos mais rasos na região das escarpas, sobre granitos nas altas e médias vertentes, no entanto, a profundidade dos solos aumenta na planície litorânea com sedimentos fluviais e marinhos (ROSSI, 1999).

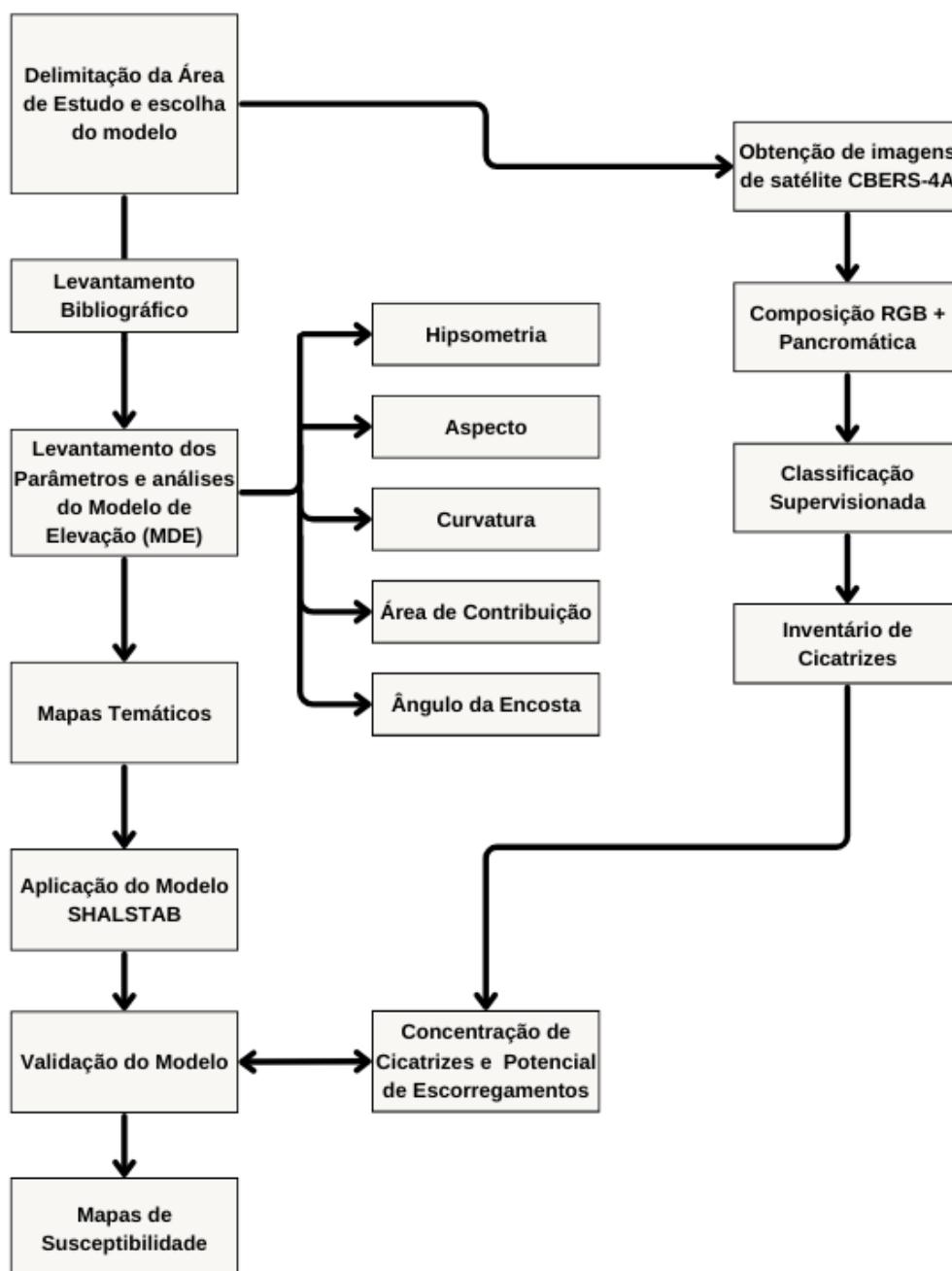
No Sistema Integrado de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SIGRH), a Bacia do Rio Camburi é enquadrada no UGRHI 3, sendo delimitada pela Serra do Mar como divisor topográfico. Possuindo cerca de 33,6 km<sup>2</sup>, a área é vastamente vegetada e inserida nos limites do Parque Estadual da Serra do Mar (PESM). Os aspectos vegetacionais da Bacia estão inseridos no contexto dos aspectos da Serra do Mar, sendo descritos por Joly et al. (1991) como três formações florestais, distintas em origem e em aspectos fisionômicos e florísticos: a) mata de altitude, b) mata de encosta, c) mata de planície litorânea, onde a vegetação estaria associada aos aspectos geomorfológicos em uma zonação altitudinal.

Quanto aos aspectos climáticos, Monteiro (1973) aponta que Caraguatatuba e parte de São Sebastião, nestas áreas o clima é controlado por massas equatoriais e tropicais apresentando um clima úmido das costas expostas à massa tropical atlântica, sujeitas a uma menor influência de massas polares devido aos aspectos morfológicos de orientação de vertentes.



#### 4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a realização das análises propostas nos objetivos deste trabalho e avaliação das áreas suscetíveis à escorregamentos translacionais rasos, os procedimentos metodológicos e materiais utilizados foram divididos em duas frentes (Figura 8), a primeira sendo a análise morfométrica e a modelagem, seguida pela análise espacial para construção do inventário de cicatrizes.



*Figura 8 - Fluxograma de procedimentos para a geração dos mapas de suscetibilidade.*

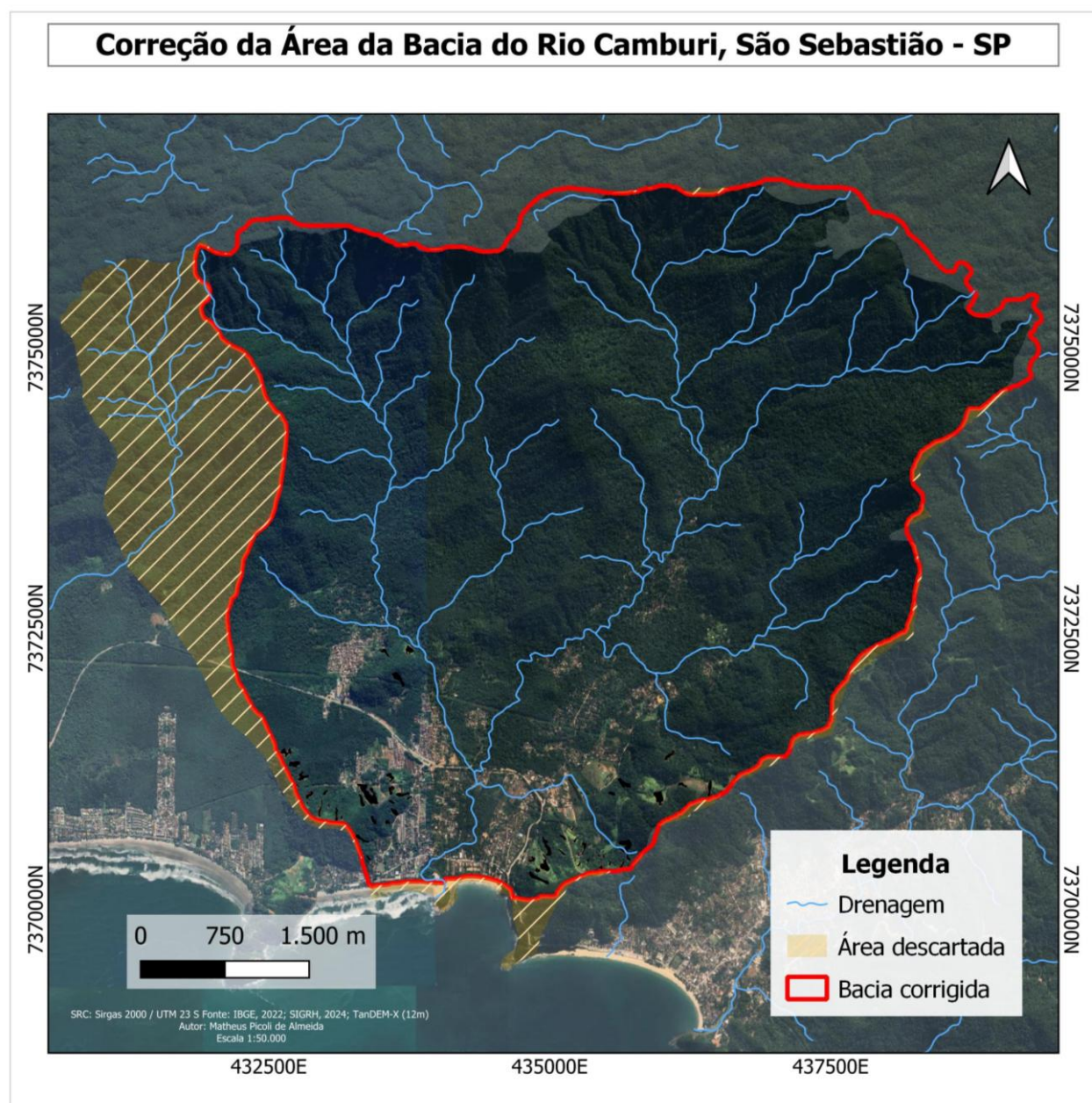
#### **4.1 Delimitação da bacia, dados topográficos e análise morfométrica**

Os dados utilizados pelo modelo SHALSTAB correspondem majoritariamente aos parâmetros topográficos obtidos por meio de um Modelo Digital de Elevação (MDE). Esses dados são essenciais para o funcionamento automatizado do modelo, permitindo a obtenção de informações importantes, como a área de contribuição, inclinação da encosta e limites da vazão (Dietrich e Montgomery, 1998; Krieger et al., 2013).

Considerando a escala de análise foi necessário corrigir as incongruências presentes nos dados oficiais de sub-bacias do Estado de São Paulo (SEMIL). Para isso, foram consultadas cartas topográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) de escala 1:10.000 e o enquadramento de corpos hídricos UGHRI 03 (CETESB).

Para a delimitação dos limites da bacia com maior acurácia foi realizada a análise das condições hidrológicas e topográficas da área de interesse, consistindo em determinar as direções de escoamento do MDE por meio do algoritmo de análises do *software* SAGA GIS. Com base nessas direções, é possível calcular diversos parâmetros hidrológicos, como a área de drenagem a montante de cada célula, a delimitação de sub-bacias, a definição da rede de drenagem, além da determinação de comprimentos e declividades dos trechos dos rios. (Buarque, 2009). O pré-processamento dos dados é necessário para a viabilidade do modelo, nesta etapa foi utilizada a função *Calculadora Raster* do *software* QGIS para a correção dos valores de pixel negativo utilizando o comando *ifelse(a<0,0,a)* (Fairfield e Leymarie, 1991).

As alterações no limite da bacia consistiram na delimitação mais detalhada da área, respeitando a topografia estabelecida pela carta do IGC e os corpos hídricos catalogados pela CETESB, que foram respaldados por uma validação do algoritmo *Flow Accumulation (Recursive)*, assim, combinando as informações observa-se que a porção oeste da bacia oficial não é pertencente à área de contribuição da Bacia do Rio Camburi (Figura 9).



**Figura 9 - Mapa das áreas consideradas e descartadas da bacia do rio Camburi, em amarelo estão representadas as áreas desconsideradas para a análise de suscetibilidade.**

## 4.2 Aplicação do Modelo SHALSTAB

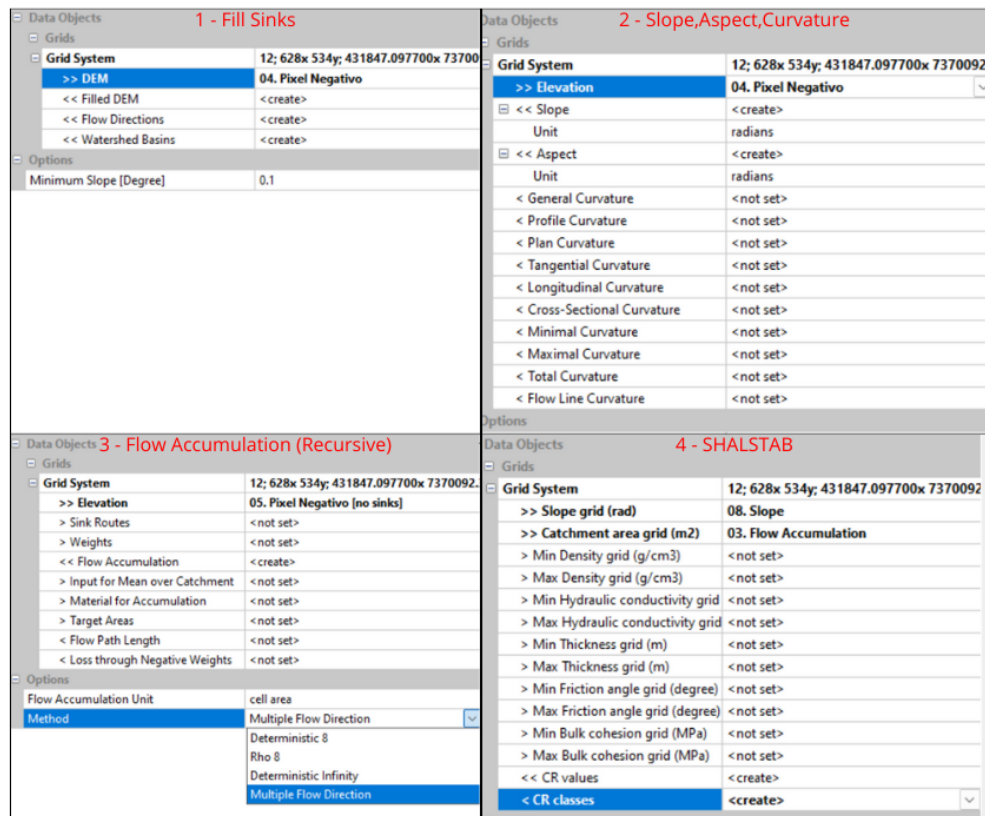
Para a aplicação do modelo proposto no presente estudo foi utilizado o programa de código aberto SAGA GIS, que apresenta o modelo SHALSTAB como um de seus componentes nas ferramentas de análise de terreno, encontrado nas funções de estabilidade de taludes (Figura 10).

Os parâmetros utilizados correspondem aos dados topográficos, hidrológicos e geotécnicos, estes últimos se referem às variáveis de condutividade hidráulica, coesão e densidade, e foram baseados em dados secundários presentes na literatura de estudos em áreas próximas à bacia do Rio Camburi.

Os dados topográficos foram extraídos como produtos das análises do MDE, componente base do estudo, obtido do satélite *TanDEM-X* (TerraSAR-X add-on for *Digital Elevation Measurements*), que dispõe de uma resolução horizontal de 12 metros e uma precisão de 2 metros de altura (Krieger et al., 2013).

Em primeiro momento, a partir do MDE obtido, foi gerado um arquivo digital dos ângulos de inclinação das encostas, em radianos, por meio da ferramenta *Slope, Aspect, Curvature*, constituinte fundamental para a operação do modelo juntamente com o *grid* de acumulação de fluxos da bacia. Para a modelagem hidrológica foi utilizada a ferramenta de preenchimento de depressões do MDE *Fill Sinks* - Wang e Liu, que permite maior acurácia nas análises de escoamento superficial (Wang e Liu, 2006).

Na análise hidrológica, a área de drenagem de uma célula em um modelo digital de elevação corresponde à soma da contribuição das células à montante (Dietrich e Montgomery, 1998). Embora o método baseado na direção de maior declive seja comum, ele pode gerar incongruências no SHALSTAB, fazendo com que a área de drenagem dependa da sua orientação. Assim, para o emprego da função de acumulação de fluxos, os autores afirmam que, além da supressão das depressões previamente existentes, é necessário o emprego do método de multiple flow directions (MFD), proposto por Quinn et al. (1991).



*Figura 10 - Interface das ferramentas utilizadas para a geração dos modelos preditivos.*

A simulação de suscetibilidade foi feita com base nos parâmetros hidrológicos e geotécnicos dos trabalhos de Gomes (2016) e Vieira et al. (2015) em Caraguatatuba para a maioria dos parâmetros, com exceção dos dados de densidade do solo, que foram obtidos pelo trabalho de Wolle e Carvalho (1988) em Cubatão (Tabela 2). Os dados secundários foram selecionados em localidades que apresentam ambientes semelhantes ao da área de estudo, no contexto da Serra do Mar (SP).

Para a aplicação foram utilizados os valores máximos e mínimos disponíveis, conforme o modelo demanda. O SHALSTAB dispõe as classes que variam entre Incondicionalmente Instável; 0-50mm/dia; 50-100mm/dia; 100-200mm/dia; 200-400mm/dia; > 400mm/dia; e Incondicionalmente Estável. As classes variam de acordo com o grau de estabilidade e os valores se referem aos valores derivados do  $\log q/t$ , indicando a **precipitação crítica para a potencial ruptura**.

<b>Parâmetros (unidades)</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Fonte:</b>
Densidade (kN/m <sup>3</sup> )	14,3	17,1	<b>Cubatão</b> - Wolle e Carvalho (1988)  <b>Caragatatuba</b> Vieira et al. (2015) Gomes (2016)
Profundidade (m)	0	5	
Ângulo de atrito interno (°)	25	37	
Condutividade hidráulica “ksat” (m/s)	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	
Coesão (kPa)	0	11	

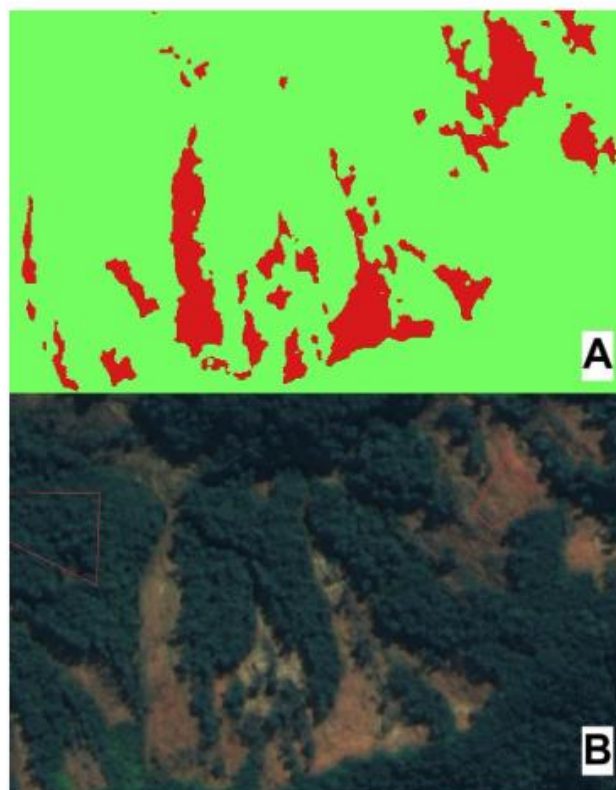
**Tabela 2:** Relação de parâmetros utilizados para o modelo SHALSTAB

### 4.3 Inventário de Cicatrizes

Segundo Dietrich e Montgomery (1998), a calibração do modelo é estabelecida por um consistente mapeamento das cicatrizes dos movimentos de massa ocorridos na área de estudo. Os autores ainda acrescentam que o modelo pode ser utilizado para delinear as localizações observadas de cicatrizes de deslizamentos de terra e fornece um procedimento objetivo para delimitar futuros locais potenciais de instabilidade (Dietrich e Montgomery, 1998).

Para o mapeamento das cicatrizes, foi utilizada uma composição RGB com correção pancromática do satélite CBERS-4A. As imagens foram obtidas por meio do catálogo do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) e referem-se ao período de 25 de fevereiro de 2023 a 1 de Junho de 2023, após o evento extremo no início do mesmo ano. O método utilizado foi o *Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)*, disponível como complemento do *software* QGIS, permitindo classificar imagens de sensoriamento remoto.

A classificação supervisionada é um método que consiste na segmentação de uma imagem com distintas bandas espectrais, em diferentes classes, de acordo com a sua assinatura espectral específica. Em primeiro momento são coletadas amostras para cada classe (Figura 11), e a partir dos diferentes padrões espectrais é possível classificar a totalidade da imagem, unindo padrões semelhantes em classes da mesma característica (Barros e Pamboukain, 2018).



*Figura 11 - Amostras para a criação das classes espectrais do SCP*

A classificação foi realizada por meio de amostras, com os elementos inseridos em polígonos, que foram posteriormente classificadas pelo SCP em categorias de vegetação, solo exposto (cicatrices) e malha urbana, gerando uma imagem *raster*. Após o processo de classificação, foram utilizadas as ferramentas de vetorização de *raster* para separar os elementos e recortar as feições, possibilitando a identificação das cicatrizes como feições únicas. Foi realizada uma filtragem de camadas inválidas, além de inspeção visual e fotointerpretação para a correção de falhas no processo automatizado, de modo a evidenciar apenas as cicatrizes na bacia.

No contexto da área de estudo, apesar das grandes áreas escarpadas encontradas ao norte da bacia, a ocorrência de movimentos de massa está condicionada em maior parte nas vertentes que margeiam o núcleo urbano. Ainda sim, foi realizada uma visita de campo ao local de estudo durante os dias 22 e 23 de Novembro de 2024 onde foram observadas algumas cicatrizes nas áreas de maior concentração da porção sul da bacia, sendo realizado também um levantamento aéreo com drone em uma das áreas afetadas. As fotografias



correspondem às áreas atingidas no condomínio *Brisas do Camburyzinho*, ao lado da Rodovia Governador Mário Covas.

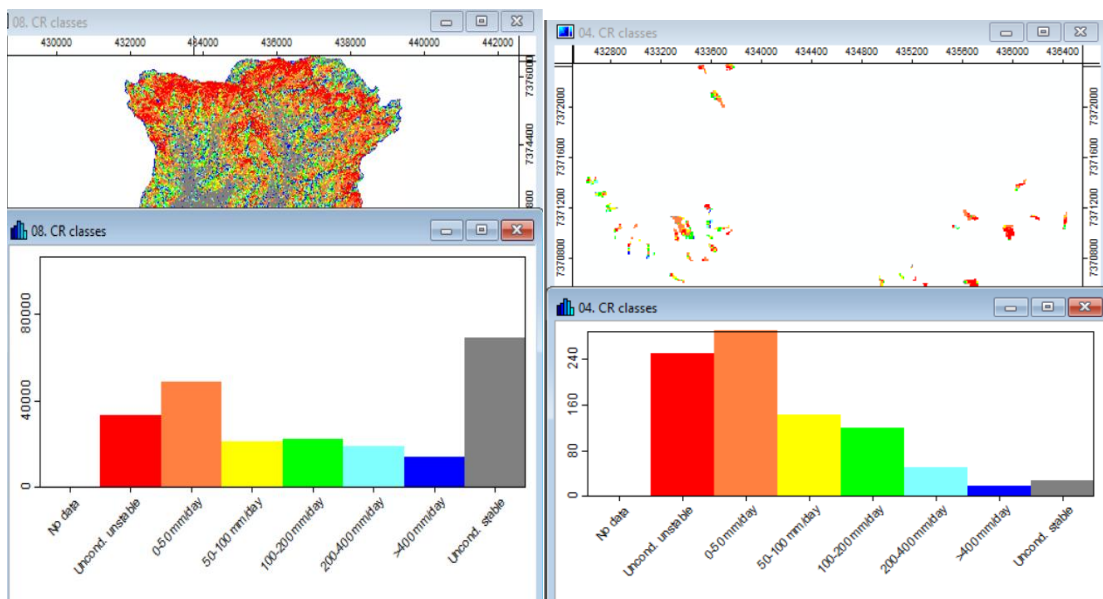
Por fim, o mapa foi o produto deste levantamento, que contabilizou 53 cicatrizes concentradas nos trechos inferiores da bacia, sendo uma importante informação para a posterior validação do modelo SHALSTAB. O estudo também utilizou imagens de diferentes datas dos satélites Landsat e Copernicus, disponíveis no software *Google Earth Pro*, para comparação de séries temporais das áreas afetadas.

#### **4.4 Validação do Modelo SHALSTAB**

Para o auxílio na interpretação das previsões de suscetibilidade foram elaborados mapas temáticos dos produtos derivados do MDE, sendo estes a hipsometria, orientação de encostas, ângulo de inclinação, curvatura e área de drenagem. A avaliação e correlação entre estes atributos e as feições das cicatrizes identificadas no inventário corroboram para a validação do modelo, respaldada nos índices de Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Escorregamento (PE), propostos por Gao (1993).

Utilizando as informações obtidas nas camadas raster do modelo e nos produtos gerados pelo MDE é possível obter um histograma que representa a divisão de células e a relação entre as suas respectivas classes. Para a obtenção dos dados das cicatrizes é necessário extrair tais informações por meio dos arquivos vetoriais mapeados com a função *Clip Grid with Polygon*, do SAGA GIS, em seguida, os dados podem ser exportados em forma de planilha para análise na opção *Convert to Table*, no SAGA GIS, ou na função ‘*Reportar Camada Raster de Valor Único*’, no QGIS. Por meio desta, é possível estabelecer uma relação entre células totais e células afetadas por cicatrizes.





**Figura 12 - Histogramas gerados no SAGA GIS com dados da bacia total e recorte das cicatrizes**

O cálculo da Frequência é baseado na distribuição de atributos, sendo estabelecida uma razão entre o número de células de cada classe sobre o total de células da bacia, multiplicado por 100 (Equação 5). Este índice permite a análise percentual de cada categoria com base na totalidade da bacia. Por outro lado, o índice de concentração de cicatrizes representa as células afetadas por escorregamentos, estabelecendo assim uma razão entre as células afetadas e as células totais da bacia hidrográfica (Equação 6).

$$F = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de células de cada classe}}{\text{n}^{\circ} \text{ de células da bacia hidrográfica}} \cdot 100 \quad (5)$$

$$CC = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de células de cada classe afetadas por escorregamentos}}{\text{n}^{\circ} \text{ total de células afetadas por escorregamentos}} \cdot 100 \quad (6)$$

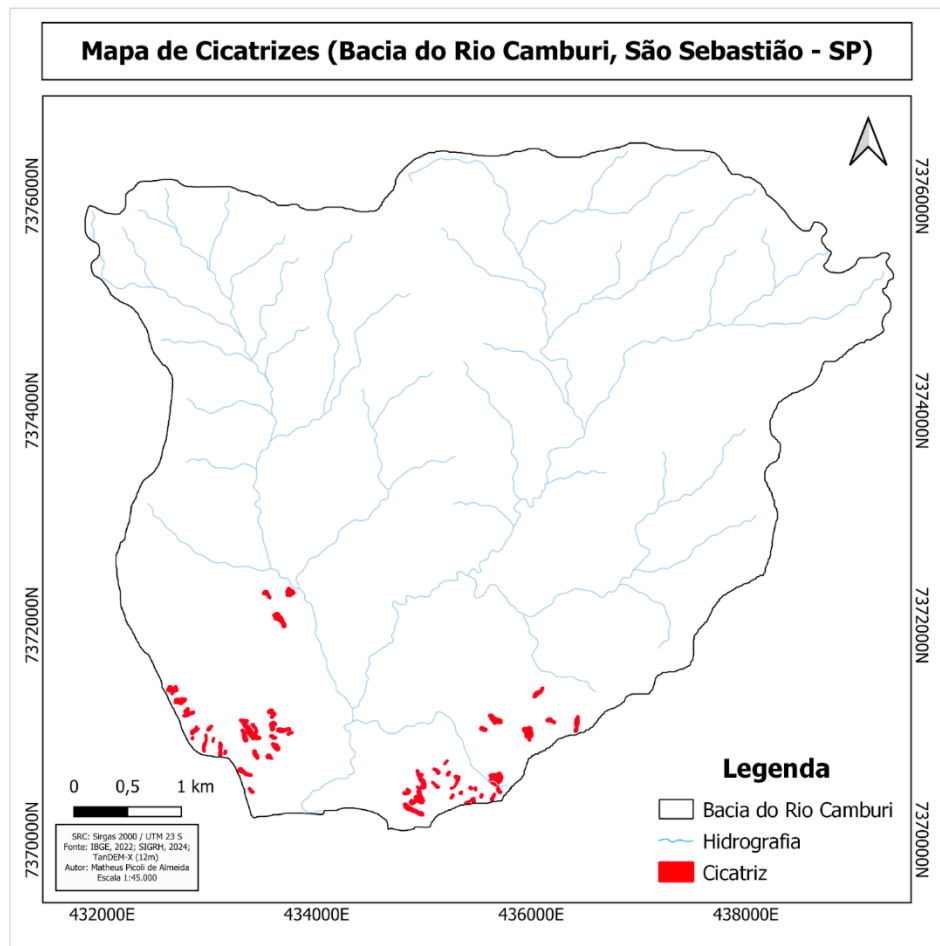
$$PE = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de células de cada classe, afetadas por escorregamentos}}{\text{total de células da mesma classe}} \cdot 100 \quad (7)$$

A análise do Potencial de Escorregamentos (PE) permite verificar a distribuição de cada categoria em relação ao total da área da bacia (Equação 7). Vieira (2007) aponta que os valores de Frequência (F) e da Concentração das Cicatrizes (CC) geram percentuais totais iguais a 100%, enquanto os valores derivados do Potencial de Escorregamentos (PE) apresentam valores menores, por estar se referindo apenas as células de cada classe afetadas por escorregamentos.

## 5 RESULTADOS

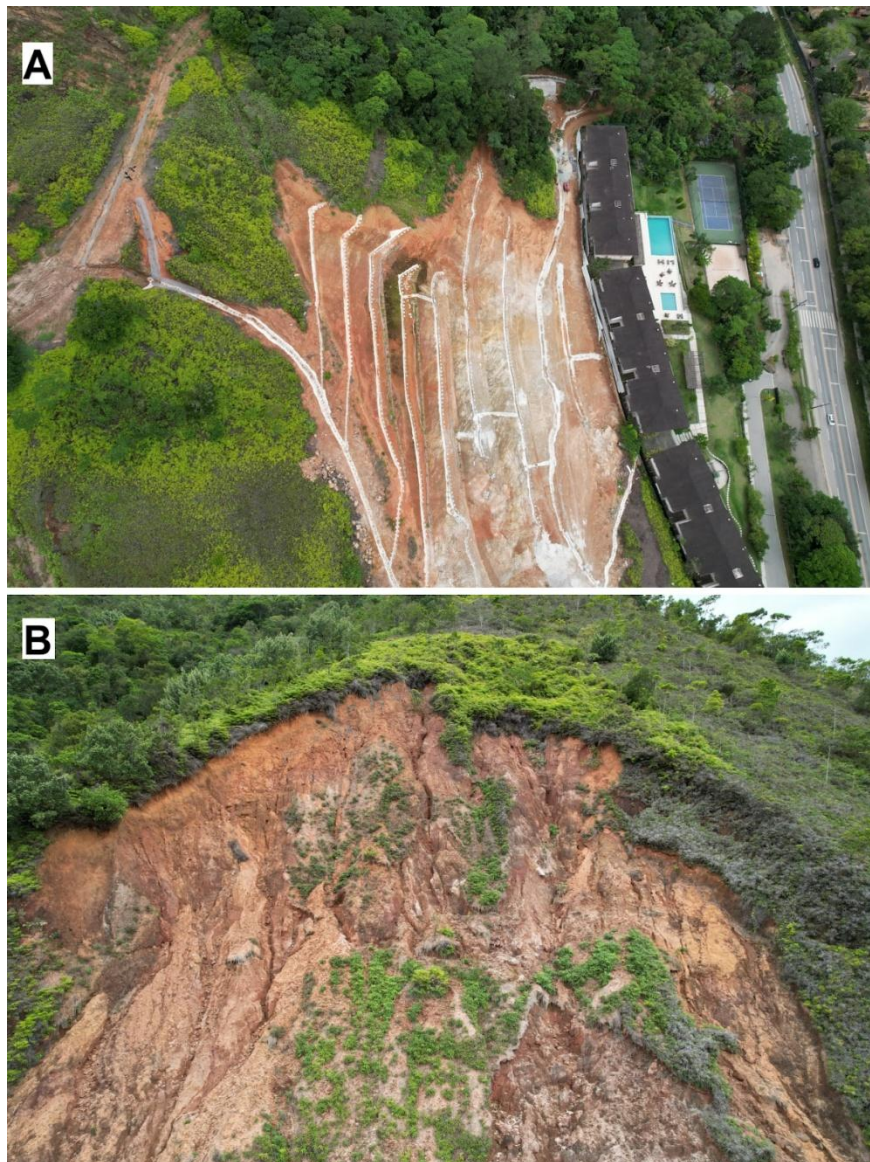
### 5.1 Inventário de Cicatrizes

Conforme descrito anteriormente, o mapeamento das cicatrizes foi feito por meio de classificação supervisionada com base nas classes espectrais de solo exposto e posterior correção de feições por meio de inspeção visual, sendo possível identificar 53 feições (Figura 14), concentradas na porção sul da bacia, próximas ao oceano e as áreas urbanizadas. O mapeamento apresentou eficácia na identificação das cicatrizes, no entanto, por se basear nos aspectos espectrais de solo exposto o método incorporou às cicatrizes as áreas de deposição de sedimentos e ignorou áreas afetadas que possuem maior cobertura vegetal, demandando inspeção visual de imagens para a interpretação correta.



**Figura 13 - Inventário de Cicatrizes obtido pela classificação supervisionada, ao todo foram mapeadas 53 cicatrizes que se concentraram na porção sul da bacia**

A 53 feições mapeadas (Figura 14) ocupam uma área de 127.710m<sup>2</sup>, correspondendo cerca de 0,39% da área total da bacia. A maior cicatriz encontrada possui 14.717m<sup>2</sup> e a menor 215m<sup>2</sup>, a média geral corresponde a 2.400m<sup>2</sup> (Figuras 16 e 17), o mapeamento avaliou que as cicatrizes possuem áreas situadas no intervalo de 200m<sup>2</sup> à 2000m<sup>2</sup>, e possuem comprimentos que variam entre dezenas a centenas de metros. Foi realizado um levantamento aéreo com drone sobre uma das áreas mais afetadas para a avaliação da proporção do evento registrado, sendo possível identificar uma cicatriz de área de 6.069m<sup>2</sup>, na qual já se encontrava em processo de obras de contenção e reparos estruturais (Figura 15).



**Figura 14 – (A) Obras de contenção e reparo no condomínio Brisas do Camburyzinho (B) Cicatriz de área de**

6.000m<sup>2</sup> localizada em encosta acima do condomínio. Fonte: Tiago Martins (Drone DJI Air 2S)

Resultados semelhantes foram descritos por Stabile et al. (2024) em mapeamentos nas localidades de Juquehy e Vila Sahy, nestes casos, por se tratarem de localidades mais afetadas pelo evento de fevereiro de 2023, as cicatrizes e áreas de deposição encontradas foram ligeiramente maiores.

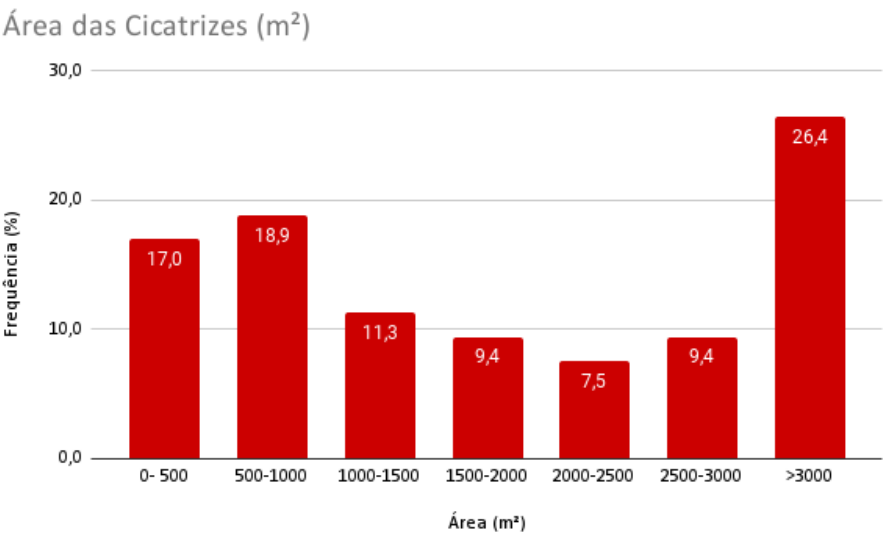


Figura 15 - Distribuição percentual da área das cicatrizes.

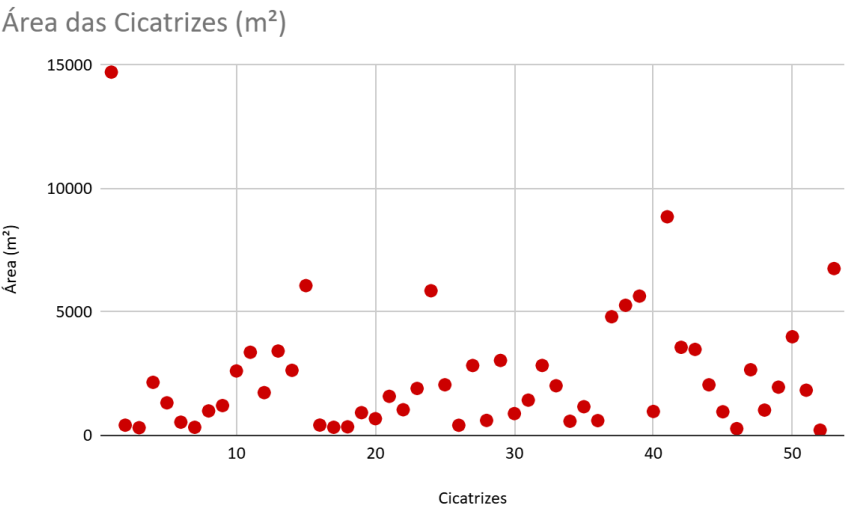
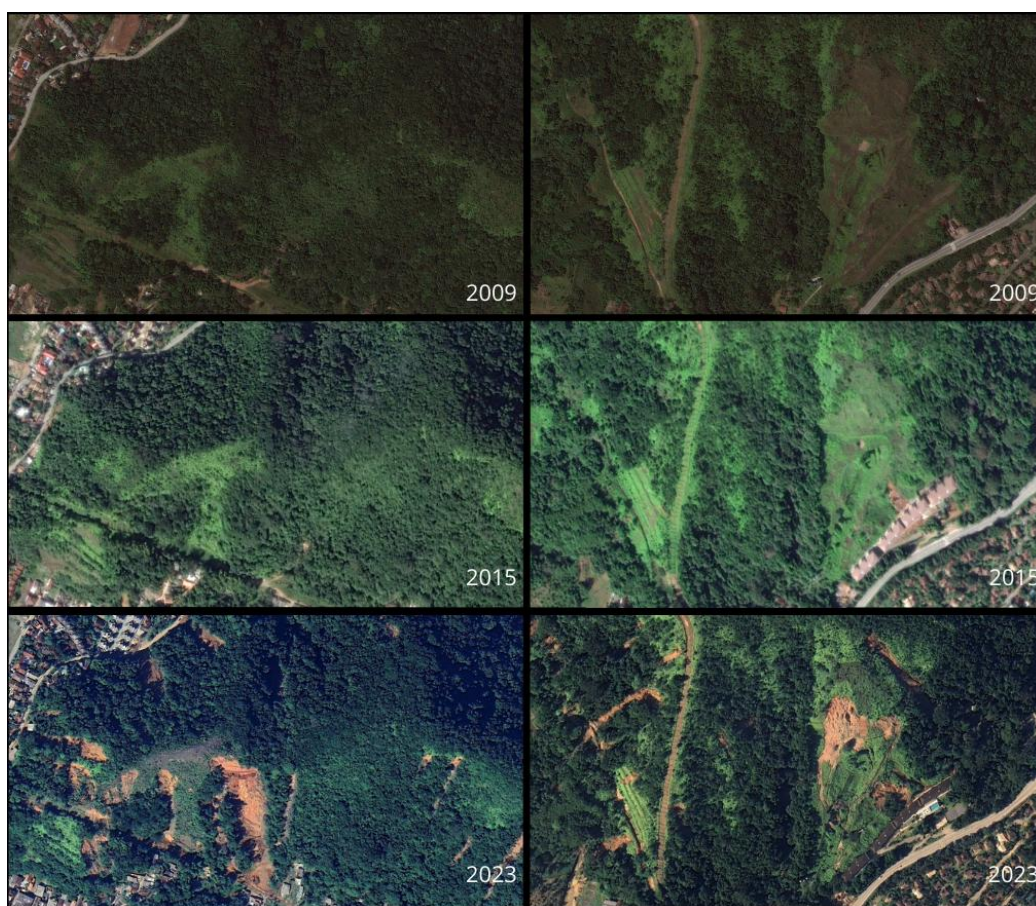


Figura 16 - Distribuição das cicatrizes em relação à área ocupada por cada uma



Foram analisadas imagens das áreas mais afetadas por escorregamentos rasos que correspondem ao intervalo temporal entre 2009 e 2023 (Figura 18), relevando que parte dos processos desencadeados pelo evento extremo de fevereiro de 2023 ocorreram em áreas antropizadas, com pouca cobertura vegetal de porte arbóreo e com solo previamente alterado por eventos anteriores ou por processos urbanos (Figura 19). A influência da vegetação foi destacada por Varnes (1958), indicando o aumento da estabilidade em encostas com o reforço radicular, controle da umidade e como fator de força oposta aos movimentos gravitacionais. A remoção da cobertura vegetal implica na alteração dos fatores de proteção proporcionados pela parte aérea da vegetação, além do reforço mecânico e de escoamento do sistema radicular, resultando num impacto direto da ação da água sobre o solo (Gray, 1995).



*Figura 17 - Série temporal das áreas mais afetadas por escorregamentos*



**Figura 18 - Espécies pioneiras ocupando áreas afetadas por escorregamentos na bacia do Rio Camburi, após o evento de fevereiro de 2023**

Na área de estudo, bem como em certas porções de solo exposto das cicatrizes, encontram-se espécies de vegetação pioneira, principalmente do gênero *Gleichenia* e *Gleichenella* comumente associadas a áreas de solos empobrecidos e degradados (Chiriol, 2009). A presença deste tipo de vegetação em áreas que sofreram processos erosivos são bioindicadores do avanço ou estagnação de processos de sucessão vegetal, pois são espécies do primeiro estágio de ocupação (Marliana e Rühe, 2014). Analisando as imagens da série histórica é perceptível a ausência de vegetação mais densa nos locais afetados, a presença das espécies indicadas em cenários anteriores e após o evento indicam que as áreas já instáveis por fatores topográficos possuem também pouca cobertura vegetal para a redução de forçantes sobre a encosta.

Por motivos logísticos, não foi possível realizar o levantamento aéreo em outras porções da bacia para imagens em maior detalhamento, sendo realizadas apenas análises por meio de imagens remotas de satélite. Apesar disso, durante o trabalho de campo foi possível observar os locais afetados na outra extremidade da bacia, mesmo após mais de um ano e meio após o evento.

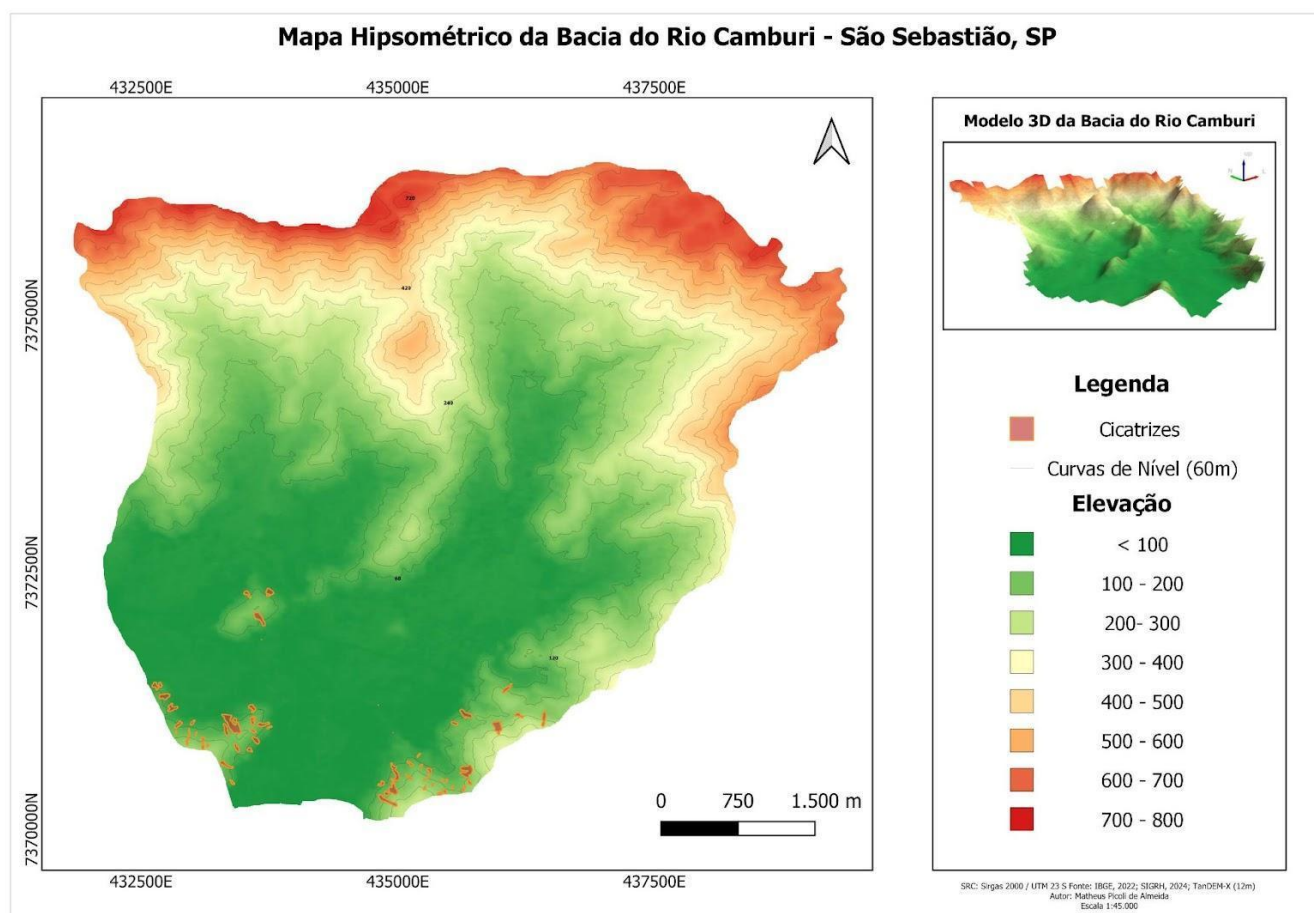




*Figura 19 - Área de Planície da Bacia do Rio Camburi, ao fundo, indicados pela setas, estão localizados outros pontos de maior concentração de cicatrizes.*

## 5.2 Mapa de Hipsometria

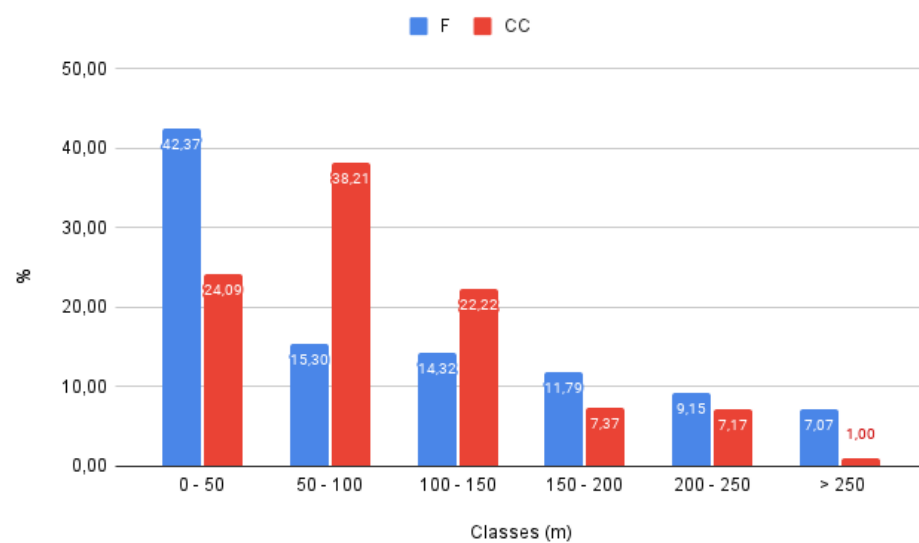
A Figura 21 corresponde ao mapa de hipsometria, a área apresenta grande porção de planície costeira, com elevações inferiores a 100m, que correspondem a 42,3% da área total da bacia. Apesar das elevações atingirem os 800m (Figura 22), as áreas que apresentam maior CC possuem elevações inferiores a 300m, com destaque para os intervalos de 50 e 100m (38,21%). Resultados semelhantes foram obtidos em áreas próximas, conforme apontado por Marcelino (2004), em estudos em Caraguatatuba, que destacou altitudes de 100 e 300m (cerca de 42,57%). A mesma tendência também foi verificada no estudo de Dias et. al. (2018), que apontaram os maiores índices de potenciais de escorregamentos em elevações que variam de 200 a 400m. O PE apresentou comportamento semelhante aos índices de CC e F, observando um grande aumento no intervalo de 50-100m e uma posterior diminuição.



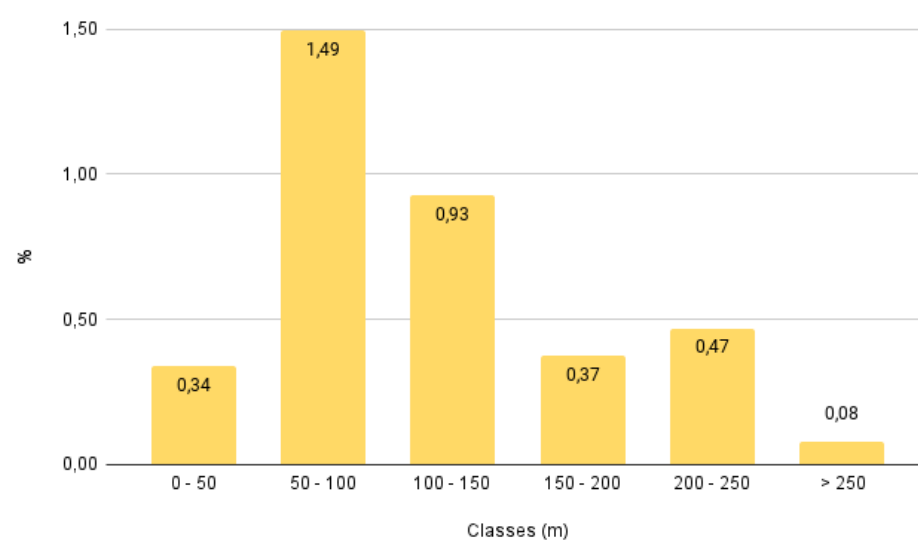
**Figura 20 - Mapa Hipsométrico da bacia do Rio Camburi, as cicatrizes se encontram nas porções inferiores, em elevações até 250m.**



### Hipsometria (F e CC)



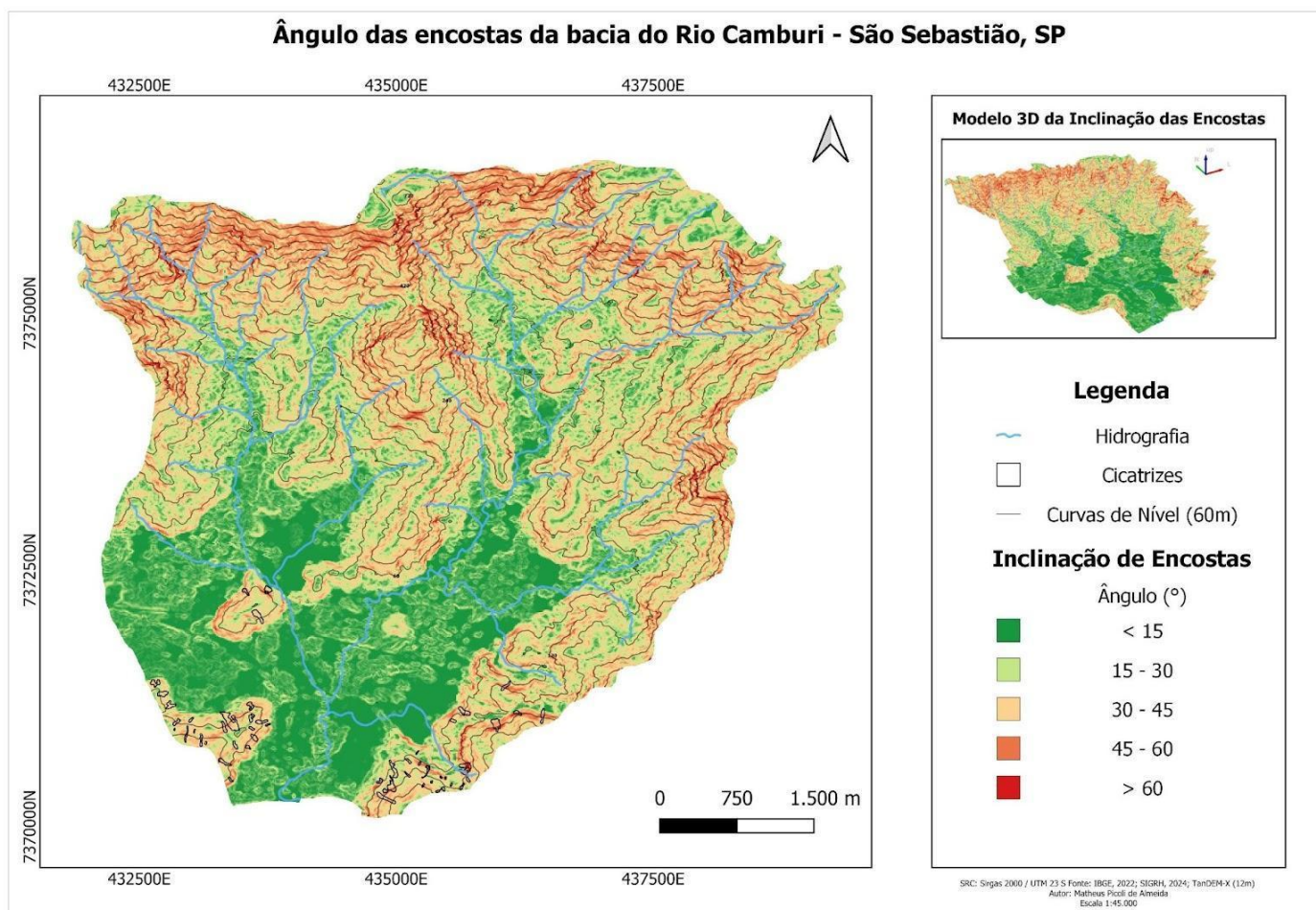
### Hipsometria (PE)



**Figura 21 - Índices de F, CC e PE (Hipsometria)**

### 5.3 Mapa de Ângulo de Encosta

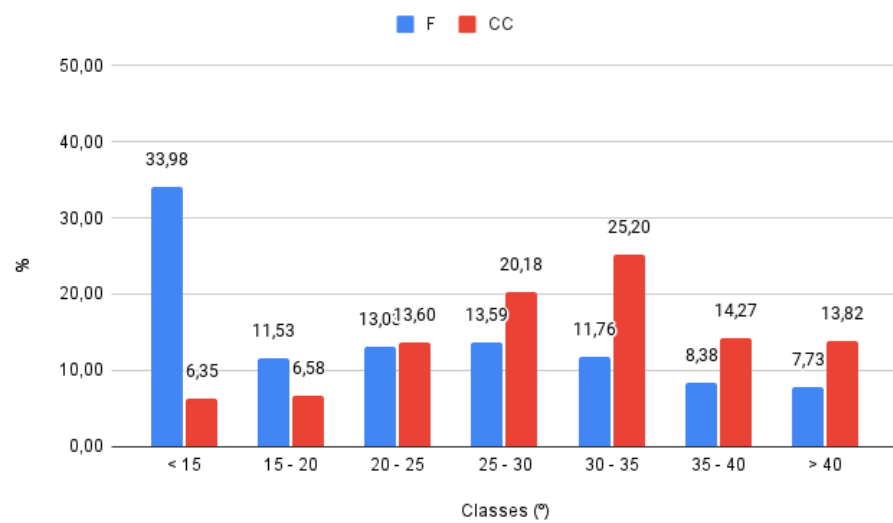
A maior parte das encostas possui ângulos inferiores a  $25^\circ$ , cerca de 58,5% do total da bacia (Figura 23). No entanto, observa-se uma tendência de aumento na CC a partir da classe de 20 a  $25^\circ$ , com o máximo situado nos intervalos de 30 a  $35^\circ$ . Assim, as encostas de 20 a  $40^\circ$  apresentam 73,2% das cicatrizes e os maiores índices de PE e CC se localizam entre este intervalo (Figuras 24). Segundo Guimarães (2003), a presença de paredões rochosos e diminuição da porção de solo disponível justificam a diminuição dos índices de CC e PE a partir das angulações superiores a  $50^\circ$ , tal redução nos valores também foi observada no trabalho de Vieira (2007), realizado em condições semelhantes na Serra do Mar (SP).



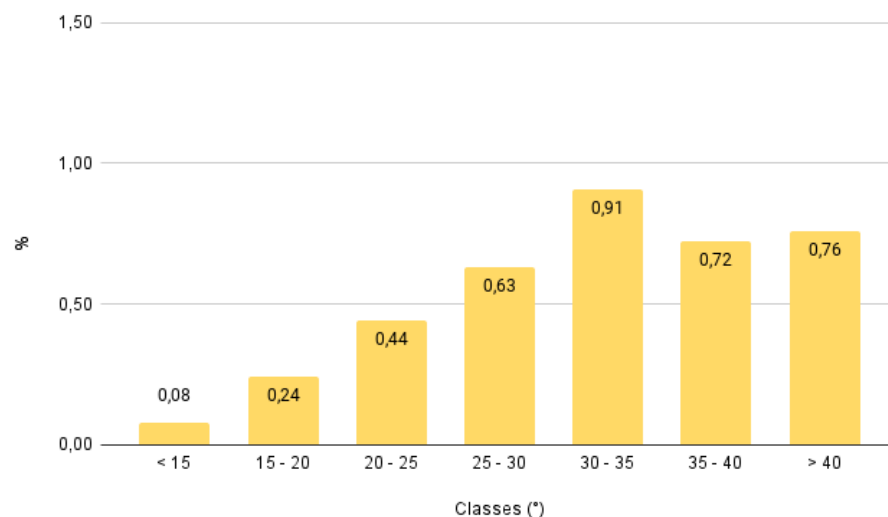
**Figura 22 - Mapa de Ângulo de Inclinação de Encostas**

Outros estudos realizados na Serra do Mar (SP) com características morfológicas similares apontam resultados parecidos, reforçando que as encostas com inclinações superiores a 30° possuem suscetibilidades maiores. Segundo De Ploey e Cruz (1979), em estudo do evento extremo de Caraguatatuba, verificou-se maior concentração de escorregamentos em encostas com ângulos superiores a 20°. Wolle e Carvalho (1989) também apontam o predomínio destes eventos nas declividades de 35 a 45° (De Ploey e Cruz, 1979; Wolle e Carvalho, 1989).

#### Ângulo de Inclinação (F e CC)



#### Ângulo de Inclinação (PE)

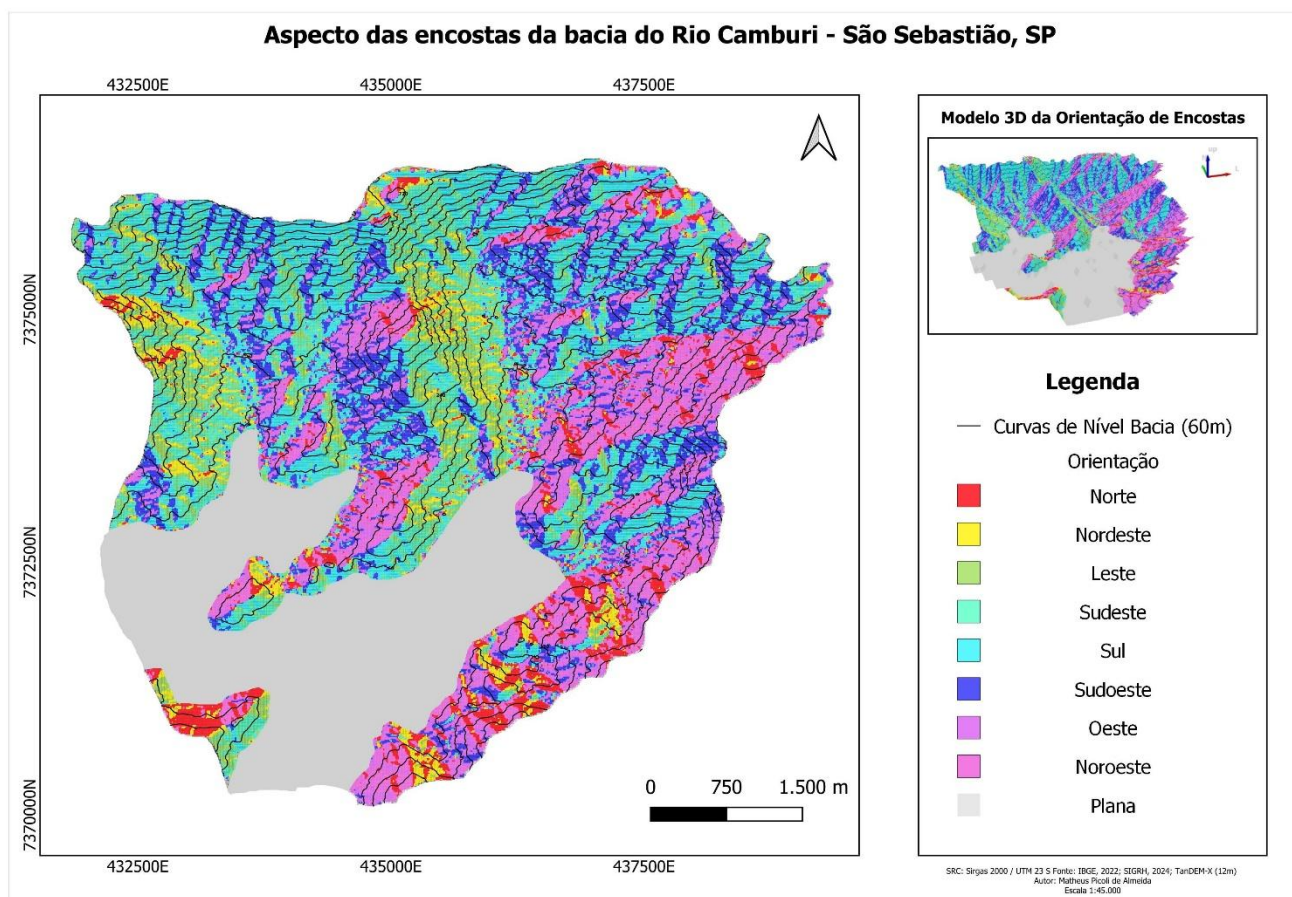


**Figura 23 - Índices de F, CC e PE (Ângulo de Inclinação)**

#### 5.4 Mapa de Orientação de Encostas

Na análise do aspecto (Figura 25) verificou-se um maior número de encostas orientadas para os quadrantes sul, sudeste e sudoeste, no entanto, os escorregamentos se concentraram nos aspectos norte, nordeste e noroeste, somando 63,76% do total de células afetadas, apesar de representarem apenas 21,5% da bacia. Os resultados apontados refletem nos índices de CC e PE (Figura 26), demonstrando maiores valores nas encostas da face norte e noroeste.

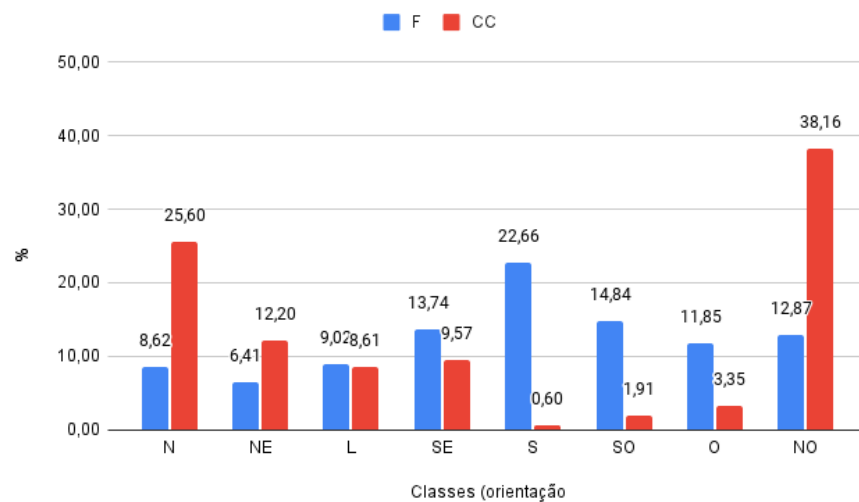
A variação do aspecto afeta diretamente a distribuição da precipitação, radiação solar, exposição ao vento e consequentemente a variação de umidade ao longo das encostas, afetando diretamente a suscetibilidade (Gao, 1993). No contexto da Serra do Mar, a sua direção NE-SO, associada aos aspectos altimétricos, condicionam elevados índices de precipitação pelo efeito orográfico (Gutjahr et. al, 2009).



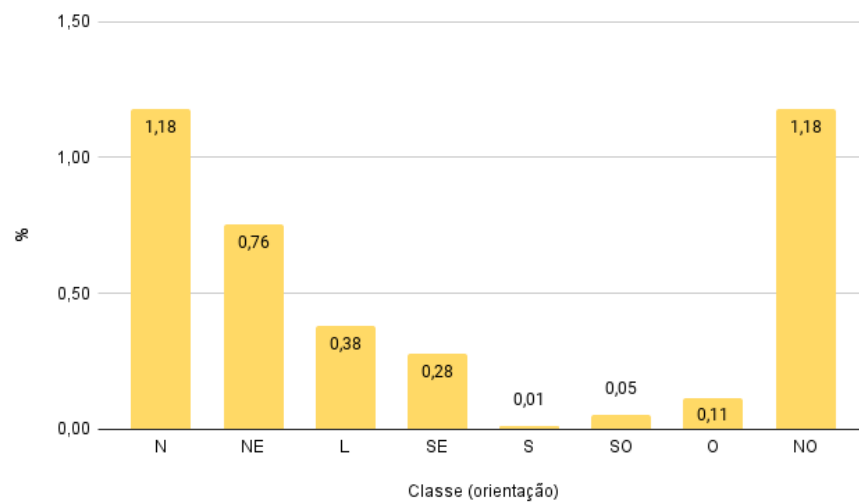
**Figura 24 - : Mapa de aspecto da bacia do rio Camburi.**

Os maiores valores de frequência encontrados nos quadrantes S, SE e SO também foram observados nos estudos de Guimarães (2003) no Rio de Janeiro, o autor apontou maior suscetibilidade em orientações dos quadrantes, o mesmo foi observado por Vieira (2007), que apontou maiores índices de PE nas encostas voltadas para N, NO e NE.

#### Aspecto (F e CC)



#### Aspecto (PE)

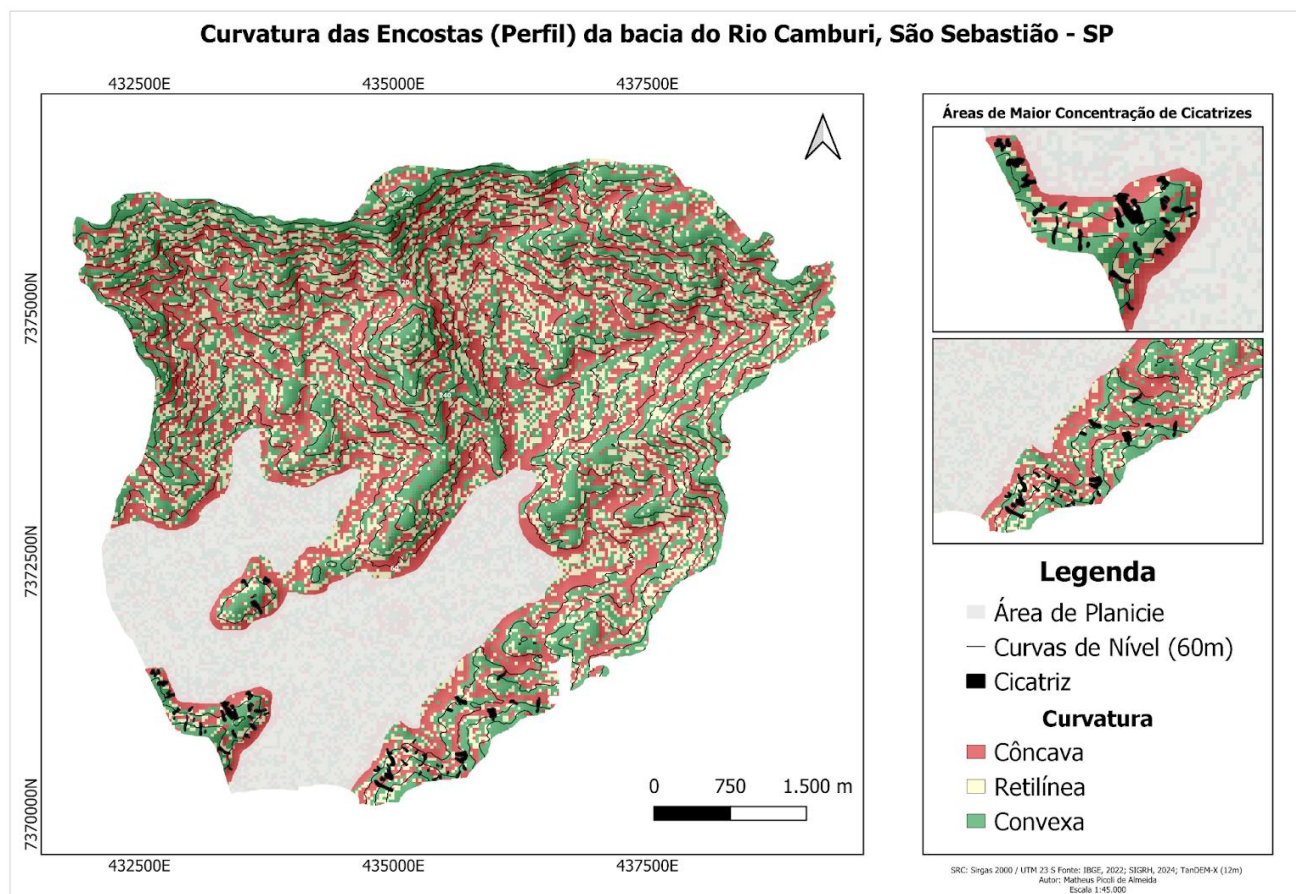


**Figura 25 - Índices de F, CC e PE da orientação de encostas**



## 5.5 Mapa de Curvatura

A curvatura das encostas da área da bacia (Figura 27) foi realizada em perfil (curvatura no sentido da inclinação da encosta), sendo possível identificar o predomínio das formas côncavas (47%) e convexas (42%), com poucas formas retilíneas (cerca de 10%) (Figura 28).

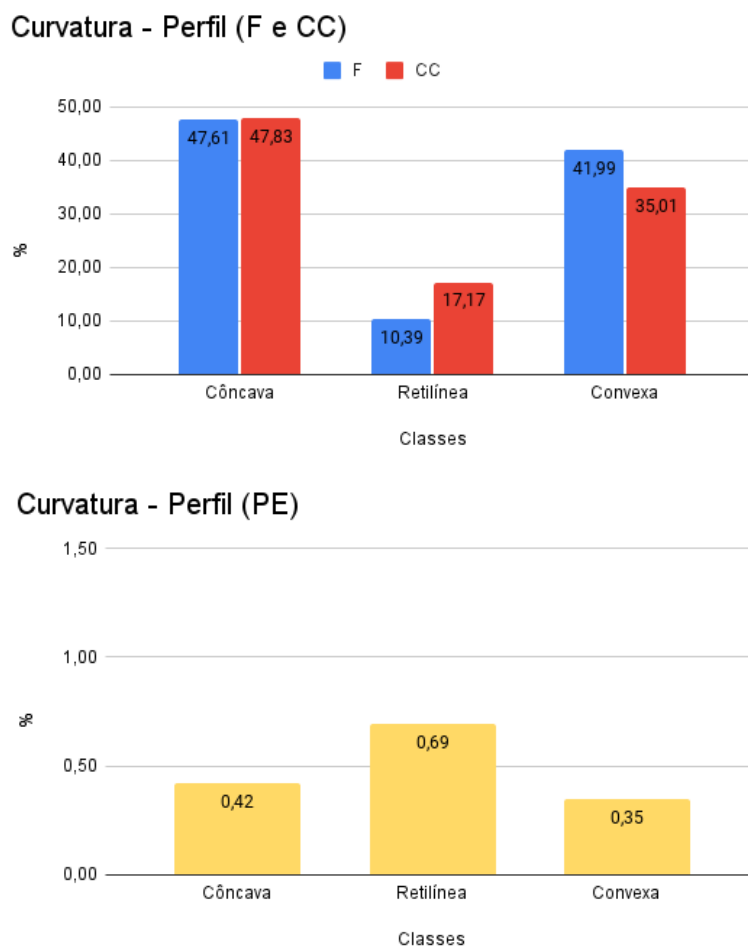


*Figura 26 - Mapa de Curvatura (em perfil) da bacia do rio Camburi*

Montgomery e Dietrich (1994) apontam que as formas côncavas concentram maiores fluxos de superfície e subsuperfície, apresentando maior suscetibilidade. Neste contexto, os maiores índices de CC estão relacionados às classes côncavas, como observado na Figura 28. O PE, por outro lado, é maior nas feições retilíneas devido ao fato de ocupar menor área e possuir ocorrências em número significativo (29). É importante ressaltar que o presente trabalho mapeou as curvaturas da área apenas em perfil, enquanto outros estudos obtiveram resultados em análises em planta, obtendo como resultado a curvatura perpendicular ao

sentido da inclinação da encosta, desse modo, os índices podem apresentar diferenças ao observar por diferentes enfoques.

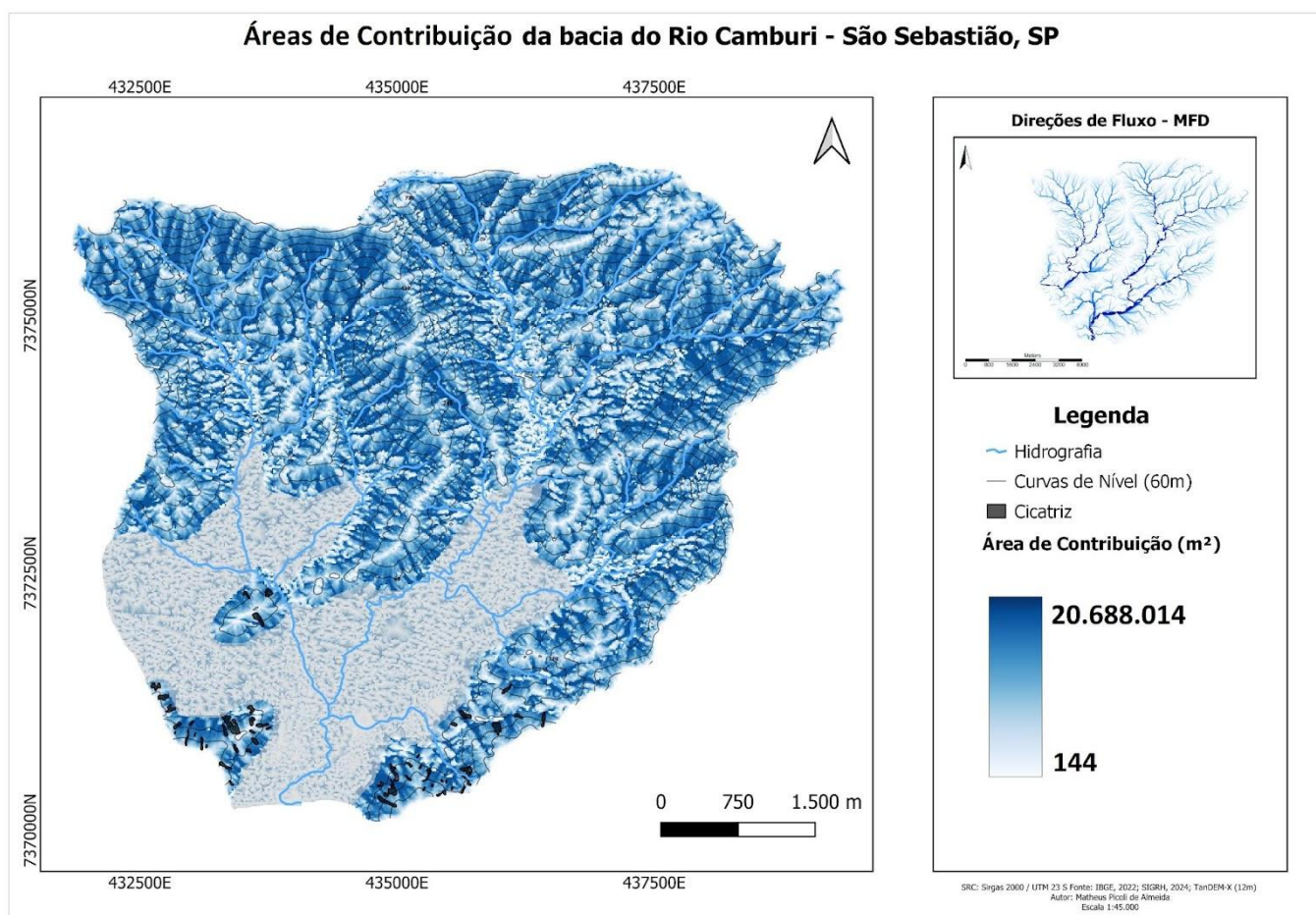
De forma similar, o trabalho de Marcelino (2004), realizado em Caraguatatuba-SP, indica o predomínio de seções côncavas nos ambientes de maior presença de cicatrizes. Na análise dos parâmetros morfológicos na Serra do Mar no estado do Paraná, Martins *et al.* (2017) também observou condições semelhantes, apresentando maiores índices nas classes côncavas, seguidas pelas convexas, e em valores muito abaixo das classes retilíneas.



**Figura 27 - Índices de F, CC e PE das curvaturas**

## 5.6 Mapa de Áreas de Contribuição

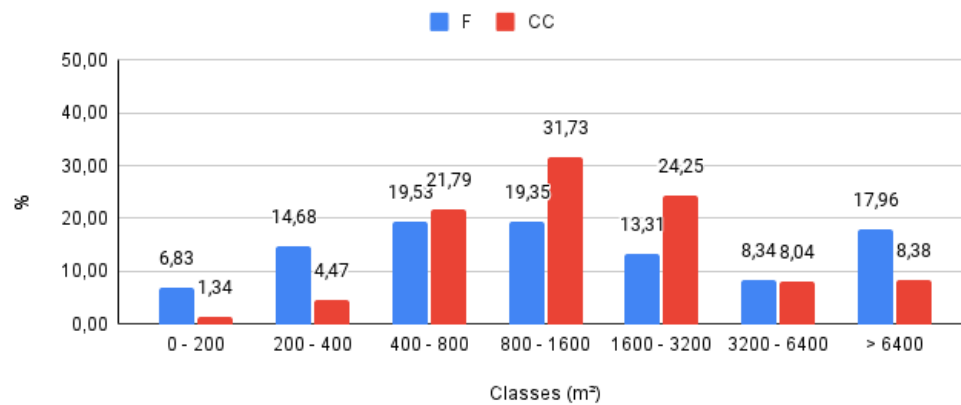
A análise das áreas de contribuição o predomínio de áreas de até 1600m<sup>2</sup>, a Figura 29 demonstra o rápido crescimento dos valores das classes, juntamente dos índices de CC, F e PE, que acompanham a tendência de crescimento até a sua posterior diminuição após os 3200m<sup>2</sup>, os valores de CC se concentraram até os 3200m<sup>2</sup>, com cerca de 83,58% do total de cicatrizes. As áreas de maior contribuição, mais próximas ao relevo escarpado ao norte da bacia não sofreram significativos escorregamentos, apresentando baixos índices de PE e CC (Figura 30).



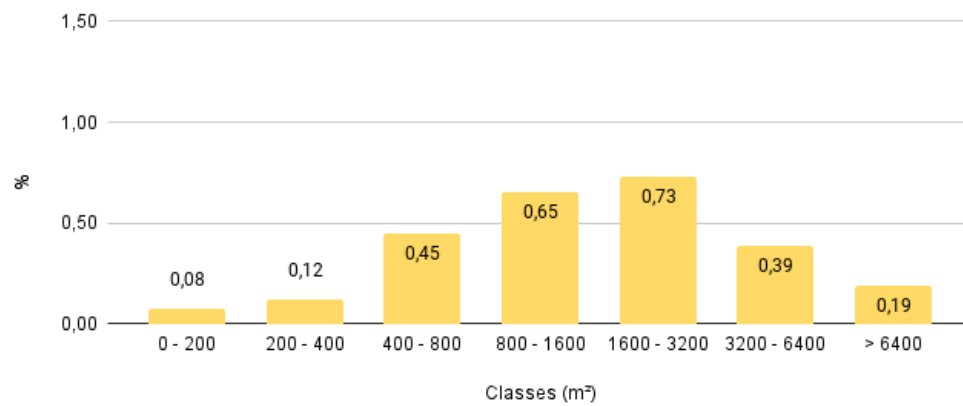
**Figura 28 - Mapa de áreas de contribuição da bacia do rio Camburi.**



### Área de Contribuição (F e CC)



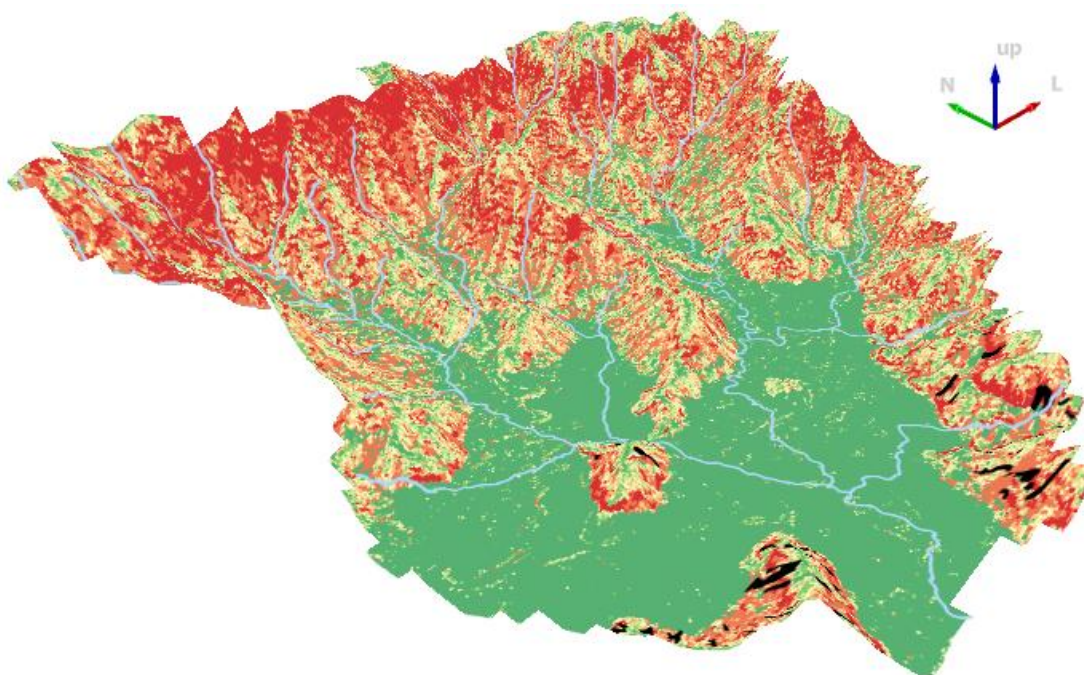
### Área de Contribuição (PE)



**Figura 29 - Índices de F, CC e PE das áreas de contribuição**

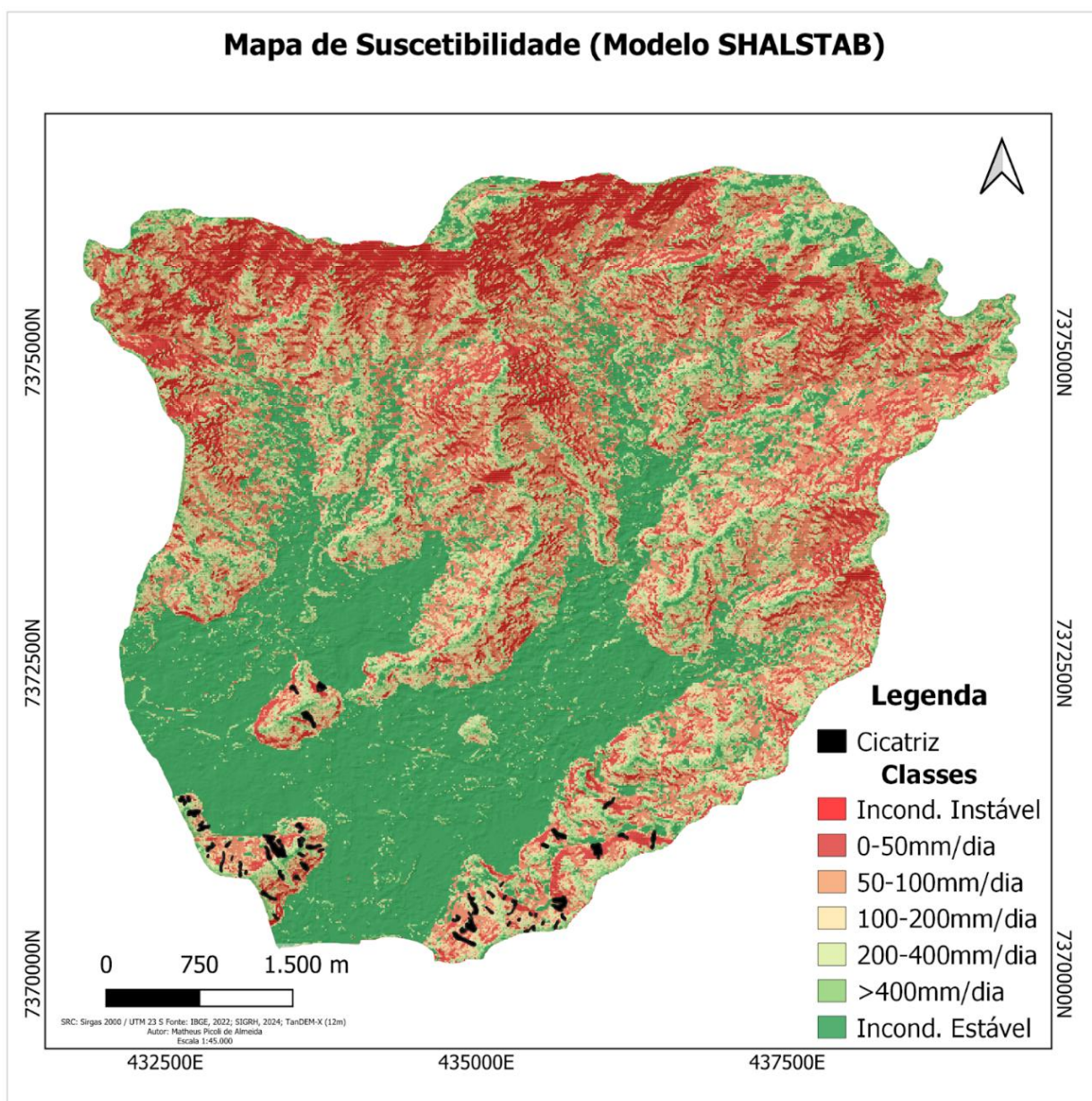
### 5.7 Mapa de Suscetibilidade – Modelo SHALSTAB

O mapa gerado pela modelagem de suscetibilidade foi realizado utilizando os parâmetros anteriormente descritos na Tabela 2 (Figura 32), sendo gerado também um modelo 3D para visualização das classes (Figura 31). Os mapas passaram por validação por meio dos índices de F, CC e PE (Figura 33 e 34).



*Figura 30 - Modelo 3D das classes de suscetibilidade*

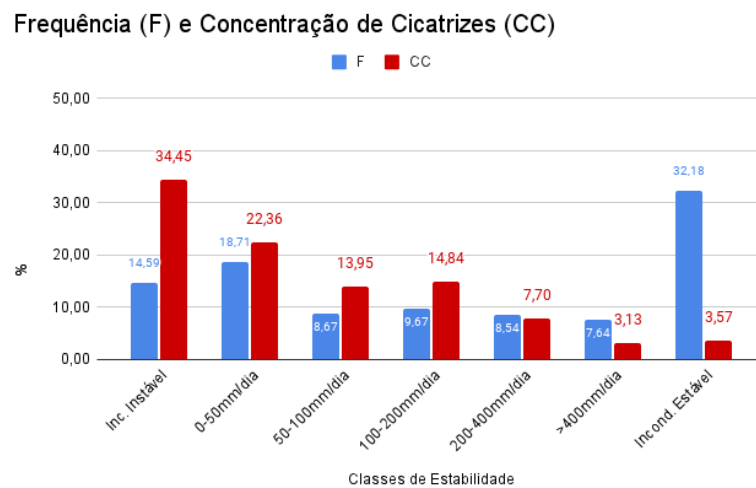
A Frequência (F) quantificou as células por categorias de estabilidade, evidenciando a grande área de planície com a maior quantidade da classe incondicionalmente estável com 32,18% das células totais, enquanto as áreas críticas incondicionalmente instáveis apenas 14,59%. As áreas mais instáveis estão localizadas, em sua maioria, nas porções das escarpas da Serra do Mar e em menor quantidade nas encostas que cercam o centro urbano de Camburi, embora os escorregamentos tenham sido identificados apenas neste segundo cenário.



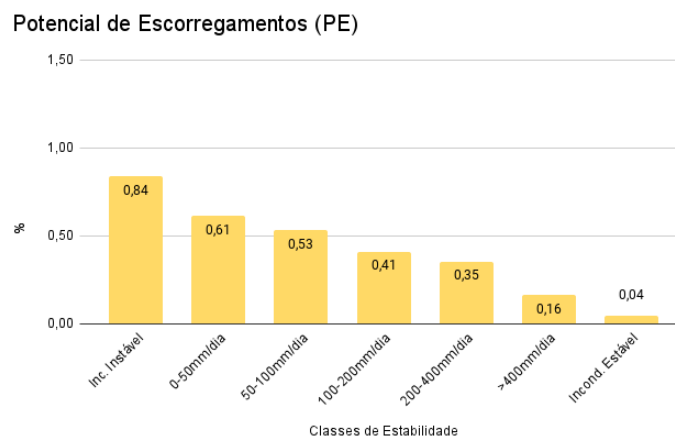
**Figura 31 - Mapa de Suscetibilidade gerado pelo modelo SHALSTAB**

Com a sobreposição das cicatrizes catalogadas, é possível inferir a assertividade do mapa ao localizá-las sobre áreas de maior classe de instabilidade. A Figura 33 demonstra a disposição do índice de concentração de cicatrizes em função das classes do modelo, as três classes de maior instabilidade, correspondentes a Incondicionalmente Instáveis, 0-50mm/dia, 50-100mm/dia comportam 70,76% das cicatrizes. Foi obtido um comportamento inversamente

proporcional dos índices de F e CC, onde o aumento da frequência nas classes mais estáveis implica a diminuição do índice de concentração de cicatrizes. Resultados semelhantes foram encontrados nos trabalhos de Montgomery e Dietrich (1994), em Berkeley (EUA) e Vieira (2007) na Serra do Mar (SP), que obtiveram variáveis entre 76 e 90% de cicatrizes nas classes de maior instabilidade. É importante ressaltar que, diferente dos estudos citados, o presente trabalho não se baseou em múltiplos cenários e variáveis do modelo digital de elevação, reduzindo a gama de resultados para fins comparativos, logo, conforme Dietrich et al. (1998), maiores acurácias atingidas estão relacionadas com maiores níveis de detalhamento do MDE e dados dos inputs.



**Figura 32 - Índices F e CC - Classes Suscetibilidade**



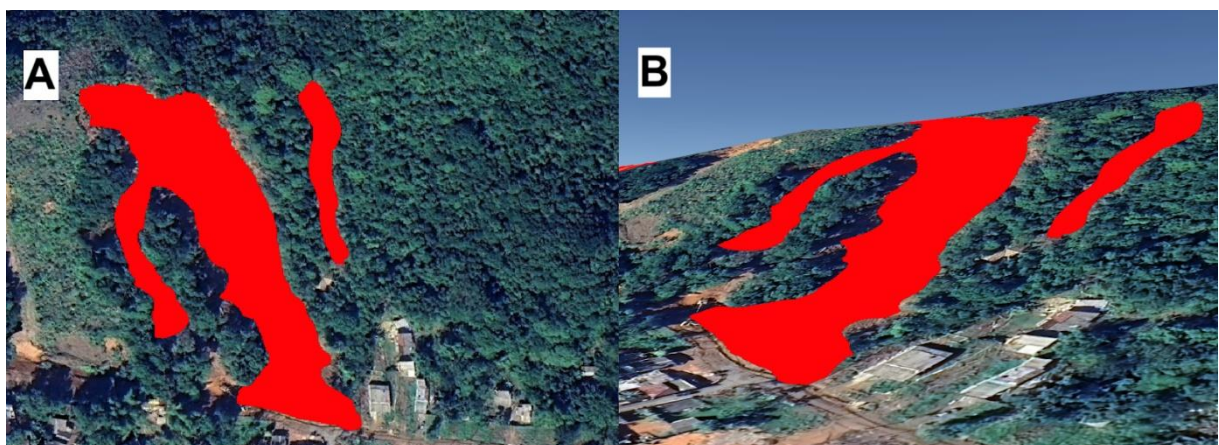
**Figura 33 - Índice PE - Classes Suscetibilidade**



As classes de instabilidade média apresentaram índices de valores relativamente próximos, principalmente as classes de 50-100mm/dia e 100-200mm/dia, onde foi possível observar um aumento na CC de 13,95% para 14,84%, apesar do aumento da estabilidade. Em análises em Campos do Jordão (SP), Prieto et al. (2016) também apontou leve aumento em classes intermediárias em um dos cenários analisados quando comparado com as cicatrizes, apesar do padrão não se repetir no índice PE.

Os resultados apresentados pelo índice PE (Figura 34) demonstram comportamento gráfico semelhante ao CC, onde o potencial é reduzido com o aumento da estabilidade. O maior valor se apresenta nas células incondicionalmente instáveis no pico de 0,84% e o menor nas células incondicionalmente estáveis em 0,04%. As classes intermediárias apresentaram resultados decrescentes, congruentes com o observado em campo e comparado com os outros parâmetros morfométricos.

Foi possível inferir que o mapeamento de cicatrizes foi eficaz para a construção da validação do modelo de suscetibilidade, embora tenha enquadrado nos polígonos das cicatrizes algumas áreas planas, relativas às áreas de depósito de sedimentos (Figura 35), tal fato ocorreu por conta do método de classificação supervisionada não utilizar parâmetros topográficos, sendo somente utilizado elementos de classes espectrais para tal delimitação. Logo, para resultados ainda mais precisos, um mapeamento mais rigoroso focado nos locais de ruptura possa apresentar índices ainda mais assertivos.



*Figura 34 - Exemplo de polígono do inventário de cicatrizes enquadrando áreas de depósito.*

De maneira geral, foi possível confirmar que os mapas de suscetibilidade gerados pelo modelo SHALSTAB foram eficientes na previsão de áreas instáveis na bacia do Rio Camburi e se mostrou aplicável, mesmo com o uso de dados secundários de locais distintos. No entanto, para análises mais precisas, é necessário um mapeamento mais detalhado das cicatrizes, que considere parâmetros topográficos e morfológicos para mapeamento mais detalhado, além do uso de parâmetros hidrológicos e de solo provenientes da própria área de estudo.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que o objetivo desta pesquisa foi alcançado no desenvolvimento do mapeamento de suscetibilidade da área em questão. O modelo SHALSTAB se mostrou eficaz na predição das áreas mais instáveis e a sua validação mostrou resultados consistentes, próximos ao observado no ambiente real. A concordância entre os cenários previstos e os cenários reais mapeados apresentaram resultados satisfatórios, sendo apontados pelas métricas e mecanismos de validação como verdadeiros.

O uso dos índices de Potencial de Escorregamentos (PE) e Concentração de Cicatrizes (CC) se mostraram eficazes na interpretação e validação dos cenários construídos e na comparação com o observado na realidade, mapeado pelo inventário de cicatrizes. Por outro lado, apesar da eficiência do método de classificação supervisionada utilizado para o mapeamento das feições de cicatrizes, deve-se ressaltar as verificadas falhas na análise, podendo serem minimizadas com a utilização de outros critérios, como valores topográficos e identificação mais detalhada de áreas afetadas com cobertura vegetal. Outro ponto em questão seria um futuro mapeamento de cicatrizes que considere o ponto de ruptura como componente principal da cicatriz, de modo a reduzir as inconsistências detectadas com a adição da área de deposição de sedimentos apontadas ao longo do trabalho.

Outro aspecto importante foi a pouca disponibilidade de dados hidrológicos e geotécnicos relativos à área de estudo, o que resultou na necessidade de aproximações de valores para atender aos parâmetros necessários, no entanto, apesar da escassez de informações primárias, a análise não foi comprometida.

Por fim, os resultados obtidos evidenciam a importância da aplicação de modelos de bases físicas nas análises de suscetibilidade e risco. O uso de modelagem pode ser um mecanismo valioso para tomada de decisão e instituições públicas frente à prevenção de futuros desastres, visto que os mecanismos de defesa atuais estão centrados em medidas pós-desastres, carecendo de ações prévias de mitigação de danos, elemento que pode ser implementado por meio de estudos como o presente trabalho.

Para os próximos trabalhos utilizando o Modelo SHALSTAB, ressalta-se a importância do uso de dados mais próximos do ambiente a ser analisado, além de um mapeamento de cicatrizes mais criterioso.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. and C. D. R. CARNEIRO. 1998. Origem e Evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências* 28: 135-150.

AB'SÁBER, A. N. A Serra do Mar e a Mata Atlântica em São Paulo. *Boletim Paulista de Geografia*, São Paulo, n. 4, p. 61-70, 1950.

BARBOSA, G. M. et al. Fatores desencadeadores de movimentos de massa no Maciço de Maranguape, Ceará, Brasil. In: *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*. [s.l.] INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, 2017. p. 4185–4190.

BARREDO, J.I., BENAVIDES, A., HERVAS, J.E VAN WESTEN, C.J. (2000). Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 2, n. 1

BARROS, E. de O., & Pamboukian, S. V. D. (2018). ANÁLISE DO DESASTRE DE MARIANA ATRAVÉS DA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO. *Revista Mackenzie De Engenharia E Computação*, 17(1). Recuperado de <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rmec/article/view/10513>

BIERMAN, P.R. & MONTGOMERY, D.R. Hillslope. In: *Key Concepts in Geomorphology*. New York: Freeman and Company Publishers, 145-178, 2014

BIERMAN, P. R.; MONTGOMERY, D. R.; CHRIST, A. J. KEY CONCEPTS IN GEOMORPHOLOGY – EDITION 2 OF A COMMUNITY-BASED TEXTBOOK. 2019. Disponível em: <<https://gsa.confex.com/gsa/2019AM/webprogram/Paper336235.html>>



BASSANELI et al. Estabilidade de Taludes. In. Revista Jornada Científica. v.1, n.2, 2016

BRASIL. Lei nº 12.608 de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm)>.

BUARQUE, D. C., FAN, F. M., PAZ, A., & COLLISCHONN, W. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, n 14, p.91-103, 2009.

CHIROL, A. A. Relações solo-fauna durante sucessão florestal em cicatrizes de deslizamento. 2009. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Manual de mapeamento de perigo e risco a movimentos gravitacionais de massa. Rio de Janeiro: CPRM, 2018. Versão 1.1. Última atualização: 18/09/2018.

CROZIER, M.J. Classification of Slope Movement. In: Landslides: Causes, Consequences & Environment. Routledge London & New York, p. 3-31, 1986.

DA CUNHA, R. B.; MARTINS, C. A. A. Geografia eleitoral: Uma revisão e possíveis caminhos. RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise, v. 39, p. 43–56, 1 abr. 2017.

DE PLOEY, J.; CRUZ, O. Landslides in the Serra do Mar, Brazil. CATENA, v.6, p.

111-122, 1979

DIETRICH, W. E., C. J. WILSON and S. L. RENEAU. 1986. Hollows, colluvion and landslides in soil-mantled landscapes. In m. Abraha, A.D and A. a. Unwin (eds), Winchester, pp. 361-388.

DIETRICH, W. e MONTGOMERY, D.R. SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), p. 29, 1998.

Fairfield, J. and Leymarie, P. (1991) Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models. Water Resources Research, 27, 709-717.<https://doi.org/10.1029/90WR02658>

FERNANDES, N. F. and C. P. AMARAL. 1996. Movimentos de massa: uma abordagem Geológico-Geomorfológica. In A. J. T. G. S. B. CUNHA (ed) Geomorfologia e Meio Ambiente., Rio de Janeiro, pp. 123-194p.

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

FRANCISCO, C. N.; CARVALHO, R. C.; SALGADO, C. M. Condicionantes geomorfológicos e da cobertura da terra na ocorrência de movimentos de massa na região serrana do Rio de Janeiro / Geomorphological and cover land conditioning factors of the mass movements in the mountainous region of Rio de Janeiro. Caderno de Geografia, v. 29, n. 56, p. 27, 20 fev. 2019.

FREIRE, E. S. M. 1965. Movimentos coletivos de solos e rocha e sua moderna sistemática. Construção 8: 10-18.

GAO, J. 1993. Identification of Topographic Settings Conductive to Landsliding From Nelson County, Virginia, U.S.A. Earth Surface Processes and Landforms: 579-591.

GERENTE, J. et al. Utilização de diferentes derivações do modelo Shalstab como ferramenta de auxílio ao monitoramento da suscetibilidade de movimento de massa em bacias hidrográficas com presença de ativos de transmissão de energia. Geography Department University of Sao Paulo, v. 43, p. e196408, 22 maio 2023.

GOMES, R. A. T., R. F. GUIMARÃES, O. A. CARVALHO JR and N. F. A. FERNANDES. 2005. Análise de um Modelo de Previsão de Deslizamentos (SHALSTAB) em Diferentes Escalas Cartográficas. Solos e Rochas. Revista Brasileira de Geotecnia 28: 85-97.

GOMES, Maria Carolina Villaça. Corridas de detritos e as taxas de denudação a longo-termo da Serra do Mar/SP. 2016. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. doi:10.11606/T.8.2017.tde-24022017-145209. Acesso em: 2025-01-08.

Gray, D. H. (1995) Consequences of vegetation removal. In: D. H. BARKER (Ed.), Vegetation and Slopes: Stabilization, Protection and Ecology. London: Thomas Telford, 296p.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. Segunda Ed. São Paulo: Editora Blucher, 1984.

GUIMARÃES, R. F., D. R. MONTGOMERY, H. M. GREENBERG, N. F. FERNANDES, R.

A. T. GOMES and O. A. P. CARVALHO JR. 2003. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology* 69: 99-108.

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

GUTJAHR, M.R. & R. TAVARES. 2009. Clima, p. 39-52. In: M.I.M.S. LOPES; M. KIRIZAWA & M.M.R.F. MELO (Eds). Patrimônio da Reserva Biológica do Alto da Serra de Paranapiacaba. A antiga Estação Biológica do Alto da Serra. São Paulo, Instituto de Botânica, 720p.

Highland, L.M., and Bobrowsky, Peter, 2008, The landslide handbook – A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey (USGS) Circular 1325, 129p.

IPT. 1991. Ocupação de encostas, São Paulo.

JOLY, C.A.; LEITÃO FILHO, H.F.; SILVA, S.M. O Patrimônio Florístico. In: CORTESÃO, J.; BIGARELLA, J.J.; JOLY, C.A.; LEITÃO FILHO, H.F.; SILVA, S.M.; COIMBRA FILHO, A.F., C MARA, I.B. Mata Atlântica. Rio de Janeiro: Ed. Index, 1991.

Krieger, M. Zink. Results of the TanDEM-X baseline calibration *IEEE J. Select. Top. Appl. Earth Observ. Rem. Sens.*, 6 (3) (2013), pp. 1495-1501.

MACEDO, Eduardo Soares de; SANDRE, Lucas Henrique. Mortes por deslizamentos no

Brasil: 1988 a 2022. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v.12, n.1, p.110-117, 2022.

MARCELINO, E. V. Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos/SP: 2004. 228p. – (INPE-12146-TDI/970).

MARENGO, J. 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, 1 jun. 2024.

MARTINS, T. D.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B. C.; CORREA, A. C. de B.; BATEIRA, C. V. ANÁLISE DOS PARÂMETROS MORFOLÓGICOS E OS ESCORREGAMENTOS RASOS NA SERRA DO MAR, PARANÁ. Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 18, n. 63, p. 223–239, 2017. DOI: 10.14393/RCG186310. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/37589>. Acesso em: 8 jan. 2025.

MARLIANA, S. N.; RÜHE, F. Post-reforestation vegetation development on abandoned highland fields in Java, Indonesia. Forest Ecology and Management, v. 328, pp. 245-253, 2014.

MATOS, L. D. J. et al. Avaliação das Construções Danificadas por Corridas de Detritos e Inundações Bruscas no Vale do Ribeira (SP) em 2014. Geography Department University of Sao Paulo, p. 57–67, 9 set. 2018.

MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. Journal of Soils and Sediments, v. 14, n. 7, p. 1266–1277, 2014.

MONTGOMERY, D. R. and W. E. DIETRICH. 1989. Source areas, drainage density and

channel initiation. *Water Resources Research* 25: 1907-1918.

MONTGOMERY, D.R. e DIETRICH, W.E. A physically based model for topographic controls on shallow landsliding. *Water Resources Research*, v. 30, 1994.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E.; SULLIVAN, K. The Role of GIS in Watershed Analysis. *Landform Monitoring, Modelling and Analysis*. John Wiley & Sons Ltd, 1998.

MONTEIRO, C.A. de F. A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo. *Atlas*. São Paulo: Instituto de Geografia/USP, 1973. 129p

O'LOUGHLIN, E.M.O. Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. *Water Resources Research*, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.

PRIETO, C. C., MENDES, R. M., SIMÕES, S. J. C. Comparação entre a aplicação do modelo Shalstab com mapas de suscetibilidade e risco de deslizamentos na bacia do córrego Piracuama em Campos do Jordão, SP. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 69/1, Edição Especial Geotecnologias e Desastres Naturais: 71-78 p. 2016.

QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. "The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models". *Hydrological Processes*, v.5, 59-79, 1991.

RODRIGUES, BASSANELI, H. et al. Estabilidade de taludes. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.dicionario.pro.br/index.php/Talude>>.

RODRIGUES, J.; TUPINAMBÁ, M.; AMARAL, C. A Corrida de Massa do Rio Vieira em Teresópolis, Sudeste do Brasil: Caracterização da Área-Fonte dos Sedimentos Transportados. *Anuario do Instituto de Geociencias*, v. 35, n. 2, p. 152–164, 2012.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. Revista do Departamento de Geografia - FFLCH/USP, v. 10, p. 20–32, 1997.

ROSSI, M. Fatores formadores da paisagem litorânea: a bacia do Guaratuba, SP – Brasil. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1999. (Tese de Doutorado).

SELBY, M. J. Mass Wasting of Soils. In: Hillslope Materials and Processes. Second Edition. Oxford University Press, Oxford, p. 249-355, 1993.

SHARPE, C. F. S. 1938. Landslides and related phenomena: a study of mass-movements of soil and rock, New York.

SILVA, F. S. da ., & Catelli, F.. (2020). Os modelos no Ensino de Ciências: Reações de estudantes ao utilizar um objeto-modelo mecânico concreto analógico didático (OMMCAD). Revista Brasileira De Ensino De Física, 42, e20190248. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0248>

SILVA, D. C. O. 2006. Aplicação do Modelo SHALSTAB na Previsão de Deslizamentos em Petrópolis. Dissertação de Mestrado. P.P.G em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, pp. 132.

VAN WESTEN, C. J.; RENGERS, N.; e SOETERS, R. Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. Natural Hazards, v.30, 399-419, 2003.

VARNES, D. J. Landslide Types and Processes. Landslides and Engineering Practice, 1958, p.20-47.

VIEIRA, B.C. Previsão de Escorregamentos Translacionais Rasos na Serra do Mar (SP) a partir de Modelos Matemáticos em Bases Físicas. Tese (Doutorado em Geografia). Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 193p, 2007

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. RA'E GA: o Espaço Geográfico em Análise, v. 34, p. 307, 2015.

Selby, M.J., 1993. Hillslope Materials and Processes. 2nd edn, Oxford University Press.

Stabile, Rodrigo & Youssef, Pedro & Körting, Thales & Lana, Julio & Namikawa, Laercio & Nery, Tullius & de Oliveira, Alisson & König, Tehrie. (2024). DESASTRE EM SÃO SEBASTIÃO-SP: MAPEAMENTO DOS PROCESSOS DE MOVIMENTOS DE MASSA DEFLAGRADOS EM FEVEREIRO DE 2023. IV Encontro Nacional de Desastres

Wang, L. and Liu, H. (2006) An Efficient Method for Identifying and Filling Surface Depressions in Digital Elevation Models for Hydrologic Analysis and Modelling. International Journal of Geographical Information Science, 20, 193-213. <http://dx.doi.org/10.1080/13658810500433453>

WOLLE, C. M. 1988. Análise dos escorregamentos translacionais rasos numa região da Serra do Mar. Tese de Doutorado. Escola Politécnica. USP, São Paulo, pp. 406.

WOLLE, C. M. and C. S. CARVALHO. 1989. Deslizamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil. Solos e Rochas: 27-36.

WOLLE, C. M. and C. S. CARVALHO. 1994. Taludes Naturais. In F. F. Falconi and A. N. Jr. (eds), Solos do litoral de São Paulo. Associação Brasileira de Mecânica de Solos – Núcleo Regional de São Paulo - ABMS, São Paulo, pp. 180-203.