

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

Ingrid Andrade Silva

Relação Entre As Rupturas de Declive e Os Escorregamentos Rasos na Serra do
Mar Paulista: Bacia do Gurutuba, Itaoca (SP)

São Paulo

2021

Ingrid Andrade Silva

Relação Entre As Rupturas de Declive e Os Escorregamentos Rasos na Serra do
Mar Paulista: Bacia do Gurutuba, Itaoca (SP)

Trabalho de Graduação Individual (TGI) apresentado ao Departamento de Geografia
da Faculdade de Letras, Filosofia e Ciências Humanas da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de bacharel em Geografia.

Área de Concentração: Geomorfologia e Movimentos de Massa

Orientadora: Profª Dra. Bianca Carvalho Vieira

São Paulo

2021

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

S586r Silva, Ingrid
Relação Entre As Rupturas de Declive e Os
Escorregamentos Rasos na Serra do Mar Paulista: Bacia
do Gurutuba, Itaoca (SP) / Ingrid Silva; orientadora
Bianca Vieira - São Paulo, 2021.
45 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. Geometria de
encostas. 3. Itaoca. I. Vieira, Bianca, orient. II.
Título.

AGRADECIMENTOS

À profa. Dra. Bianca, orientadora deste trabalho, que desde meu segundo ano de graduação sempre me inspirou e fascinou, pela oportunidade e pelo direcionamento. Devo a ela a paixão pela Geomorfologia, os aprendizados acadêmicos, o melhor trabalho de campo e muito do que aprendi durante esses cinco anos de graduação. Ao prof. Dr. Fernando Nadal, pela ajuda na construção da bibliografia deste trabalho. Ao grupo de pesquisas GPMorfo, por todo o material e a ajuda com a manipulação dos dados em ambiente SIG.

Ao meu avô, Edmundo, que infelizmente não está mais aqui para presenciar essa conquista, por sempre ter batalhado pela minha educação. Se em muitos momentos pensei em desistir, foi por ele, que sempre me ensinou a ser forte e insistente, que continuei. Espero que o senhor esteja feliz onde quer que esteja e que se orgulhe muito de sua primeira neta formada no Ensino Superior!

À minha mãe, Lucimara, por sempre ter feito todos os esforços possíveis para me dar o melhor. Sei que não foi fácil chegar até aqui, mas devo a você tudo o que construí hoje. Você é inspiração e apoio, e merece todo o mérito do mundo.

Aos meus amigos da graduação, que compartilharam angústias e felicidades comigo, não só durante a elaboração deste trabalho como também durante toda a jornada até aqui. Vocês são incríveis e espero estar com vocês até onde não pudermos mais.

A todos, obrigada!

RESUMO

Movimentos gravitacionais de massa são processos que modificam o modelado terrestre e podem gerar danos sociais e ambientais. Os escorregamentos rasos são um tipo de movimento de massa que ocorrem em velocidades rápidas, de curta duração, mobilizando todo tipo de material presente na encosta, e podem culminar em verdadeiros desastres naturais para as populações que habitam os entornos dos ambientes mais suscetíveis a acontecimentos como esses. Diversos estudos apontam a existência de fatores condicionantes, que definem quais encostas estão mais sujeitas aos movimentos de massa, e sua relação com o fator deflagrador (chuva). Dentre eles, a morfologia da encosta, em muitos casos, pode influenciar na sua suscetibilidade. A hipsometria, o ângulo de encosta, o aspecto e a curvatura são alguns condicionantes que, a depender de seu arranjo, podem definir a ocorrência desses eventos. O objetivo deste trabalho foi avaliar se existe uma correlação entre as rupturas de declive e os escorregamentos. Para produzir um mapa das rupturas de declive, foi utilizado imagens de satélite de alta resolução para avaliação da geometria das encostas compreendidas pela bacia do rio Gurutuba, em Itaoca (SP), que sofreu com diversos escorregamentos rasos e corridas de detritos em 2014. Para fazer a correlação, foi aplicado o índice de Potencial de Escorregamentos. Sua validação foi feita através da comparação com o inventário de cicatrizes de escorregamento. Os resultados indicaram para um índice de Potencial de Escorregamentos de 4,03%, sinalizando que não há, necessariamente, uma relação de controle entre as rupturas de declive e os escorregamentos. Os estudos acerca dos processos que ocorrem nas encostas é imprescindível para a mitigação dos danos causados por eventos de grande magnitude, tendo em vista conhecer seus agentes condicionantes e deflagradores, para que se possa evitar que processos naturais se tornem desastres. Este trabalho pode contribuir para o mapeamento geomorfológico de detalhe da bacia do rio Gurutuba, assim como na disponibilidade de dados referentes à caracterização geral da área.

Palavras-chave: Escorregamentos rasos; Geometria de encostas; Vale do rio Ribeira; Itaoca.

ABSTRACT

Gravitational mass movements are processes that modify the shaping of the land and can lead to social and environmental damage. Shallow landslides are a type of mass movement that occur at fast speeds and in short durations. It mobilizes all kind of slope materials and can culminate in natural disasters for populations that inhabit the surroundings of places susceptible to events such as those. Several studies indicate the existence of conditional factors that define which slopes are more susceptible to mass movements and their relation to the triggering factor. Among such factors, the slope morphology in many situations can influence its susceptibility. The hypsometry, the slope angle, the aspect, and the curvature are some of the conditions that, depending on their arrangement, can define the occurrence of these events. This work's objective was to evaluate whether there is a correlation between slope ruptures and landslides. In the production of a slope rupture map, high-resolution satellite images were used assess the geometry of the slopes comprised by the Gurutuba river basin, located in the city of Itaoca (SP), which suffered with several shallow landslides and debris run-offs in 2014. To produce the correlation, the Landslide Potential Index was applied. Its validation was made through comparison with the landslide's scars inventory. The results indicated to a Landslide Potential Index of 4,03%, unveiling that there isn't, necessarily, a relation of control between slope breaks and landslides. Studies on the processes that occur on slopes are essential for mitigating the damage caused by events of great magnitude. Knowing their conditioning and triggering agents allow us to prevent natural processes from becoming disasters. This work can contribute to the geomorphological mapping of the basin of the Gurutuba river, as in the disponibility of data about the general characterization of the area.

Key-words: Shallow landslides; Slope geometry; Ribeira River Valley; Itaoca.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos movimentos de massa.	4
Tabela 2: Concentração de cicatrizes de escorregamentos nas classes de ângulo de encosta em áreas na Serra do Mar	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: A) Fotografia de uma casa comprometida pelo material mobilizado pelos eventos ocorridos. B) Vista aérea da enchente que afetou diversas moradias na cidade. C) Fotografia de residências afetadas. Destaque para a altura que o material se acumulou, alcançando os telhados das moradias. D) Residência afetada pelos movimentos de massa e enchentes. Nota-se a base da construção comprometida. Fonte: Marcelo F. Gramani (2014); Prefeitura Municipal de Itaoca, (2014)	2
Figura 2: (A) Vista aérea de uma encosta atingida por deslizamentos em Blumenau - SC em 2008. Na imagem, nota-se o desabamento dos edifícios construídos na encosta. (B) Foto aérea de cicatrizes de deslizamentos em Yunnan, China, em 2008. Rodovias e plantações foram destruídas pelos deslizamentos e corridas de lama. Fonte: James Tavares/SECOM (2008); Xinhua (2008)	5
Figura 3: (A) Perfil esquemático de um escorregamento rotacional. (B) Imagem aérea de uma cicatriz de escorregamento rotacional em King Country, Nova Zelândia. A curva verde representa o local da ruptura do solo e a vermelha apresenta o local onde a massa escorregada se depositou. O eixo de rotação do movimento é representado pelas setas brancas. Fonte: Highland e Bobrowsky (2008); Crozier (2009)	5
Figura 4: (A) Perfil esquemático de um escorregamento translacional raso. (B) Foto aérea de um escorregamento translacional raso ocorrido em 2018 em Cusco, Peru. Nota-se a presença de ruptura planar, apresentando grande comprimento. Fonte: Highland e Bobrowsky (2008); Galeria del Ministerio de Defensa del Perú (2018)	6
Figura 5: (A) Perfil esquemático de um escorregamento em cunha. (B) Foto de uma cicatriz de escorregamento em cunha em Belo Horizonte – MG. Fonte: Tominaga (2009); Parizzi (2004)	6
Figura 6: Localização da Bacia Hidrográfica do rio Gurutuba, em Itaoca, no Estado de São Paulo. Org.: Da autora (2021)	13
Figura 7: Mapa geológico de Itaoca. Fonte: Mello e Bettencourt (1998)	15
Figura 8: Perfil de alteração na bacia do rio Gurutuba. Nota-se a presença das características da rocha que deu origem ao solo na camada Saprólito. Fonte: Coelho (2020).	16
Figura 9: Precipitação durante o ano de 2014 para o município de Itaoca – SP. Fonte dos dados: CIIAGRO (2021). Org.: Autora (2021)	17
Figura 10: (A) Vista aérea das encostas da região de Itaoca após os escorregamentos. Nota-se as cicatrizes de escorregamento por toda a área compreendida pela imagem. (B) Foto aproximada de algumas das cicatrizes. (C; D) Fotos do município de Itaoca após as enxurradas. É possível notar a presença de entulho, troncos de árvores e até mesmo partes de edifícios misturados à lama. Fonte: Gramani (2014); Prefeitura Municipal de Itaoca (2014)	18
Figura 11: Modelo Digital de Elevação para a bacia do Gurutuba. Org: Da autora (2021)	19
Figura 12: Ferramenta 3D Analyst. No módulo Interpolate Line cria-se uma linha em 3D ao interpolar as informações acerca da altura do modelado do relevo presente no arquivo	

raster. Posteriormente, através do módulo Profile Graph, é possível obter a visualização do perfil longitudinal. Os traços em vermelho ao longo do perfil delimitam as RD	20
Figura 13: Imagens de satélite da bacia do Rio Gurutuba. A partir da disponibilidade de imagens possuindo relevo em 3D, foi possível realizar a conferência das rupturas de declive encontradas através dos mapas gerados a partir do MDE. Em vermelho, estão destacados o limite das rupturas	21
Figura 14: Mapa das cicatrizes de escorregamentos. Em cores claras, é possível identificar as cicatrizes dos eventos através das imagens RapidEye de 30/01/2014. O satélite RapidEye fornece imagens com melhores resoluções, tornando a identificação das cicatrizes mais precisas. Fonte dos dados: Carou et al (2017).	22
Figura 15: Exemplo de mapa gerado através da ferramenta Raster Calculator. O input na caixa de diálogo da ferramenta gerou uma informação referente à multiplicação das Cicatrizes de Escorregamento e das Rupturas de Declive, informando no mapa em quais partes as duas feições se cruzam	23
Figura 16: Mapa de ângulo de encosta para a bacia do rio Gurutuba, Itaoca (SP). Org.: Da autora (2021)	25
Figura 17: Mapa de sombreadimento de relevo para a bacia do rio Gurutuba, Itaoca (SP)	27
Figura 18: Mapa das rupturas de declive na bacia do Rio Gurutuba, Itaoca (SP). Org.: Da autora (2021)	28
Figura 19: Mapeamento inicial das RD. Org.: Da autora (2021)	29
Figura 20: Perfis topográficos da bacia do Rio Gurutuba. Nota-se a grande diferença no modelado de relevo das porções ao norte da bacia, apresentando encostas mais íngremes. Org.: Da autora (2021)	30
Figura 21: Mapa das cicatrizes de escorregamento e das RD. Org.: Da autora (2021)	31

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	10
Equação 2	22
Equação 3	32
Equação 4	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO	1
2. EMBASAMENTO TEÓRICO	3
2.1 Movimentos de massa: conceitualização e categorização	3
2.2 Geometria das Encostas	9
3. ÁREA DE ESTUDO: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GURUTUBA	13
4. MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1 Avaliação das Rupturas de Declive (ID)	19
4.2 Correlação entre RD e Escorregamentos	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5.1 Mapas de Ângulo da Encosta e Relevo Sombreado	24
5.2 Mapa de Rupturas de Declive (RD's)	27
5.3 Correlação entre RD e Escorregamentos	31
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
BIBLIOGRAFIA	34

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Movimentos gravitacionais de massa são processos que abrangem diversos tipos de eventos, que variam em velocidade, magnitude, material mobilizado e movimento. Os escorregamentos rasos possuem destaque em função da sua existência no cotidiano da vida humana, ocorrendo nas mais diversas localidades do globo terrestre, em todos os climas e latitudes. Eventualmente, na ausência de planos de mitigação dos danos causados por esses eventos naturais, os escorregamentos podem gerar tragédias como o evento de 2011, na região serrana do Rio de Janeiro, que resultou em mais de 1.500 mortes (COELHO-NETTO *et al.*, 2013).

Em janeiro de 2014 o município de Itaoca presenciou o desencadeamento de diversos tipos de movimentos de massa, em sua maioria escorregamentos rasos e corrida de detritos, deflagrados a partir de uma precipitação de 200 milímetros em duas horas (GRAMANI e ARDUIN, 2015). A chuva, entretanto, não foi distribuída por toda a área da cidade: ficou concentrada nas cabeceiras do Rio Palmital, principal rio da região, e nas sub-bacias do Guarda-Mão e Gurutuba, ocasionando escorregamentos, que posteriormente levaram a corrida de detritos (CAROU *et al.*, 2017). O material mobilizado pelos eventos foi movimentado até o centro da cidade, e em seu percurso afetou diversas moradias (**Figura 1**) (GRAMANI, 2015). A bacia do Rio Gurutuba foi a mais afetada da região, apresentando cerca de 336 cicatrizes de escorregamento, provenientes de um único evento, o que justificou sua escolha como área de estudo para este trabalho (CAROU *et al.*, 2017).

Entender o funcionamento desses processos naturais é fundamental para que seja feita a redução dos danos causados por eles. Para tal, é necessário o estudo de seus agentes condicionantes e deflagradores, assim como o estudo de eventos passados, para que se possa gerar dados de análise com os quais pode-se prever potenciais eventos futuros e impedir que esses processos naturais se tornem desastres (FERNANDES e AMARAL, 1995).



Figura 1: A) Fotografia de uma casa comprometida pelo material mobilizado pelos eventos ocorridos. B) Vista aérea da enchente que afetou diversas moradias na cidade. C) Fotografia de residências afetadas. Destaque para a altura que o material se acumulou, alcançando os telhados das moradias. D) Residência afetada pelos movimentos de massa e enchentes. Nota-se a base da construção comprometida. Fonte: Marcelo F. Gramani (2014); Prefeitura Municipal de Itaoca, (2014).

Dentre os fatores que condicionam os escorregamentos, pode-se destacar a geometria das encostas. Trata-se de um fator importante, já que a declividade, o aspecto, a hipsometria e curvatura podem regular o regime e a distribuição de chuvas, a distribuição de insolação, fazem o controle dos fluxos superficiais e subsuperficiais e influenciam no desenvolvimento dos solos (OLIVEIRA, *et al.*, 1995; COLANGELO, 1996). A declividade, como já se sabe, é o fator condicionante mais importante nos estudos dos escorregamentos, devido à ação da força da gravidade (Sidle *et al.*, 1985).

A avaliação dos escorregamentos pode ser feita através de diversas abordagens. Neste trabalho, foi feita através da observação do índice de Potencial de Escorregamentos, elaborado a partir do inventário de cicatrizes de escorregamentos e das informações acerca dos parâmetros morfométricos, traçando uma comparação

com o índice de Ruptura de Declive para avaliar se existe um controle dessa unidade da geometria das encostas sobre os processos.

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar a relação entre os escorregamentos rasos ocorridos durante o verão de 2014 na bacia do rio Gurutuba, em Itaoca (SP) e a geometria das encostas, considerando também as rupturas de declive.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Movimentos de massa: conceitualização e categorização

Os movimentos de massa são processos que mobilizam materiais rochosos, terrosos, lama e outros materiais inconsolidados encosta abaixo, em velocidades que variam de centímetros por segundos até metros por segundo (FERNANDES e AMARAL, 1995; PRESS *et al.*, 2006).

São classificados em diversos estudos, resultando em uma gama muito ampla de categorizações. Dentre as classificações brasileiras, destacam-se aquelas feitas por Guidicini e Nieble (1976) e Augusto Filho (1992).

Para Guidicini e Nieble (1976), as classificações brasileiras precisam relacionar-se às chuvas. Os autores apontam que, na literatura nacional, a relação entre os movimentos de massa e a pluviosidade se limitava à associação com o registro pluviométrico diário, enquanto na literatura internacional encontravam-se poucos registros. A classificação proposta em sua obra é fruto dos estudos que procuraram investigar a relação entre os movimentos de massa e a pluviosidade, buscando um enfoque nos períodos mais chuvosos dos anos avaliados. Têm-se, portanto, uma classificação que dividiu os movimentos de massa em quatro categorias, com subdivisões: escoamentos, escorregamentos, subsidências e formas de transição (GUIDICINI e NIEBLE, 1976).

A gravidade é sempre a força principal atuante nos movimentos de massa, excluindo-se o transporte feito pela água, vento e gelo (PENTEADO, 1983). As classificações dos diferentes tipos de movimentos de massa buscam compreender o tipo de material movimentado e seus respectivos planos de ruptura, além da velocidade em que o processo é deflagrado. A partir dessas características, diferenciam-se os movimentos gravitacionais (PENTEADO, 1983).

A classificação de Augusto Filho (1992), que será considerada para a execução deste trabalho, traz a seguinte divisão: rastejo, escorregamentos, quedas e corridas (Tabela 1).

Tabela 1: *Classificação dos movimentos de massa.*

Processos	Dinâmica/Geometria/Material
Rastejos	<ul style="list-style-type: none"> vários planos de deslocamento (internos) velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade movimentos constantes, sazonais ou intermitentes solo, depósitos, rocha alterada/fraturada geometria indefinida
Escorregamentos	<ul style="list-style-type: none"> poucos planos de deslocamento (externos) velocidades médias (m/h) a altas (m/s) pequenos a grandes volumes de material geometria e materiais variáveis: <p>Planares – solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza</p>
Quedas	<ul style="list-style-type: none"> sem planos de deslocamento movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado velocidades muito altas (vários m/s) material rochoso pequenos a médios volumes geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. <p>Rolamento de matacão Tombamento</p>
Corridas	<ul style="list-style-type: none"> muitas superfícies de deslocamento movimento semelhante ao de um líquido viscoso desenvolvimento ao longo das drenagens velocidades médias a altas mobilização de solo, rocha, detritos e água grandes volumes de material extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Tominaga (2012) apud Augusto Filho (1992).

Os escorregamentos (**Figura 2**) são um tipo de movimento de massa de curta duração, de velocidade rápida e plano de ruptura bem definido, que permite a distinção entre o material mobilizado e o não mobilizado (TOMINAGA, 2009). De maneira geral, ocorrem quando a força da gravidade é maior que o atrito interno das partículas componentes do solo (TOMINAGA, 2009).

Ocorrem com maior frequência nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste do Brasil, principalmente na Serra do Mar (TOMINAGA, 2009). Vieira e Gramani (2015) afirmam que os movimentos de massa são parte do processo de formação do arranjo atual do relevo na Serra do Mar. Desde 1988, o Brasil soma quase 4 mil vítimas fatais dos deslizamentos de terra, indicando, por exemplo, a gravidade da falta de mitigação e estudo desses eventos (ISTOÉ, 2022).



Figura 2: (A) Vista aérea de uma encosta atingida por deslizamentos em Blumenau - SC em 2008. Na imagem, nota-se o desabamento dos edifícios construídos na encosta. (B) Foto aérea de cicatrizes de deslizamentos em Yunnan, China, em 2008. Rodovias e plantações foram destruídas pelos deslizamentos e corridas de lama. Fonte: James Tavares/SECOM (2008); Xinhua (2008).

Os escorregamentos rotacionais (**Figura 3**) apresentam plano de ruptura curvo e côncavo para cima, assemelhando-se a uma colher, ocorrendo em solos espessos e homogêneos (FERNANDES e AMARAL, 1995). Estão associados a encostas com variações no ângulo entre 20 e 40 graus, sendo que a profundidade da ruptura no solo pode atingir 0,3 metros e a velocidade varia de 0,3 metros a cada 5 anos até 1,5 metros por mês (FERNANDES e AMARAL, 1995; PRESS *et al.*, 2006).

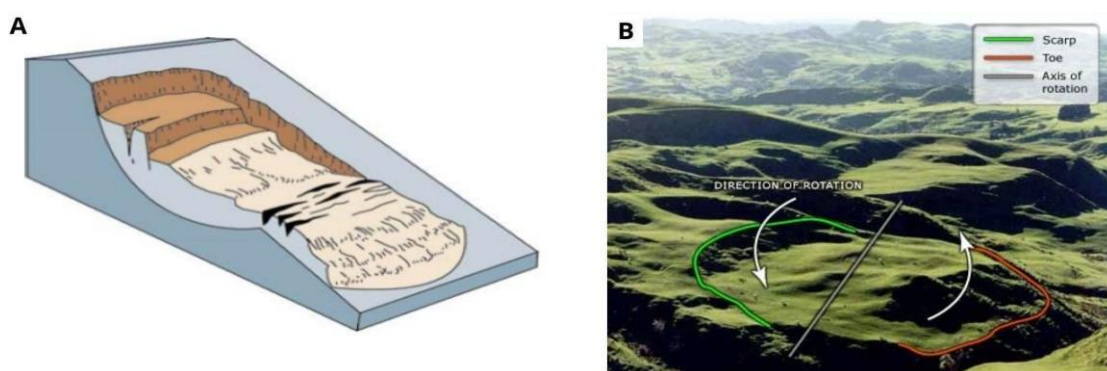


Figura 3: (A) Perfil esquemático de um escorregamento rotacional. (B) Imagem aérea de uma cicatriz de escorregamento rotacional em King Country, Nova Zelândia. A curva verde representa o local da ruptura do solo e a vermelha apresenta o local onde a massa escorregada se depositou. O eixo de rotação do movimento é representado pelas setas brancas. Fonte: Highland e Bobrowsky (2008); Crozier (2009).

Os escorregamentos translacionais rasos (**Figura 4**) apresentam ruptura planar, de características comprida e rasa, ocorrendo em velocidades que variam de 1,5 metros por mês até 1,5 metros por dia. Geralmente se iniciam durante períodos

bastante chuvosos, na descontinuidade mecânica resultante do encontro do solo com a rocha sã (FERNANDES E AMARAL, 1995). A massa escorregada se move para fora de uma superfície plana, podendo percorrer longas distâncias de seu local de origem (FERNANDES e AMARAL, 1995; PRESS *et al.*, 2006; TOMINAGA, 2009).

Por último, os escorregamentos em cunha (**Figura 5**) estão relacionados à relevos controlados por estruturas geológicas, onde rochas pouco alteradas apresentam estruturas planares instáveis e condicionam o deslocamento de uma massa em forma de prisma na intersecção dos planos diferentes (TOMINAGA, 2009).

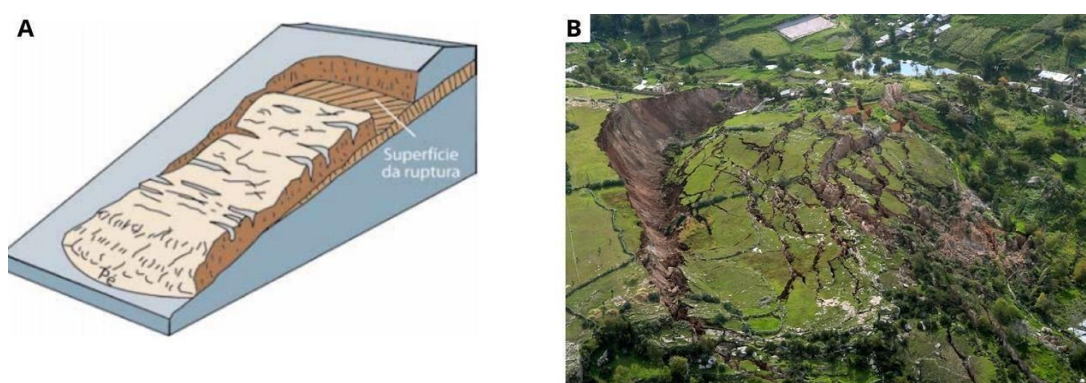


Figura 4: (A) Perfil esquemático de um escorregamento translacional raso. (B) Foto aérea de um escorregamento translacional raso ocorrido em 2018 em Cusco, Peru. Nota-se a presença de ruptura planar, apresentando grande comprimento. Fonte: Highland e Bobrowsky (2008); Galeria del Ministerio de Defensa del Perú (2018).

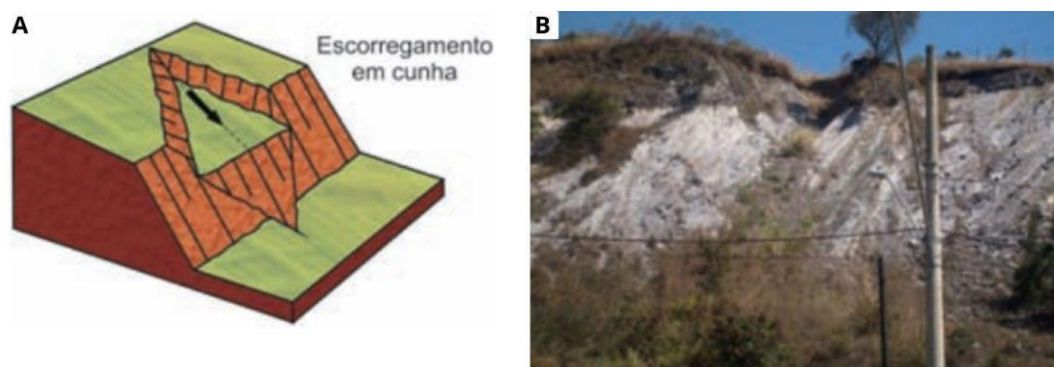


Figura 5: (A) Perfil esquemático de um escorregamento em cunha. (B) Foto de uma cicatriz de escorregamento em cunha em Belo Horizonte – MG. Fonte: Tominaga (2009); Parizzi (2004).

Os escorregamentos acontecem de acordo com a existência de alguns fatores condicionantes que afetam a estabilidade das encostas. A estabilidade da encosta é a relação entre os elementos que causam perturbações aos materiais presentes na encosta, movimentando-os, e as forças que resistem a essas perturbações (SUMMERFIELD, 2014). Quando a força dos elementos perturbadores é superior à força daqueles que resistem, o movimento é desencadeado (SUMMERFIELD, 2014).

Diversos são os fatores que exercem perturbações à instabilidade das encostas, e quando aliados a eventos deflagradores, como grandes chuvas ou terremotos, podem dar início aos movimentos de massa. Esses fatores são de ordem geológica e geomorfológica, referindo-se à composição e estrutura das rochas, morfologia das encostas e características do solo (FERNANDES e AMARAL, 1995). A interferência antrópica na construção e modificação das encostas inclui-se, também, como um fator condicionante (ALHEIROS e FILHO, 2010).

Summerfield (2014) categoriza os fatores em preparatórios ou desencadeadores. Os fatores preparatórios tornam a encosta suscetível à movimentos e os fatores desencadeadores dão início aos eventos. Entretanto, o autor alerta para o fato de que a análise dos fatores que aumentam a instabilidade das encostas possui aplicação limitada, pois na natureza esses elementos variam.

Guidicini e Nieble (1976) dividem os condicionantes em *agentes predisponentes*, referindo-se aqueles que atuam no surgimento dos movimentos gravitacionais, e *agentes efetivos*, referindo-se aqueles que atuam na deflagração dos movimentos. Os agentes predisponentes englobam características naturais da encosta como geologia, morfologia, clima, arranjo hidrológico, calor solar, vegetação e força da gravidade (GUIDICINI e NIEBLE, 1976). Os agentes efetivos são divididos em preparatórios e imediatos, diferenciando-se aqueles que trabalham nos materiais da encosta gradativamente, deixando-a suscetível aos movimentos de massa, e aqueles que agem no momento do início do processo. Podem ser citados como preparatórios a pluviosidade, a erosão pela água e vento, congelamento e degelo, variações de temperatura, ações antrópicas e de animais, enquanto como imediatos se enquadram as chuvas intensas, terremotos, fusão de gelo, entre outros (GUIDICINI e NIEBLE, 1976).

Em relação aos fatores de ordem geológicos, Fernandes e Amaral (1995) destacam que as fraturas e as falhas condicionam os escorregamentos, pois são descontinuidades mecânicas e hidráulicas. No caso das falhas, sua existência guia a alteração e leva a frente de intemperismo para dentro do maciço rochoso, aumentando a heterogeneidade do bloco rochoso quando essas falhas encontram outras descontinuidades (FERNANDES e AMARAL, 1995). A presença de falhas também afeta a dinâmica dos fluxos subterrâneos (FERNANDES e AMARAL, 1995).

Sidle *et al.* (1995) afirmam que solos rasos desenvolvidos em rochas duras, massivas em encostas muito íngremes são situações em que as encostas estão suscetíveis aos movimentos de massa. Rochas cristalinas e sedimentares bem cimentadas sob as circunstâncias de altas inclinações podem causar dificuldades à junção do solo à rocha, gerando descontinuidades mecânicas que, com a presença da água, se movimentarão (Sidle *et al.*, 1985). Em relação aos solos, pode haver instabilidade se houver descontinuidade entre seus horizontes (FERNANDES e AMARAL, 1995).

No que refere aos condicionantes geomorfológicos, Fernandes e Amaral (1995) afirmam que a morfologia das encostas influencia a ocorrência de movimentos de massa tanto de forma direta quanto indireta. O formato da encosta regula a distribuição de água no solo, possuindo papel fundamental durante eventos chuvosos ao direcionar a recarga de água nas porções mais profundas do solo (SIDLE *et al.*, 1985). O formato da encosta em planta gera zonas de convergência e divergência dos fluxos superficiais e subsuperficiais, facilitando ou impedindo o acúmulo de água no solo (FERNANDES e AMARAL, 1995).

A vegetação assume papel de suma importância para a investigação da ocorrência de movimentos de massa, pois sua presença pode retardar os movimentos ou acelerá-los. Segundo Sidle *et al.* (1985), há uma relação entre o desmatamento das florestas e vegetações nativas com a maior frequência de escorregamentos pequenos e rasos. A maior estabilidade das encostas está associada ao reforço fornecido pela vegetação e suas raízes, principalmente quando os solos estão saturados, tornando-os mais estáveis. Quando a vegetação é removida e as raízes apodrecem, os solos apresentam falhas (SIDLE *et al.*, 1985).

Por fim, a associação dos depósitos de encosta com sua morfologia pode favorecer a ocorrência de escorregamentos devido à grande heterogeneidade característica de seu material (FERNANDES e AMARAL, 1995).

Para o caso dos escorregamentos rasos, de acordo com Sidle *et al.* (1985), o gradiente de declividade é o fator condicionante principal, mas é imprescindível lançar um olhar sobre outros condicionantes. Portanto, devemos buscar a resposta do questionamento do porquê algumas encostas sofrem com os escorregamentos e outras não.

2.2 Geometria das Encostas

Analisar a forma das encostas é imprescindível para a compreensão dos processos deflagradores dos movimentos de massa, visto que o fluxo de água, desenvolvimento de solos e a força da gravidade são afetados pelos ângulos que compõem as encostas. A avaliação das geometrias das encostas em conjunto com os outros fatores condicionantes pode auxiliar no entendimento do regime de escorregamentos de uma determinada região, respaldando-se, comumente, nas seguintes características para a análise: Ângulo da encosta, curvatura, aspecto e hipsometria (SIDLE *et al.*, 1985; DIAS, 2019).

O ângulo da encosta é considerado como o principal parâmetro para o estudo dos movimentos de massa, especialmente os escorregamentos rasos (SIDLE *et al.*, 1985). Com o aumento do ângulo da encosta, há a diminuição da estabilidade, e, portanto, há o risco de deflagração de movimentos de massa (GUIDICINI e NIEBLE, 1976). Encostas que apresentam declividades acima de 25°, entretanto, já estão sujeitas à ocorrência dos processos, não necessariamente se limitando apenas às altas declividades (SIDLE *et al.*, 1985). Todavia, a delimitação de classes de declividades mais suscetíveis a escorregamentos não é empregada de forma universal, dependendo da classificação construída ao analisar diferentes paisagens. No geral, as classes mais frequentes estão entre 30 – 50° (DIAS, 2019).

A relação entre os escorregamentos rasos e o ângulo da encosta pode ser aferida através da comparação entre as cicatrizes de escorregamentos e os ângulos componentes das encostas em que ocorreram os processos, como feito por Bonini (2017), para a bacia do Rio Gurutuba, em Itaoca (SP). As classes que apresentaram

o maior número de cicatrizes estão entre 25 e 40°, concentrando 73% das cicatrizes. Em Caraguatatuba (SP), também na Serra do Mar, Dias (2019) afirma que as classes mais suscetíveis a escorregamentos estão entre 30 e 55°. No trabalho elaborado por Dai *et al.* (2011), acerca de uma série de escorregamentos deflagrados a partir de um terremoto, em 2008, em Wenchuan, China, há uma relação crescente entre o ângulo da encosta e a concentração dos movimentos de massa, em que as classes acima de 35° apresentam mais ocorrências.

Christofoletti (1974) define as rupturas de declive como pontos de passagem entre as seções da encosta que apresentam diferentes declividades. As encostas são compostas, geralmente, por setores convexos nos topos e côncavos na parte inferior, sendo conectadas por inflexões no ângulo de declividade, correspondentes às rupturas de declive. Tais rupturas são descontinuidades na geometria dos sistemas que compõem as encostas, já que conferem uma mudança abrupta na declividade (CHRISTOFOLETTI, 1974). Levando em consideração que os escorregamentos são condicionados por descontinuidades, é importante avaliar qual o papel das rupturas de declive no condicionamento de sua deflagração.

Para fazer a avaliação da presença das rupturas de declive, utiliza-se o Índice de Ruptura de Declive (ID), formulado por Christofoletti (1974, p. 53) (**Equação 1**), com o intuito de analisar as vertentes enquanto sistemas morfológicos:

(...) corresponde ao número de pontos de inflexão multiplicado por 100, dividido pelo comprimento retilíneo da superfície da vertente. Ponto de inflexão (*p*) é considerado como o ponto inicial ou terminal de uma porção côncava ou convexa do perfil, excetuados os pontos superior e inferior. Dessa forma, um perfil não totalmente côncavo ou convexo terá, no mínimo, dois pontos de inflexão. Para calculá-lo, usa-se o seguinte procedimento: (...). (CHRISTOFOLETTI, 1974)

$$ID = \frac{p \times 100}{LR} = \frac{2 \times 100}{292,32} \text{ (Equação 1)}$$

LR corresponde ao comprimento retilíneo da superfície da vertente, medido em linha reta, unindo os pontos superior ao inferior do perfil, através do Teorema de Pitágoras, após a obtenção da altura e do comprimento horizontal da encosta. *p* corresponde aos pontos de inflexão presentes na encosta. Quanto maior for o resultado

obtido a partir da aplicação da equação acima, mais rupturas de declive estarão presentes no perfil (CHRISTOFOLETTI, 1974).

A curvatura, de acordo com Fernandes e Amaral (1995), exerce influência indireta sobre a deflagração dos processos. A curvatura se refere ao formato da encosta em planta, podendo ser côncava, convexa ou retilínea, e exerce controle dos fluxos d'água, podendo gerar zonas de convergência ou divergência (Fernandes e Amaral, 1995). Entretanto, este parâmetro nem sempre se torna decisivo na avaliação dos processos, podendo apresentar uma distribuição similar de eventos (BONINI, 2017), em que a presença das cicatrizes de escorregamentos se mostrou uniforme nos três tipos de geometria existentes. A maior suscetibilidade apresentada neste trabalho foi para as encostas Convexas, com valores de 35,2% do total das cicatrizes avaliadas, seguidas pelas Côncavas, que apresentaram 33,9%. Na bacia da Ultrafértil, em Cubatão, na Serra do Mar paulista, Nery *et al.* (2011) encontraram a maior suscetibilidade aos escorregamentos nas encostas retilíneas.

O aspecto, por sua vez, se refere à orientação das encostas. É medido no sentido horário, em graus, dividindo-se de 0 (Norte) a 360 (Norte) (DIAS, 2019). A orientação das encostas influencia diretamente na incidência de insolação e no regime de chuvas (Oliveira *et al.*, 1995). Os níveis de precipitação encontrados pelos autores no Maciço da Tijuca, Rio de Janeiro, são diferentes para as encostas Norte e Sul, sendo maiores nas encostas Sul, enquanto as temperaturas mais altas foram registradas nas encostas Norte. A presença de maiores níveis de umidade pode aumentar a instabilidade das encostas, que, em associação à grandes eventos pluviométricos, podem ser gatilhos para eventos de escorregamentos. Em Caraguatatuba, Dias (2019) encontrou na orientação Sul a maior suscetibilidade a escorregamentos, sendo essa também a orientação que apresenta menor taxa de incidência de calor (OLIVEIRA, *et al.*, 1995; DIAS, 2019).

-

O estudo da geometria das formas de relevo pode ser feito através do mapeamento geomorfológico de detalhe, que se estabeleceu como um instrumento importante para o desenvolvimento deste trabalho, fornecendo técnicas e ferramentas para a representação de formas de relevo e permitindo a análise de suas relações com diversas estruturas e processos (CASSETI, 2005).

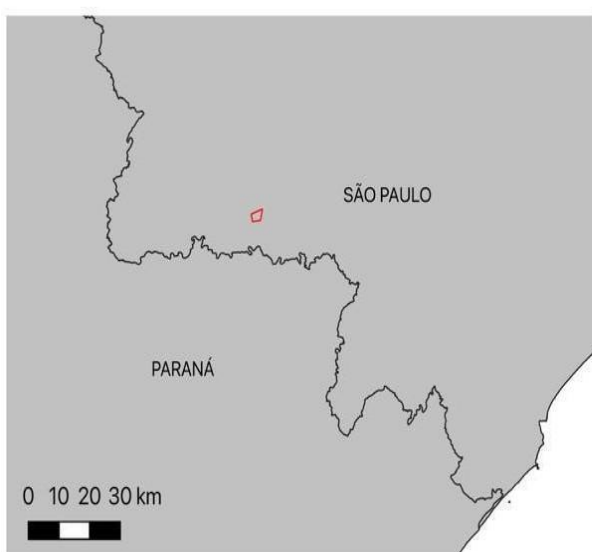
De acordo com Ross (1992), esse tipo de mapeamento deve apresentar os tipos de encostas contidas em cada forma de relevo e os setores nos quais se dividem, encontrando-se contidos no 5º táxon de sua classificação para a taxonomia do relevo. Essa divisão é importante, pois cada setor apresenta características geométricas diferentes, e os mapas provenientes dessa classificação devem ser elaborados em escalas grandes, maiores do que 1:25.000 (ROSS, 1992). Através da adoção da classificação proposta por Ross torna-se possível fazer a distinção da geometria presente nos setores das encostas, possibilitando a observação das rupturas de declive presentes em cada uma das encostas presentes na área de estudo deste trabalho.

Para a elaboração do mapeamento geomorfológico de detalhe foi necessário a utilização de técnicas que permitissem identificar as feições do relevo, sendo necessário buscar meios que unissem a tecnologia oferecida pelos Sistemas de Informação Geográficos com os resultados obtidos através da fotointerpretação. A fotointerpretação consiste na interpretação da paisagem através da correlação entre a realidade e a fotografia aérea ou imagem de satélite, permitindo a análise e identificação de objetos através de elementos reconhecíveis, como texturas, cores, formatos, sombras, entre outros (SAMPAIO, 2007; NEPOMUCENO e LUCHIARI, 2014). Esses elementos permitem o reconhecimento de estradas, redes de drenagem, formas de encostas, entre outro

3. ÁREA DE ESTUDO: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GURUTUBA

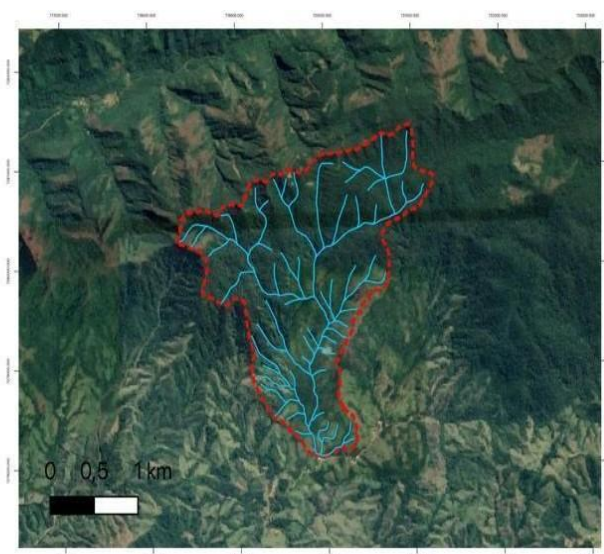
A área de estudo engloba as encostas da bacia do rio Gurutuba (**Figura 6**) localizada no município de Itaoca (SP), que foram atingidas por diversos tipos de movimentos de massa durante as fortes chuvas do verão de 2014 (BROLLO *et al.*, 2015; BONINI *et al.*, 2017). O rio Gurutuba é afluente do rio Palmital, principal rio que banha o município de Itaoca, e está contemplado pela Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 11 – Ribeira de Iguape. (BROLLO *et al.*, 2015).

O município de Itaoca possui área de 183.015 km² e população de 3.330 habitantes, segundo estimativa para o ano de 2020 (IBGE, 2021). Está inserido na bacia hidrográfica do rio Ribeira do Iguape, em um contexto geomorfológico do Cinturão Orogênico do Atlântico, predominando relevos ondulados e montanhosos, que apresentam declividades que variam entre 20% e mais de 35% (CAROU *et al.*, 2017) com topos aguçados e convexos. As amplitudes variam entre 100 e 300m, podendo ser superior (BROLLO *et al.*, 2015; SILVA, 2017.).



Legenda

- Drenagem
- Localização da área de estudo
- Limites da bacia hidrográfica



Projeção UTM
Datum WGS 1984 Fuso 22S



Figura 6: Localização da Bacia Hidrográfica do rio Gurutuba, em Itaoca, no Estado de São Paulo. Org.: Da autora (2021).¹

A área está localizada no Supergrupo Açungui, Grupo Lajeado, sendo que 80% da área do município é composta pelo granito Itaoca, 10% de rochas metassedimentares da Fm. Serra da Boa Vista e 10% de ardósia e filito da Formação Betari, além de apresentar hornfels e sedimentos aluvionares do Quaternário (BROLLO *et al.*, 2015). Apresenta uma litologia muito homogênea, de embasamento composto por rochas graníticas pouco fraturadas (MELLO e BETTENCOURT, 1998).

O maciço Itaoca é o embasamento da bacia do rio Gurutuba e está localizado na divisa dos Estados de São Paulo e Paraná, sendo uma intrusão de natureza granitoide. Dentre seus encaixantes, podem ser citados quartzitos, xistos e mármore, acomodando-se de forma discordante e parcialmente concordante (**Figura 7**). O granito Itaoca está localizado próximo das Zonas de Cisalhamento Ribeira e Figueira (MELLO e BETTENCOURT, 1998).

Distingue-se em características em comum que permitem agrupar as rochas do maciço em seis fácies mais corriqueiras (Cinza 1 e 2, Rósea 1, 2, 3, e 4), além de uma

¹ Foram sugeridas melhorias no design, entretanto, por questões técnicas, não puderam ser executadas.

fácies (Cinza 3) e uma associação de fácies (Rósea 5), que se diferenciam, pois são frutos de processos metassomáticos (MELLO e BETTENCOURT, 1998).

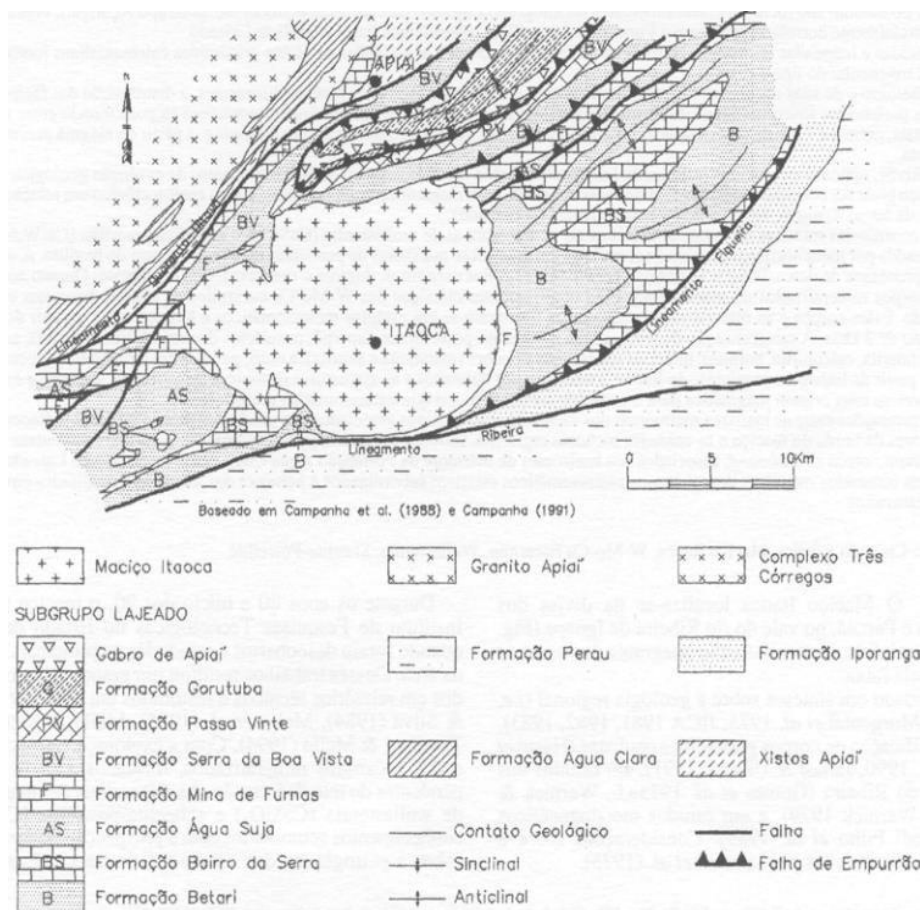


Figura 7: Mapa geológico de Itaoca. Fonte: Mello e Bettencourt (1998)

A cobertura pedológica da região é composta pelos argissolos vermelho-amarelo (Rossi, 2017, p. 93), mapeado em escala 1:250.000. Entretanto, é inexistente um mapeamento mais detalhado para a região.

Nos setores côncavos das encostas, pode-se observar um manto de alteração argilo-síltico-arenoso espesso, com pedogênese inicial, apresentando alta suscetibilidade a erosão e escorregamentos (BROLLO *et al.*, 2015). Coelho (2020) e Coelho *et al* (2021), em estudos sobre os perfis de alteração nas bacias do rio Gurutuba e do córrego Guarda Mão, delimitaram a existência de três camadas de solo que apresentaram descontinuidades hidráulicas e texturais entre elas, que provavelmente favoreceram a instabilidade do perfil durante eventos de intensa precipitação. Essas camadas foram demarcadas a partir da análise do tamanho das

partículas e descrições dos solos, sendo elas: Solo residual (camada mais superficial), Saprólito II (intermediária) e Saprólito I (profunda) (COELHO *et al.*, 2021) (**Figura 8**).

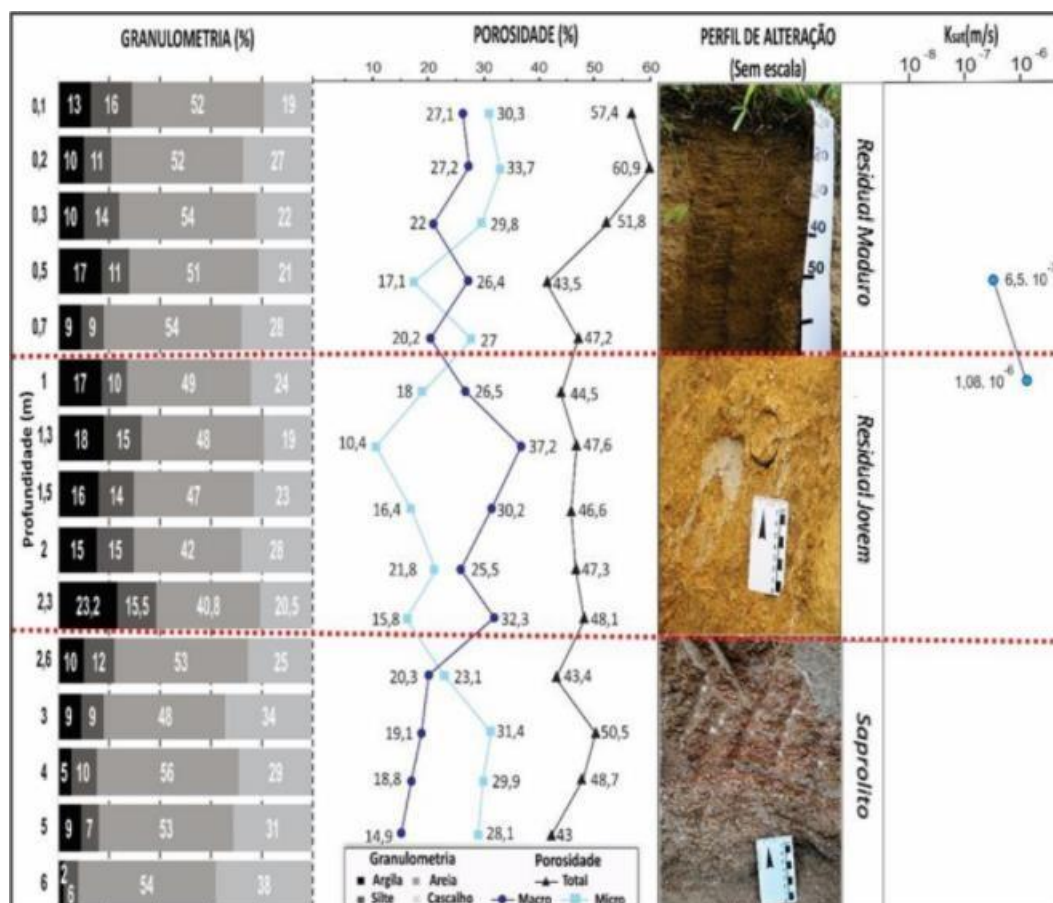


Figura 8: Perfil de alteração na bacia do rio Gurutuba. Nota-se a presença das características da rocha que deu origem ao solo na camada Saprólito. Fonte: Coelho (2020).

A camada Solo Residual apresentou aproximadamente 12% de argila e 53% de areia em sua composição, com existência de raízes e atividade biológica. Colorações mais escuras estão presentes nas porções mais superficiais da camada, provavelmente devido à presença de matéria orgânica (COELHO *et al.*, 2021). Para a camada Saprólito II, foram encontrados 18% de argila e aproximadamente 45% de areia, notando-se a ausência de estrutura definida devido à alta concentração de argilas (COELHO *et al.*, 2021). A camada Saprólito I foi localizada na base no perfil de alteração, apresentando somente 7% de argila, 53% de areia e 31,4% de cascalhos. Características relíquias da rocha mãe foram facilmente observadas nesta camada (COELHO *et al.*, 2021).

O clima do município é do tipo tropical com verão quente, sem estação seca de inverno e temperatura média do mês mais frio entre 18°C e -3°C, correspondente à classificação Cfa segundo a Classificação Climática de Koeppen. O índice pluviométrico para o ano de 2014 foi de 1.281,2mm, sendo que o mês de janeiro apresentou os maiores valores (**Figura 9**).

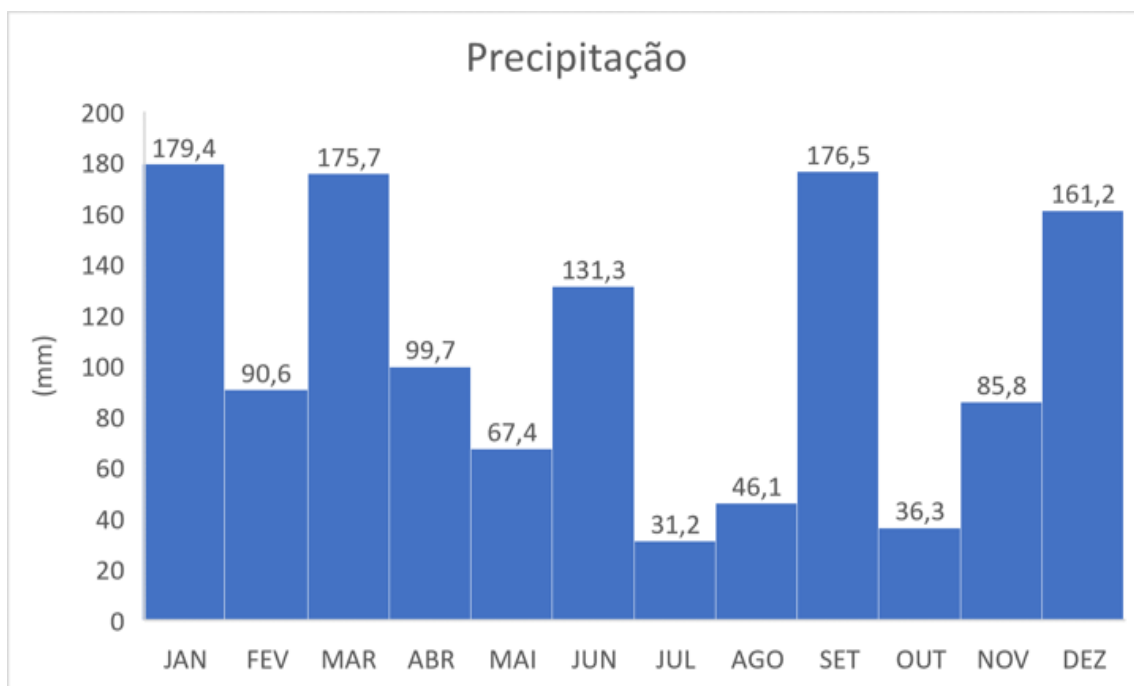


Figura 9: Precipitação durante o ano de 2014 para o município de Itaoca – SP. Fonte dos dados: CIIAGRO (2021). Org.: Autora (2021).

O município de Itaóca passou por um total de cinco eventos críticos desde 1991, sendo que o evento de 2014 registrou 25 mortes e 3 desaparecimentos (BROLLO *et al.*, 2015). A ocorrência teve início com uma inunda  o súbita, fruto das grandes precipitações que ocorreram nas cabeceiras dos rios, acumulando 150mm de chuva em um período de 6 horas (BROLLO *et al.*, 2015). A associa  o entre a alta pluviosidade em um curto espaço de tempo e os escorregamentos deflagrados nas encostas gerou processos de enxurradas e corrida de detritos com alto potencial de destrui  o, transportando materiais como sedimentos, blocos rochosos, entulhos, árvores e outros tipos de vegeta  o (**Figura 10**) (BROLLO *et al.*, 2015). Houve, então, transbordamento e inunda  o dos rios, causando, em alguns casos, altera  o do

curso de seus cursos, provocado pelo assoreamento e entulhamento do fluxo de água (BROLLO *et al.*, 2015).

De acordo com Carou *et al.* (2017), a área ficou marcada com 336 cicatrizes de escorregamento provenientes de um único evento (**Figura 10**), que se localizam na margem esquerda do rio Gurutuba. As cicatrizes se encontram perto de canais intermitentes e perenes e possuem sua zona de passagem direcionadas a esses corpos d'água. Sua distribuição ao longo da bacia está associada aos parâmetros morfológicos das encostas, observando-se a maior concentração de cicatrizes nas porções alta e média da bacia. (CAROU *et al.*, 2017).

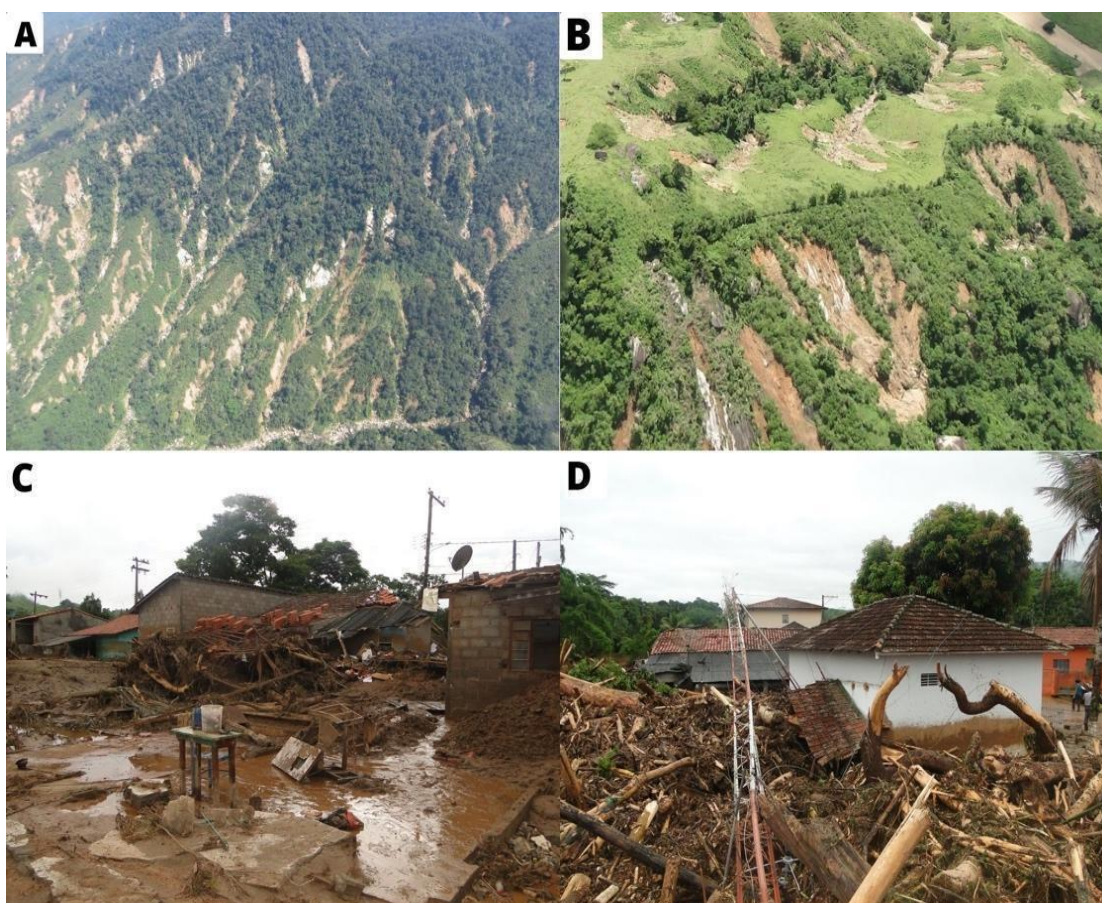


Figura 10: (A) Vista aérea das encostas da região de Itaoca após os escorregamentos. Nota-se as cicatrizes de escorregamento por toda a área compreendida pela imagem. (B) Foto aproximada de algumas das cicatrizes. (C; D) Fotos do município de Itaóca após as enxurradas. É possível notar a presença de entulho, troncos de árvores e até mesmo partes de edifícios misturados à lama. Fonte: Gramani (2014); Prefeitura Municipal de Itaoca (2014).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Avaliação das Rupturas de Declive (RD)

Para avaliar as rupturas de declive foi utilizado Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de $12,5\text{m}^2$ (**Figura 11**). O Modelo Digital de Elevação foi pré processado no software SAGA Gis (*System for Automated Geoscientific Analyses*) com o objetivo de melhorar alguns aspectos referentes ao modelado de relevo, utilizando o módulo *Fill Sinks*, desenvolvido com base no algoritmo de Wang e Liu (2006). Esse módulo permite preencher as depressões espúrias e gerar a derivação das principais bacias hidrográficas contidas no MDE.

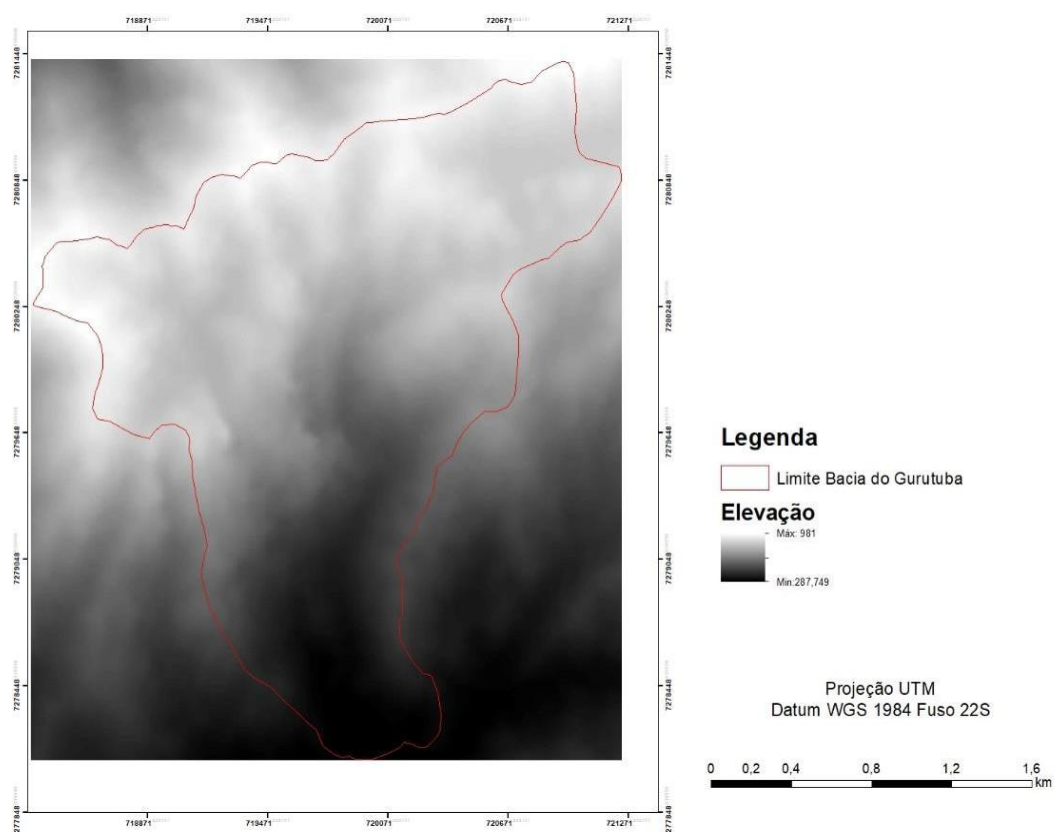


Figura 11: Modelo Digital de Elevação para a bacia do Gurutuba. Org: Da autora (2021).³

Na sequência foi feita a sobreposição da camada vetorial da bacia do rio Gurutuba para realizar o recorte da camada *raster* por meio do módulo *Clip Grid With Polygon*. Após o pré-processamento dos dados, o MDE recortado para a bacia do

² fornecido pelo grupo de pesquisas GPMorfo.

³ Foram sugeridas melhorias no design, entretanto, por questões técnicas, não puderam ser executadas.

Gurutuba foi exportado para arquivo GeoTIFF. Através do software ArcGIS, com o objetivo de obter uma visão ortogonal da área, foi aplicado o módulo *Hillshade (Spatial Analyst)* com ângulo azimute de 315° e altura de 90 metros. O mapa de ângulo da encosta foi gerado também a partir do MDE, utilizando a ferramenta *Slope (Spatial Analyst)*.

Foi utilizado, paralelamente a este recurso, imagens de satélites disponíveis através da ferramenta *World Imagery*, disponível no software ArcGis, com resolução de 0,5 metros de abril de 2016, fornecidos pela empresa Maxar.

Para aumentar a precisão do mapeamento, foram traçados perfis topográficos através da ferramenta *3D Analyst*, que produz um gráfico em perfil através da definição de um segmento (**Figura 12**). Esse procedimento permitiu a visualização dos perfis, revelando a natureza angular das mudanças na declividade das encostas, permitindo que fossem diferenciadas as mudanças e as rupturas de declive.

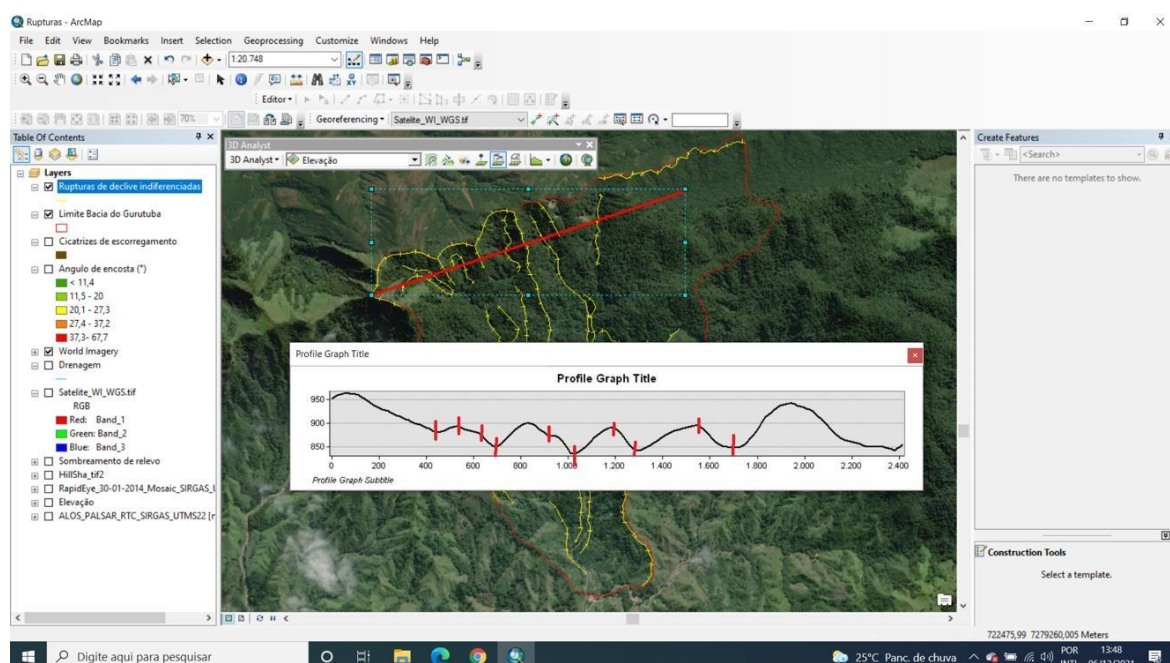


Figura 12: Ferramenta 3D Analyst. No módulo Interpolate Line cria-se uma linha em 3D ao interpolar as informações acerca da altura do modelado do relevo presente no arquivo raster. Posteriormente, através do módulo Profile Graph, é possível obter a visualização do perfil longitudinal. Os traços em vermelho ao longo do perfil delimitam as RD.

Considerou-se, para a classificação das formas em rupturas de declive, as ideias acerca dos táxons de Ross (1992), assim como o esquema proposto por

Savigear (1965), que considera que as rupturas de declive são mudanças abruptas entre superfícies com declividades diferentes.

Posteriormente, após a identificação das rupturas de declive a partir da interpretação das imagens de satélite e dos mapas produzidos, foi feita a conferência do mapeamento através do software *Google Earth*, que permite a visualização do terreno em 3D (**Figura 13**).

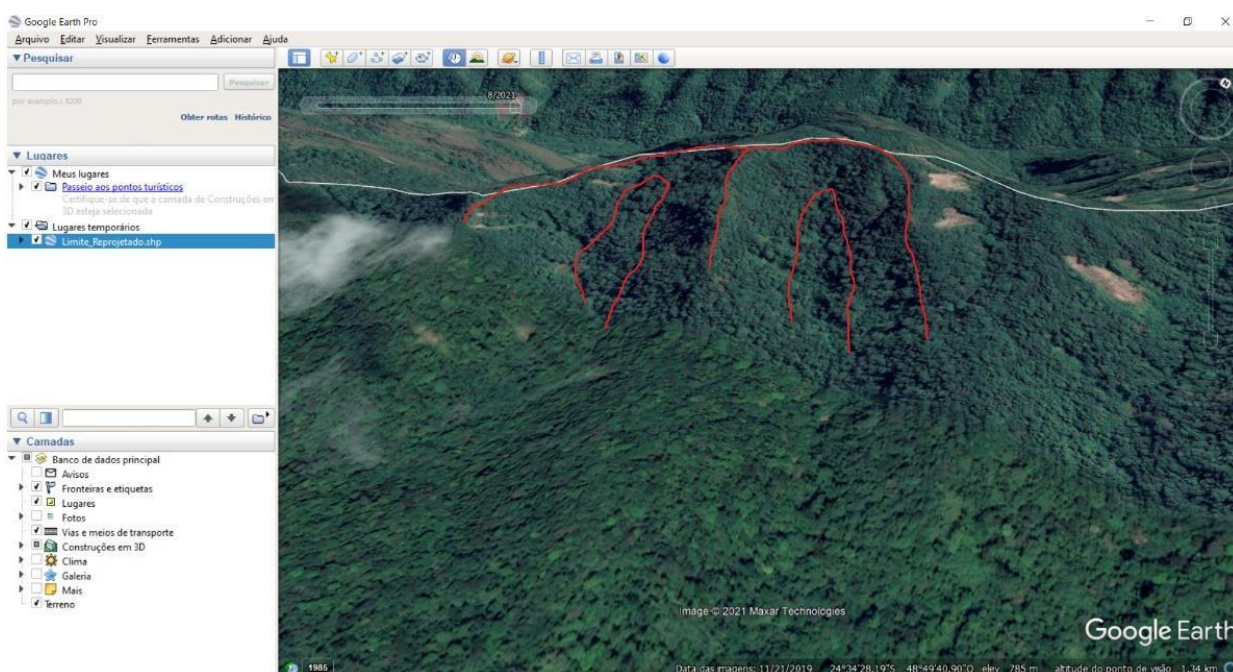


Figura 13: Imagens de satélite da bacia do Rio Gurutuba. A partir da disponibilidade de imagens possuindo relevo em 3D, foi possível realizar a conferência das rupturas de declive encontradas através dos mapas gerados a partir do MDE. Em vermelho, estão destacados o limite das rupturas.

4.2 Correlação entre RD e Escorregamentos

Neste item foi avaliada a correlação entre as RD e os escorregamentos deflagrados em 2014, mapeados por CAROU *et. al* (2017). O mapa de cicatrizes de escorregamentos (**Figura 14**) foi elaborado por meio da interpretação de imagens georreferenciadas presentes no software Google Earth Pro, tendo como critérios de identificação das feições estudadas a ausência de vegetação e a posição da encosta. Os autores mapearam 336 cicatrizes, diferenciando em sua análise as rupturas de deslizamento e o transporte e deposição do material mobilizado (CAROU *et al.*, 2017). As cicatrizes de escorregamentos podem ser diferenciadas de acordo com seus componentes, dividindo-se em três partes: a raiz (onde há a remoção do material),

corpo (local de passagem do material transportado) e a base (local de depósito do material removido) (SISTINI e FLORENZANO, 2004). Portanto, foi considerada como cicatriz do evento apenas o terço superior da feição, critério esse que foi respaldado em trabalhos feitos anteriormente na região da Serra do Mar no Estado de São Paulo (SISTINI e FLORENZANO, 2004; NERY e VIEIRA, 2010).

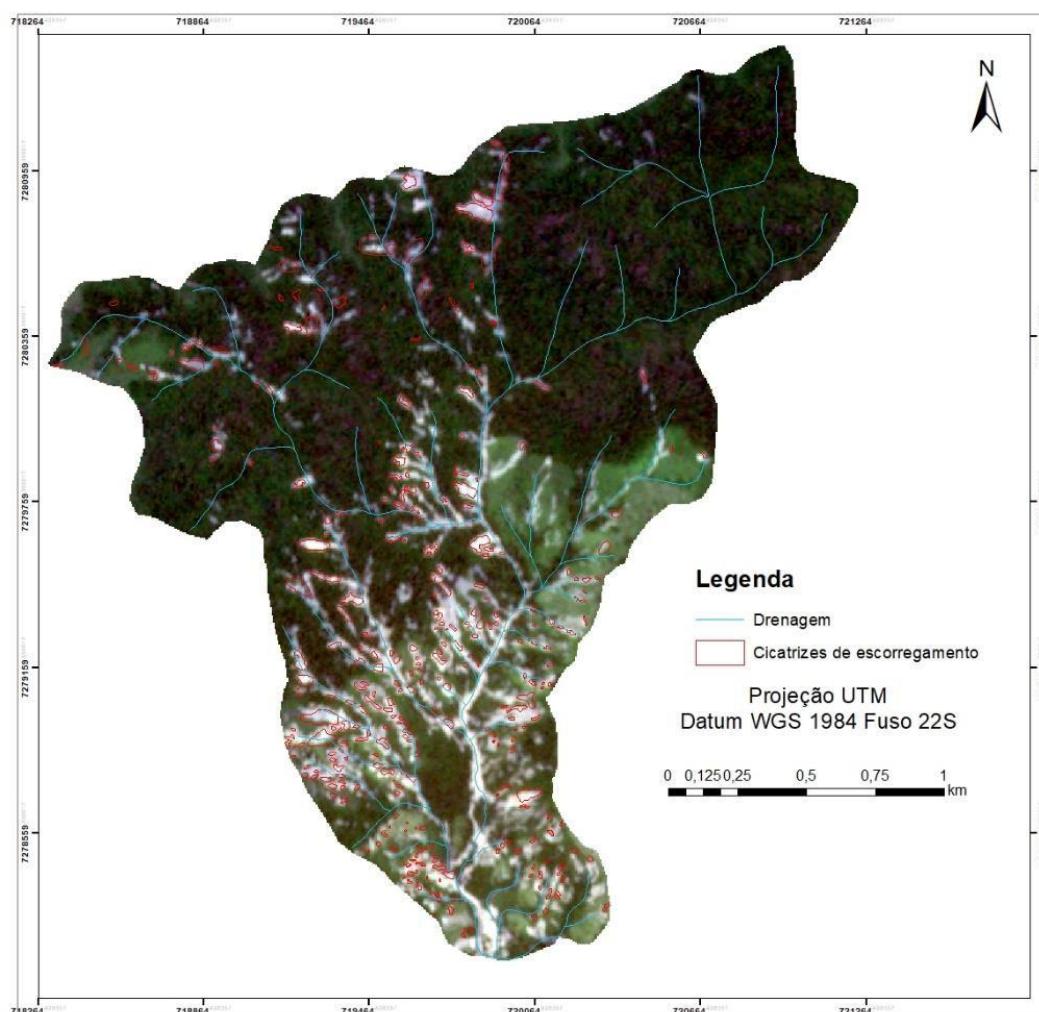


Figura 14: Mapa das cicatrizes de escorregamentos. Em cores claras, é possível identificar as cicatrizes dos eventos através das imagens RapidEye de 30/01/2014. O satélite RapidEye fornece imagens com melhores resoluções, tornando a identificação das cicatrizes mais precisas. Fonte dos dados: Carou et al (2017).⁴

⁴ Foram sugeridas melhorias no design, entretanto, por questões técnicas, não puderam ser efetuadas.

Para identificar quantitativamente a influência das rupturas de declive (RD) na distribuição dos escorregamentos foi utilizado o índice de Potencial de Escorregamentos (PE) (**Equação 2**), baseado no trabalho de GAO (1993).

$$PE = \frac{Ne}{N} \times 100 \text{ (Equação 2)}$$

Ne é o número de células de cada classe com cicatrizes de escorregamentos e N é o total de células da mesma classe.

Para o cálculo do Potencial de Escorregamentos (PE), os dados referentes às rupturas de declive e às cicatrizes de escorregamentos foram convertidos em *raster* por meio da ferramenta *Conversion Tools (Polygon to Raster)* e *(Polyline to Raster)*. Com as informações no formato *raster*, tornou-se possível utilizar a ferramenta *Raster Calculator*. A ferramenta gerou um mapa com feições que contém as intersecções entre as RD e as cicatrizes de escorregamentos, possibilitando a aplicação da Equação 2 (**Figura 15**).

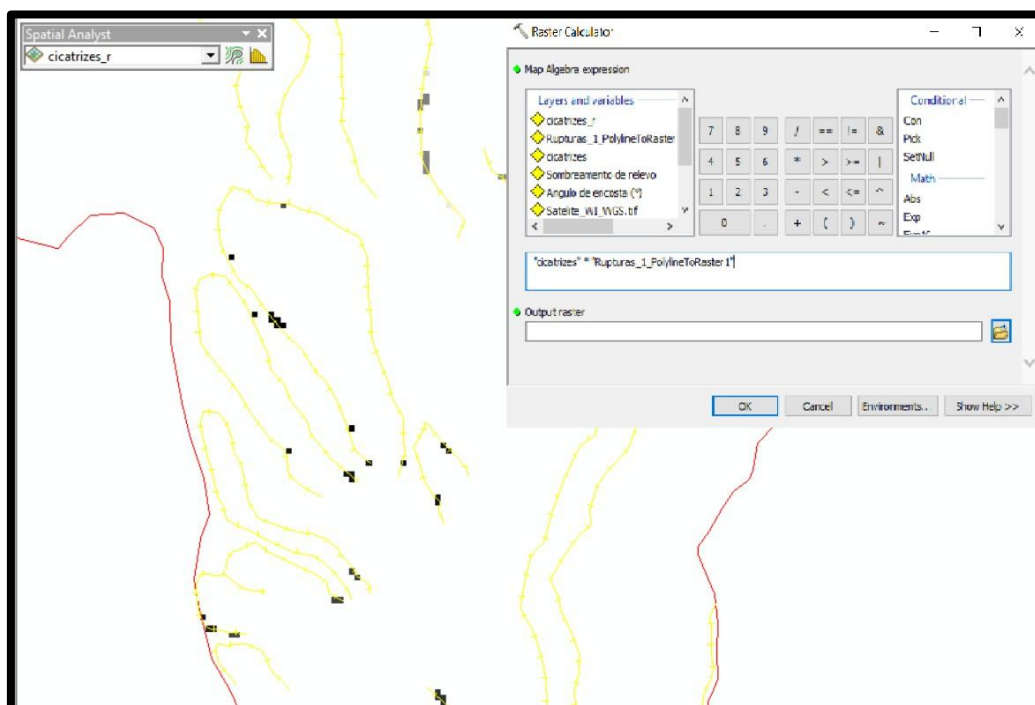


Figura 15: Exemplo de mapa gerado através da ferramenta Raster Calculator. O input na caixa de diálogo da ferramenta gerou uma informação referente à multiplicação das Cicatrizes de Escorregamento e das Rupturas de Declive, informando no mapa em quais partes as duas feições se cruzam.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Mapas de Ângulo da Encosta e Relevo Sombreado

O ângulo das encostas (**Figura 16**) variou entre valores menores que 11° e maiores que 67° , apresentando concentração de altos valores de declividade na área Oeste da bacia.

As cicatrizes dos escorregamentos se concentraram nas classes entre $27,4^\circ$ e $37,2^\circ$, valores estes que estão confirmados por outros estudos na bacia. Bonini (2017), utilizando um MDT de 10 metros, afirma que a maior concentração de cicatrizes se encontra nas classes entre 25° e 40° . Carou (2019) também utilizando um MDT de 10 metros aponta um intervalo bastante similar (entre 25° e 35°).

Os resultados aqui encontrados vão de acordo, também, com os valores encontrados para setores da Serra do Mar no município de Caraguatatuba, em São Paulo. Sestini e Florenzano (2004), utilizando dados extraídos de imagens TM Landsat, afirmam que as cicatrizes de escorregamentos são frequentemente originadas em seções das encostas que possuem mais de 20° de inclinação, assim como Dias (2017), utilizando um MDE de 25 metros para a bacia do Rio Santo Antonio, aponta que a suscetibilidade a escorregamentos é maior em encostas com inclinação maior que 30° .

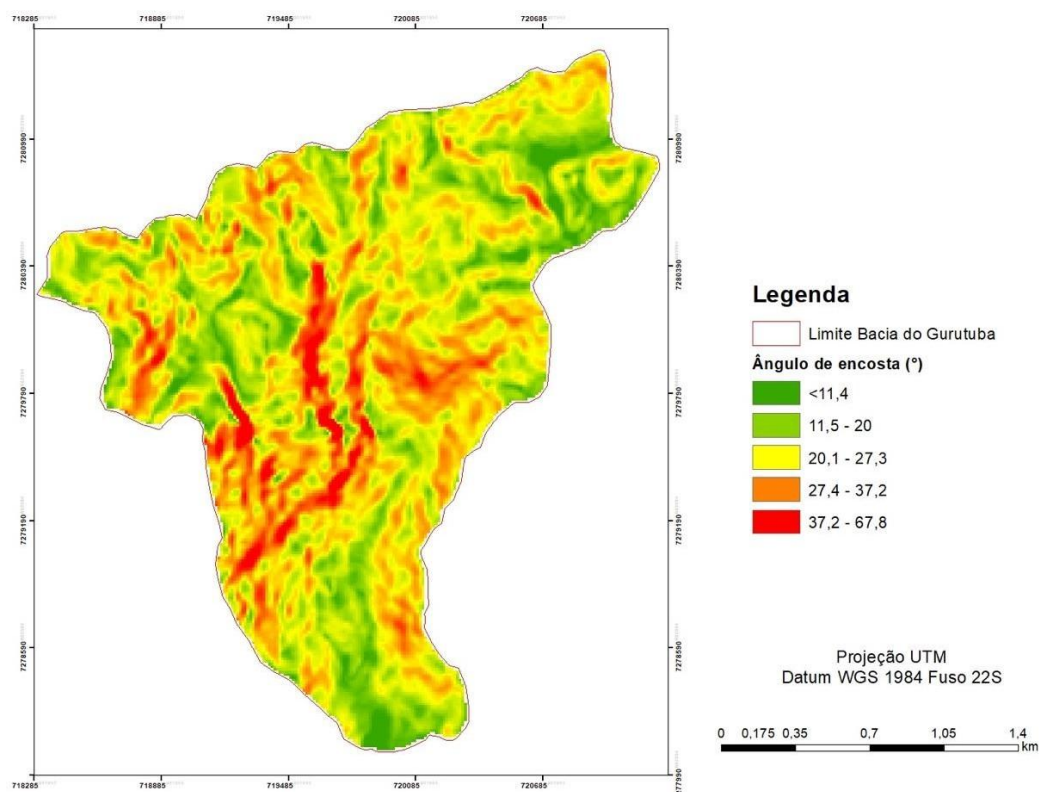


Figura 16: Mapa de ângulo de encosta para a bacia do rio Gurutuba, Itaoca (SP). Org.: Da autora (2021)⁵

Valores similares foram encontrados para a bacia do córrego Dantas, localizada na Região Serrana do Rio de Janeiro, no município de Nova Friburgo. Lemos (2019), utilizando MDE de resolução de 5m, afirma que as classes entre 20° e 35° concentram 66% de 324 cicatrizes de escorregamento contidas em sua área de estudo (**Tabela 2**).

O mapa de sombreamento de relevo (**Figura 17**) permitiu a visualização do modelado de relevo em forma tridimensional. É possível visualizar que esta área é composta por relevo montanhoso, controlado por feições arredondadas, com a presença de saliências em seus centros e topos aguçados, características do Domínio dos Mares de Morro. As áreas mais íngremes se encontram nas porções superiores da bacia, apresentando relevo mais suave conforme a área avança à jusante.

⁵ Foram sugeridas melhorias no design, entretanto, por questões técnicas, não puderam ser efetuadas.

Tabela 2: *Concentração de cicatrizes de escorregamentos nas classes de ângulo de encosta em áreas na Serra do Mar.*

AUTOR	ÁREA DE ESTUDO	MATERIAL UTILIZADO	CONCENTRAÇÃO DE CICATRIZES
Bonini (2017)	Gurutuba	MDE 10m	25° - 40°
Carou (2019)	Gurutuba	MDE 10m	25° - 35°
Sestini e Florenzano (2004)	Caraguatatuba	imagem TM Landsat	> 20°
Dias (2017)	Caraguatatuba	MDE 25m	> 30°
Lemos (2019)	Nova Friburgo	MDE 5m	20° - 35°

Org.: Autora (2021)

Carou (2019) define o relevo da baixa bacia do Rio Gurutuba como mamelonar, apresentando em algumas áreas o relevo de campo de matacões, onde rochas se encontram expostas. Para as partes média e superior da bacia, a autora define o relevo como dissecado, tornando-se mais íngreme no sentido montante, ao ponto de impedir o desenvolvimento de solos. Além disso, a bacia é caracterizada por seus vales entalhados e grande amplitude altimétrica (CAROU, 2019).

Essa análise do relevo se encontra respaldada nas características que compõem o relevo típico de Serra do Mar nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro. De acordo com Vieira e Gramani (2015), as características geomorfológicas dessas áreas incluem relevos fortemente dissecados com vales de fundos entalhados e encostas íngremes de cristas afiadas.

Características similares são observadas para a bacia do córrego Guarda Mão, localizado também no município de Itaoca – SP. O relevo do município é descrito como fortemente ondulado e montanhoso, de vales estreitos e profundos (SILVA, 2017).

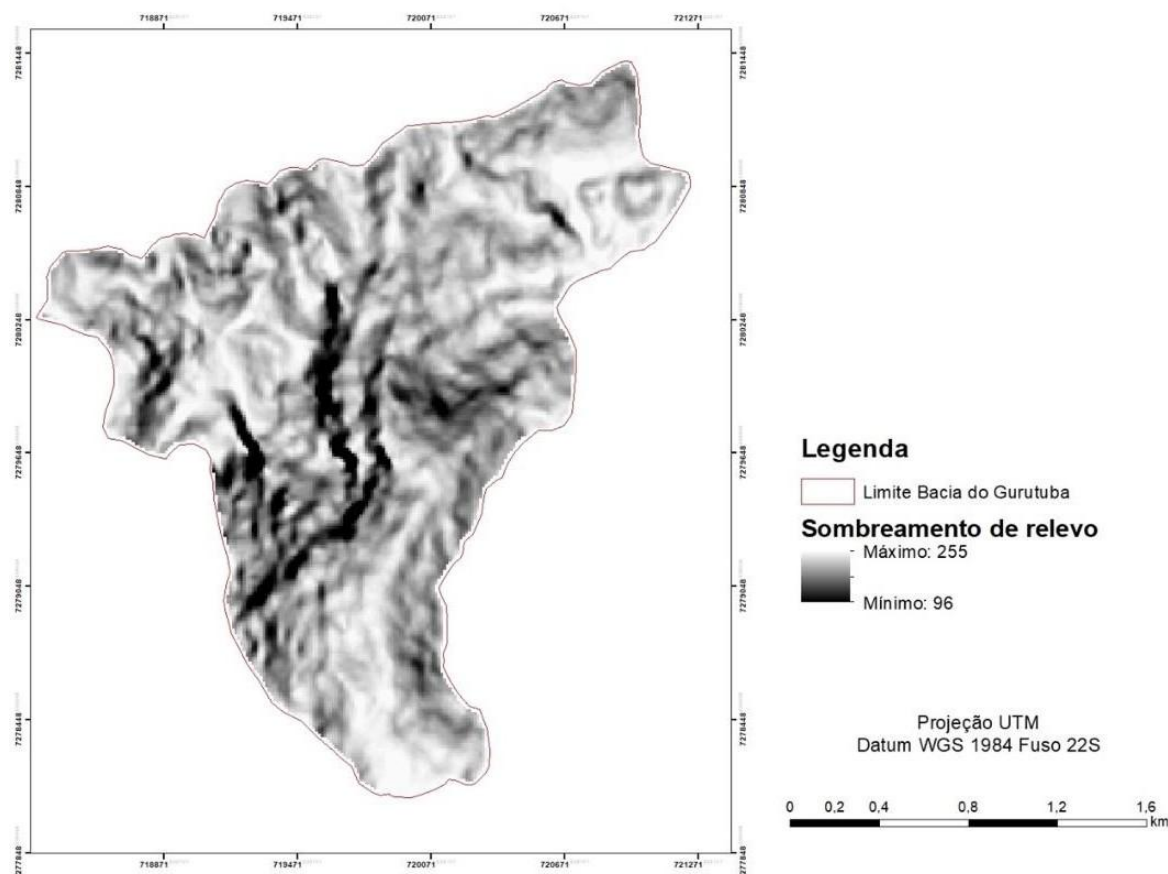


Figura 17: Mapa de sombreamento de relevo para a bacia do rio Gurutuba, Itaoca (SP).

Org.: Da autora (2021)⁶

5.2 Mapa de Rupturas de Declive (RD's)

O mapa das rupturas de declive (RD) revelou que essas feições básicas estão distribuídas de por praticamente toda a área estudada. Nas porções ao Norte da bacia, encontram-se os grandes divisores de água que, no desenvolvimento de seu modelado, apresentam grandes rupturas em seus topos, podendo apresentar rupturas nas bases das encostas também (**Figura 18**). Os setores mais a jusante da bacia apresentam menos rupturas de declive, pois seu modelado é mais suave, portanto, caracterizando-se como mudanças de declive.

A frequência de ocorrência de rupturas de declive foi de 3,9% das classes totais que compõem a bacia, sendo que se encontram mais concentradas nas áreas Norte, Oeste e Sul da bacia.

⁶ Foram sugeridas melhorias no design, entretanto, por questões técnicas, não puderam ser efetuadas.

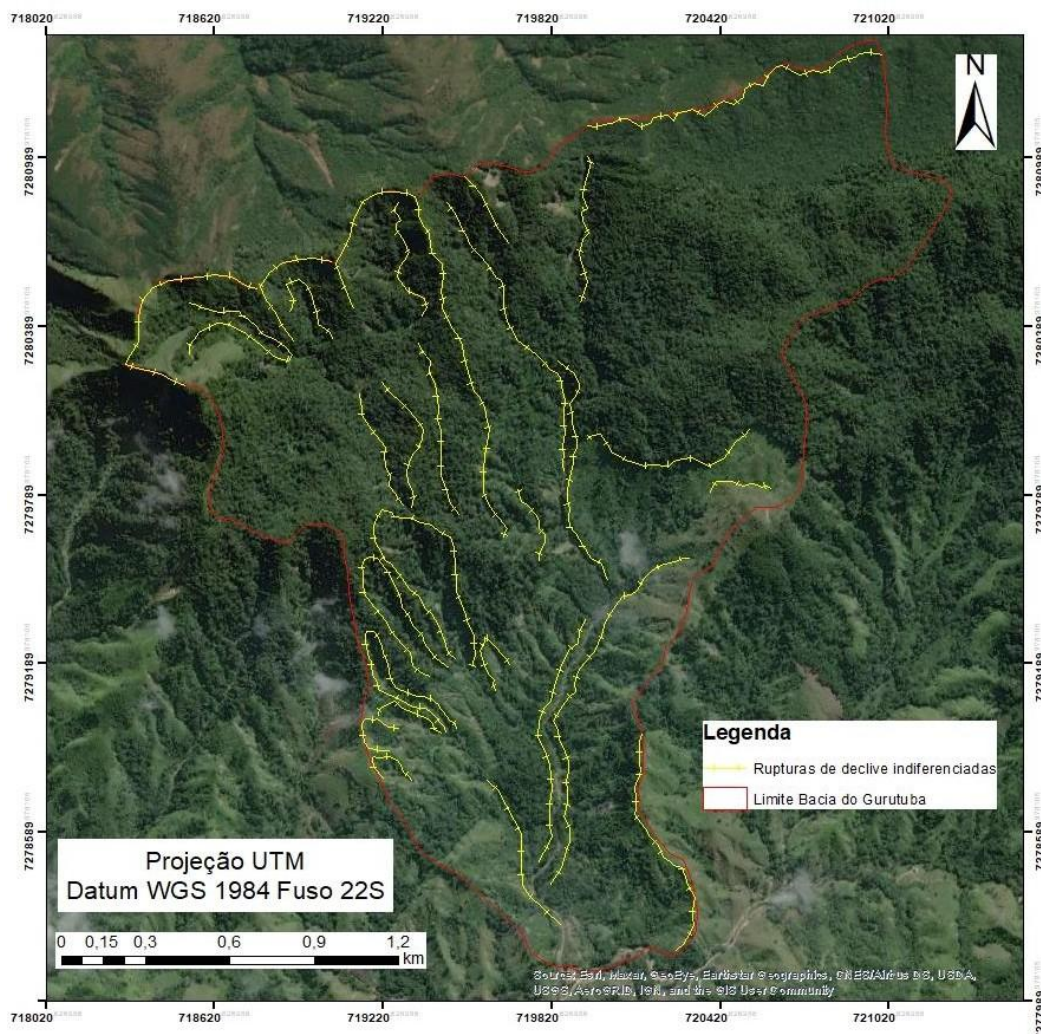


Figura 18: Mapa das rupturas de declive na bacia do Rio Gurutuba, Itaoca (SP). Org.: Da autora (2021).

Foi realizada uma tentativa de mapeamento das RD utilizando somente como ferramentas o mapa de relevo sombreado sobreposto ao de ângulo de encosta, porém os resultados não foram compatíveis com o modelado de relevo apresentado nas imagens de satélite (**Figura 19**).

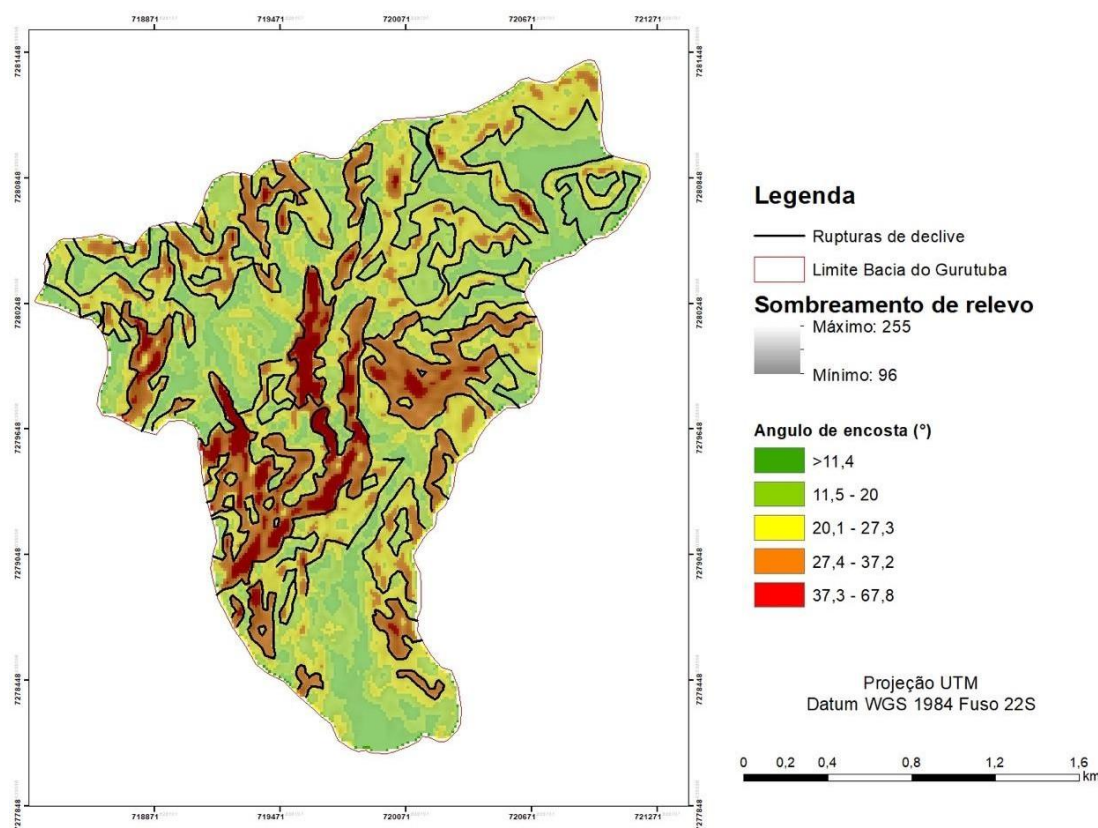


Figura 19: Mapeamento inicial das RD. Org.: Da autora (2021)⁷

A análise dos perfis longitudinais selecionados para a verificação da acurácia do mapeamento das RD evidenciou que estas feições aparecem de forma mais clara nos setores a montante da bacia, enquanto a porção a jusante apresenta relevo com abundância de mudanças suaves do ângulo (**Figura 20**).

⁷ Foram sugeridas melhorias no design, entretanto, por questões técnicas, não puderam ser efetuadas.

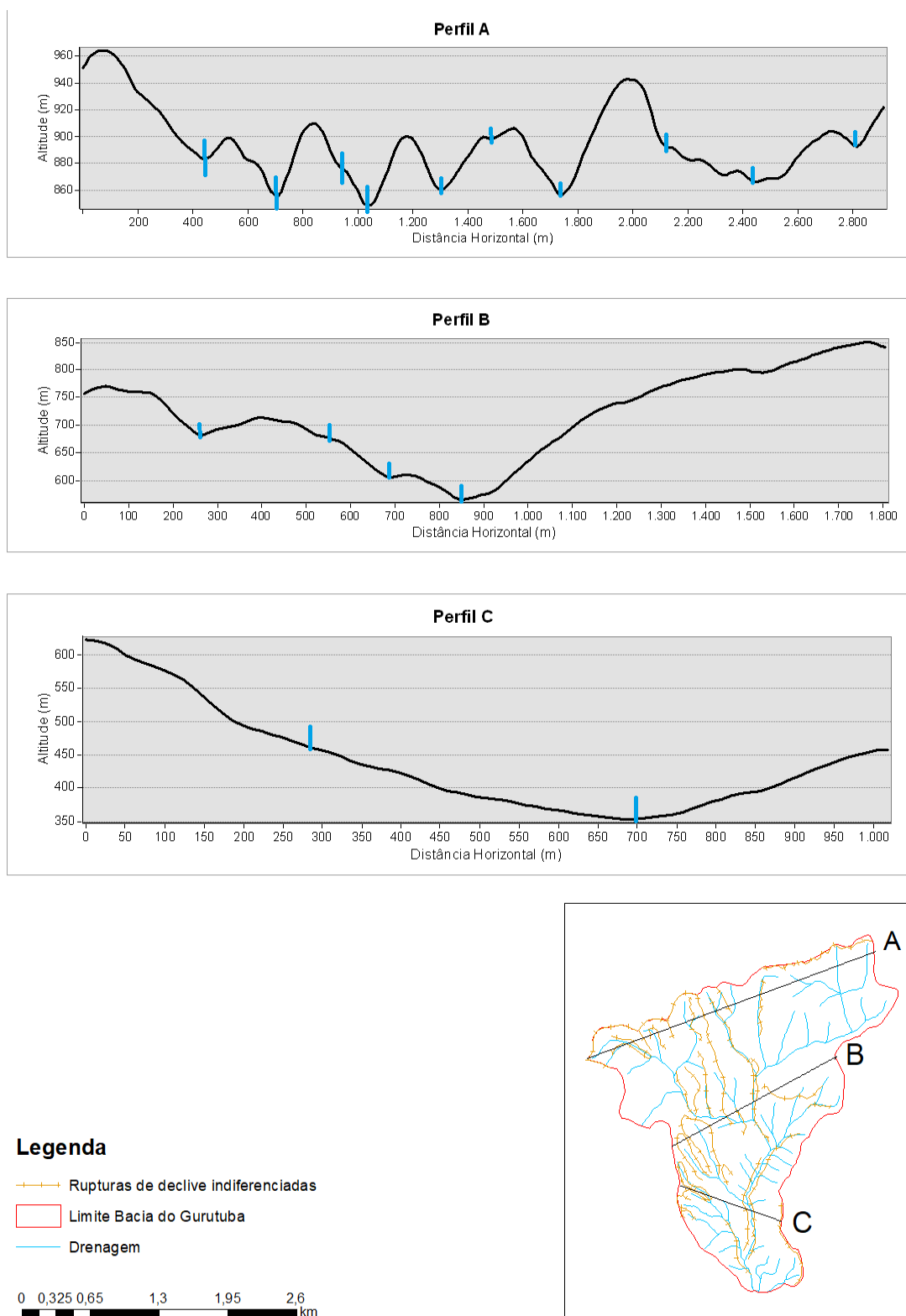


Figura 20: Perfis topográficos da bacia do Rio Gurutuba. Nota-se a grande diferença no modelado de relevo dos setores ao norte da bacia, apresentando encostas mais íngremes. Org.: Da autora (2021)

5.3 Correlação entre RD e Escorregamentos

A distribuição das cicatrizes de escorregamentos expõe baixa ocorrência de feições nas áreas Noroeste e Norte da bacia, concentrando-se mais nas áreas de média e baixa bacia (**Figura 21**) (CAROU *et. al*, 2017). As feições são de características alongadas e arredondadas, de grandes proporções, possuindo áreas que vão de 5548 m² até 13m², e ocorrem nas proximidades de canais intermitentes ou perenes (CAROU *et. al*, 2017). Foram encontradas 24 cicatrizes com áreas acima de 900 m² (CAROU *et. al*, 2017).

Bonini (2017) aponta que a maior concentração das cicatrizes se encontra em setores da bacia que possuem elevações entre 450 e 550m, assim como orientação Leste e Sudeste. Em relação ao ângulo de encosta, o autor afirma que a concentração das cicatrizes aumenta na classe que compreende os ângulos entre 30° e 35°.

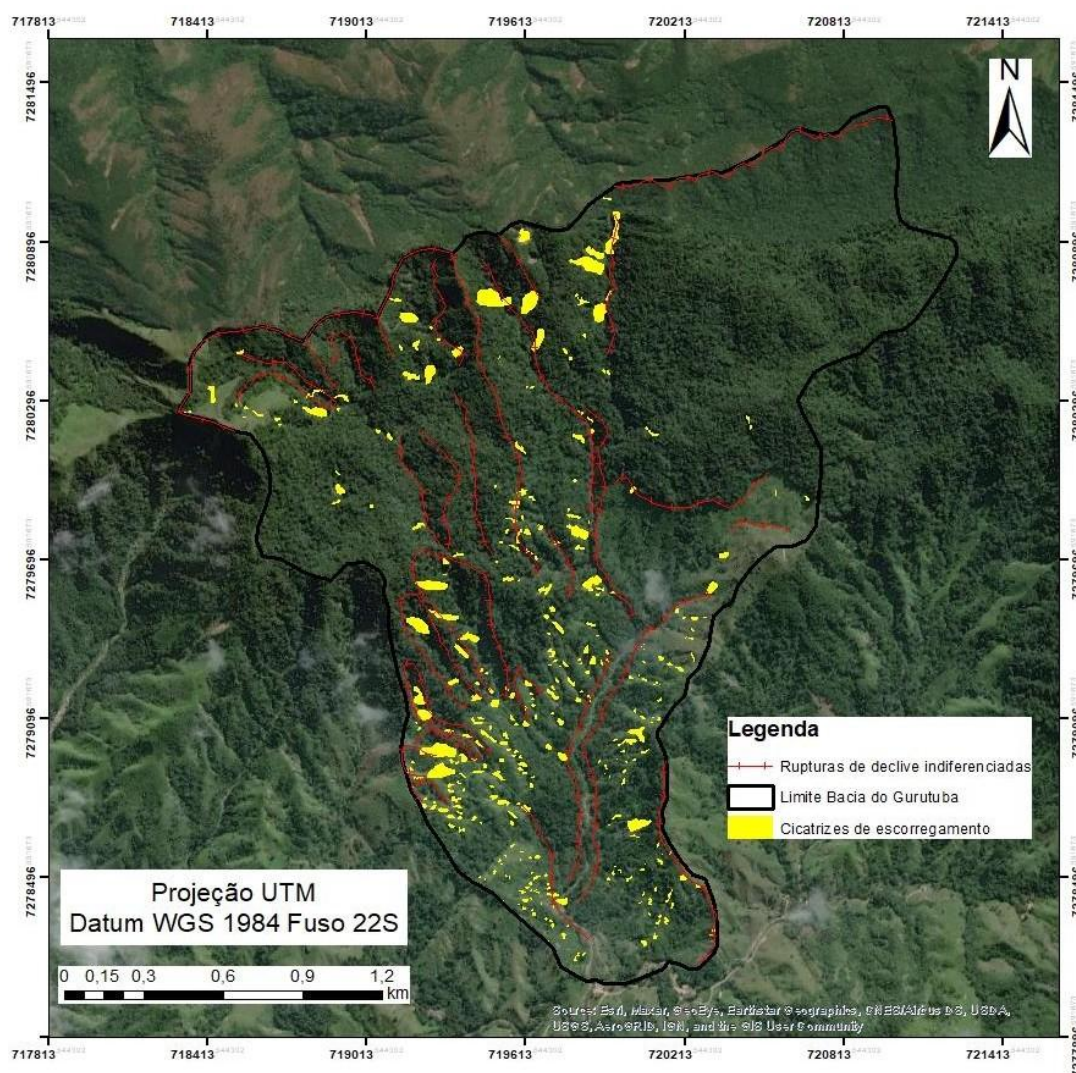


Figura 21: Mapa das cicatrizes de escorregamento e das RD. Org.: Da autora (2021).⁸

⁸ Foram sugeridas melhorias no design, entretanto, por questões técnicas, não puderam ser efetuadas.

Fazendo a observação do mapa das cicatrizes de escorregamento em comparação com as RD (**Figura 21**), é possível notar que as ocorrências dessas duas feições estão, em sua grande maioria, contidas nas mesmas encostas.

A aplicação do índice PE (potencial de escorregamentos) revelou que o número de células da bacia afetadas pelas cicatrizes de escorregamento foi 1586, de um total de 61991. Ao aplicar a **Equação 2**, obtemos o seguinte resultado (**Equação 3**):

$$PE = \frac{1586}{61991} \times 100$$

$$PE = 2,55 \text{ (**Equação 3**)}$$

Ou seja, para a bacia do Rio Gurutuba foi encontrado um índice PE de 2,55%. Carou (2019) encontra valores parecidos para a mesma área de estudo, utilizando um MDT de 10 metros. A autora afirma que a área total da bacia afetada pelas cicatrizes de deslizamento foi de 3,27%. O PE da bacia em relação a presença de RD's foi de 4,03 (**Equação 4**)

$$PE = \frac{98}{2427} \times 100$$

$$PE = 4,03 \text{ (**Equação 4**)}$$

Tal resultado indicou que das 2427 células de Rupturas de Declive, em apenas 98 delas estão presentes também as cicatrizes de escorregamento, resultando em um índice PE de 4,03%. O baixo índice PE para a convergência das duas feições nos revela que não há, necessariamente, uma relação de controle entre as rupturas de declive sobre a deflagração dos escorregamentos nas encostas da bacia do Rio Gurutuba.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo acerca das rupturas de declive na bacia do Rio Gurutuba mostrou-se ser um importante passo na compreensão dos movimentos de massa. Entretanto, a análise quantitativa do controle das RD sob a ocorrência dos escorregamentos retornou resultados que indicaram que não há, necessariamente, relação entre os dois elementos.

Através da análise de imagens de satélite e da interpretação de diversos dados acerca da elevação da área foi possível delimitar e mapear as rupturas de declive. Os resultados indicaram para a distribuição destas feições nas áreas Norte, Oeste e Sul da bacia, ocorrendo de forma muito discreta na parte Nordeste. Em comparação com a ocorrência das cicatrizes de escorregamento, foi constatado que de 2427 células de rupturas de declive, somente em 98 delas estão presentes as feições mapeadas para as cicatrizes de escorregamento, apresentando um índice PE de 4,03%.

Com a finalização deste trabalho e a obtenção de seus resultados, espera-se contribuir para a compreensão acerca dos mecanismos de desencadeamento dos movimentos de massa e suas relações com condicionantes morfológicos, tal qual a geometria das encostas. Este trabalho pode contribuir para o mapeamento geomorfológico de detalhe da bacia do rio Gurutuba, assim como na disponibilidade de dados referentes à caracterização geral da área.

Entretanto, os estudos acerca das unidades básicas do relevo para a bacia do Rio Gurutuba ainda são ínfimos, havendo a necessidade de lançar um olhar acerca de muitas características presentes no modelado desta bacia, para compreender como estes se relacionam com as feições deixadas por acontecimentos como o de janeiro de 2014.

Em síntese, recomenda-se que seja elaborada o mapeamento geomorfológico de detalhe da bacia, salientando a utilização de outras ferramentas além do mapa de ângulo de encosta e sombreamento de relevo, e feita uma investigação mais profunda acerca de suas unidades básicas, a fim de obter uma visão cada vez mais clara dos mecanismos envolvidos nos movimentos de massa, assim como para a contribuição na mitigação e previsão de eventos deste tipo.

BIBLIOGRAFIA

- ALHEIROS, M. M. (2010). **Landslides and Coastal Erosion Hazards in Brazil.** *International Geology Review*, pp. 756-763.
- BONINI, J. E. (2017). **Análise comparativa da capacidade preditiva entre dois modelos matemáticos para avaliação de suscetibilidade à escorregamentos rasos: Um estudo de caso em Itaóca (Vale do Ribeira, SP) [Dissertação].** São Paulo: Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.
- BROLLO, M., SANTORO, J., PENTEADO, D., SILVA, P., & RIBEIRO, R. (2015). **Itaoca (SP): Histórico de Acidentes e Desastres Relacionados a Perigos Geológicos.** *Geosudeste 2015*, (pp. 3-6). Campos do Jordão.
- CAROU, C. B. (2019). **Mineralogia do Granito Itaocá e sua relação com a suscetibilidade a escorregamentos rasos da bacia do Rio Gurutuba.** São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.8.2019.tde-11122019-171423>
- CAROU, C. B., VIEIRA, B. C., MARTINS, T., & GRAMANI, M. F. (2017). **Inventário dos Escorregamentos da Bacia do Rio Gurutuba, Vale do Ribeira (SP).** *Revista do Departamento de Geografia*, pp. 173-174.
- CASSETI, V. (2005). **Cartografia Geomorfológica.** Em V. CASSETI, *Geomorfologia* (pp. 168-186).
- CHRISTOFOLETTI, A. (1974). **Processos morfogenéticos.** Em *Geomorfologia* (pp. 26-27). São Paulo: Edgard Blücher Ltda.
- COELHO, R. D. (2020). **Caracterização das Propriedades Físicas do Solo e a Instabilidade das Encostas na Serra do Mar (Itaóca - SP).** [Dissertação] São Paulo: Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo;
- COELHO, R. D., GOMES, M., GRAMANI, M., & VIEIRA, B. (2021). **Relationship between soil physical properties and landslides in Serra do Mar mountain range, Brazil.** *SCG-XII International Symposium On Landslides*.
- DAI, F., XU, C., YAO, X., XU, L., TU, X., & GONG, Q. (2011). **Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China.** *Jornal of Asian Earth Sciences*, pp. 883-895.

- DIAS, H. C. (2019). **Modelagem da suscetibilidade a escorregamentos rasos com base em análises estatísticas**. São Paulo.
- DIAS, H. C., DIAS, V. C., & VIEIRA, B. C. (2017). **Condicionantes Morfológicos e Geológicos dos Escorregamentos Rasos na Bacia do Rio Santo Antônio, Caraguatatuba/SP**. *Geography Department University of Sao Paulo, spe*, 157. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132714>
- DIAS Nery, T., & VIEIRA, B. C. (2010). *MAPEAMENTO DAS CICATRIZES DOS ESCORREGAMENTOS DE 1985 NA SERRA DO MAR (SP)*.
- FERNANDES, N. F., & AMARAL, C. P. (1995). **Movimentos de Massa: Uma Abordagem Geológico-Geomorfológica**. Em A. Guerra, & S. Cunha, *Geomorfologia e Meio Ambiente* (pp. 123-186). Bertrand Brasil.
- GAO, J. (1993). **Identification of topographic settings conducive to landsliding from dem in Nelson county, Virginia, U.S.A**. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18(7), 579–591. <https://doi.org/10.1002/esp.3290180702>
- GRAMANI, M. F. (2015). **A corrida de massa no Córrego Guarda-Mão, município de Itaóca (SP): impacto e observações de campo**. *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*, XV, p. 10p.
- GRAMANI, M. F. (2015). **Morfologia da Drenagem e dos Depósitos de Debris Flow em Itaoca, São Paulo**. *Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia Ambiental*, p. 10p.
- GUIDICINI, G., & NIEBLE, C. M. (1976). *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. Blucher.
- HIGHLAND, L., & BOBROWSKY, P. (2008). *O Manual de Deslizamento - Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular 1325.
- IBGE. (9 de Junho de 2021). *Cidades e Estados*. Fonte: IBGE: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/itaoca.html>
- ISTOÉ. (22 de Fevereiro de 2022). *Desde 1988, Brasil soma quase 4 mil mortes em deslizamentos*. Disponível em: <https://www.istoedinheiro.com.br/desde-1988-brasil-soma-quase-4-mil-mortes-em-deslizamentos/>
- LEMONS F. M. (2019). **Morfometria De Encostas E Revegetação Em Cicatrizes De**

Movimentos De Massa: Um Estudo De Caso Em Nova Friburgo /RJ.

- MATOS, L., FERREIRA, C., BATEIRA, C., & VIEIRA, B. (2018). **Avaliação das Construções Danificadas por Corridas de Detritos e Inundações Bruscas no Vale do Ribeira (SP) em 2014.** *Revista do Departamento de Geografia*, pp. 57-66.
- MELLO, I., & BETTENCOURT, J. (1998). **Geologia e Gênese das Mineralizações Associadas ao Maciço Itaoca, Vale do Ribeira, SP e PR.** *Revista Brasileira de Geociências*, pp. 269-284.
- NEPOMUCENO, P., & LUCHIARI, A. (2014). **Mapeamento Morfológico De Detalhe: Experiências Para A Integração Entre Técnicas De Fotointerpretação E Sistemas De Informações Geográficas No Município De Salesópolis-SP.** *Revista do Departamento de Geografia - USP*, pp. 198-220.
- NERY, T., & VIEIRA, B. (2011). **Caracterização dos Parâmetros Topográficos da Bacia da Ultrafértil: Subsídio Para a Avaliação dos Escorregamentos Rasos.** São Paulo.
- NETTO, A. L. C., SATO, A. M., DE SOUZA AVELAR, A., VIANNA, L. G. G., ARAÚJO, I. S., FERREIRA, D. L. C., LIMA, P. H., SILVA, A. P. A., & SILVA, R. P. (2013). **January 2011: The Extreme Landslide Disaster in Brazil.** In *Landslide Science and Practice* (pp. 377–384). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31319-6_51
- OLIVEIRA, R., ZAU, A., LIMA, D., SILVA, M., VIANNA, M., SODRE, D., & SAMPAIO, P. (1995). **Significado Ecológico da Orientação de Encostas no Maciço da Tijuca, Rio de Janeiro.** *Oecologia Brasiliensis*, pp. 523-541.
- PENTEADO, M. M. (1983). **Fundamentos de Geomorfologia.** Rio de Janeiro: IBGE.
- PRESS, F., SIEVER, R., GROTZINGER, J., & JORDAN, T. (2006). *Para entender a Terra.* Porto Alegre: Bookman.
- ROSS, J. L. (1992). **Os Fundamentos Teórico-Metodológicos: Uma Proposta Taxonômica.** Em *O Registro Cartográfico dos Fatos Geomórficos e a Questão da Taxonomia do Relevo* (pp. 17-32).
- ROSSI, M. (2017). **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado.** São Paulo: Instituto Florestal.
- SAMPAIO, E. (2007). **Noções Básicas de Detecção Remota, Fotogrametria e Foto- interpretação em Pedologia.** Évora: *Departamento de Geociências.*

- SAVIGEAR, R. A. (1965). **A Technique of Morphological Mapping**. pp. 514-525.
- SESTINI, M. F., & FLORENZANO, T. G. (2004). **Caracterização de Cicatrizes de Deslizamentos por Processamento de Dados TM Landsat em Caraguatatuba-SP**
- SIDLE, R., PEARCE, A., & O'LOUGHLIN, C. (1985). **Natural Factors Affecting Slope Stability**. Em *Hillslope Stability and Land Use* (pp. 31-72).
- SILVA, M. C. (2017). **Caracterização Geológica e Geotécnica do Debris Flow Na Bacia do Córrego Guarda Mão (Itaoca - SP) no Desastre de Janeiro/2014**. *Unicamp*, pp. 26-32.
- SUMMERFIELD, M. A. (2014). **Slope Processes and Forms**. Em M. A. SUMMERFIELD, *Global Geomorphology* (pp. 163-168). Edinburgh.
- TOMINAGA, L. K. (2009). **Escorregamentos**. Em L. Tominaga, J. Santoro, & R. Amaral, *Desastres Naturais: Conhecer Para Prevenir* (pp. 25-39). São Paulo: Instituto Geológico.
- VIEIRA, B. C., & GRAMANI, M. F. (2015). **Serra do Mar: The Most “Tormented” Relief in Brazil**. In *World Geomorphological Landscapes* (pp. 285–297). https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_26
- WANG, L., & 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 (2), (pp. 193–213). <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>