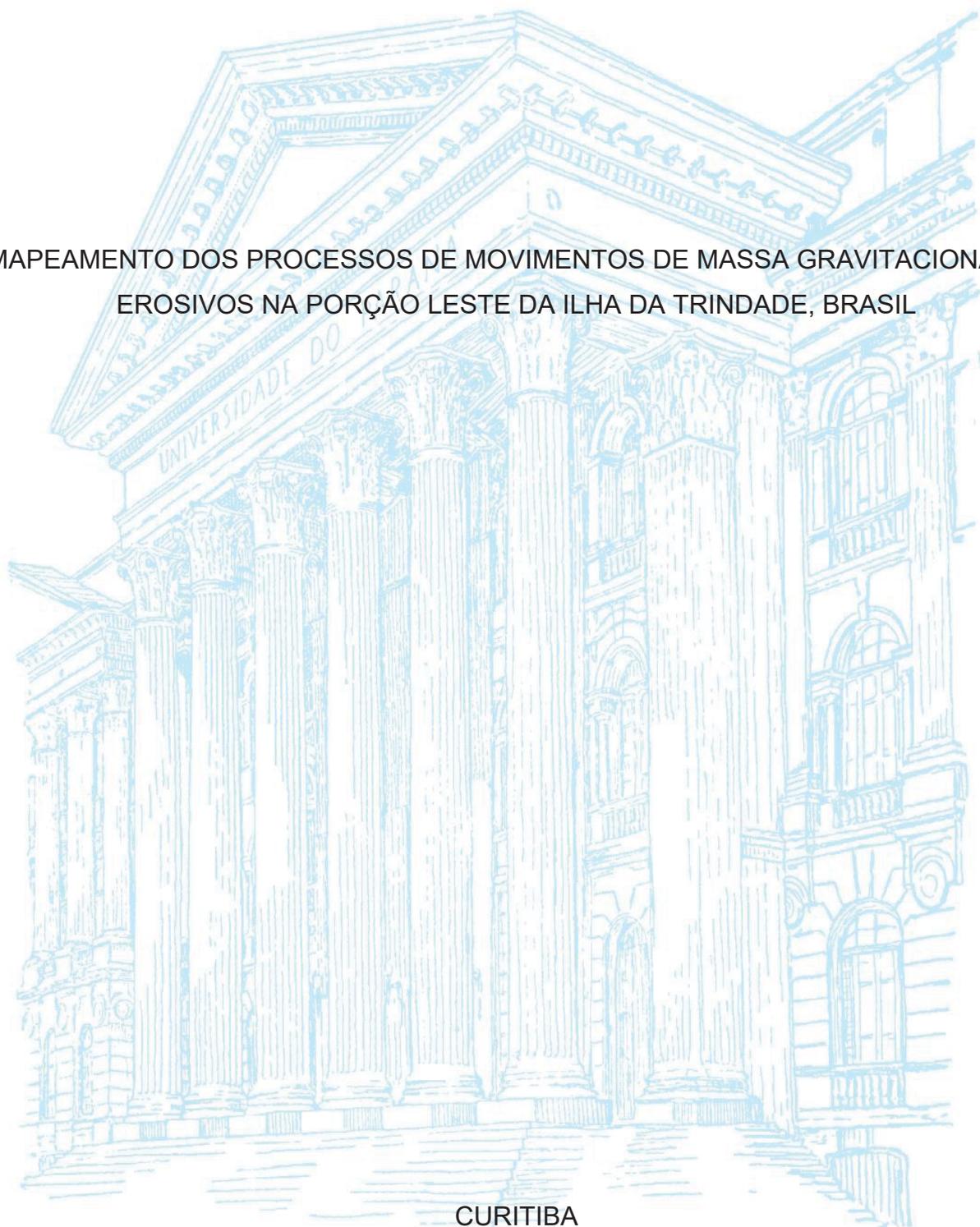


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FERNANDA AVELAR SANTOS

MAPEAMENTO DOS PROCESSOS DE MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS E
EROSIVOS NA PORÇÃO LESTE DA ILHA DA TRINDADE, BRASIL



CURITIBA
2023

FERNANDA AVELAR SANTOS

MAPEAMENTO DOS PROCESSOS DE MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS E
EROSIVOS NA PORÇÃO LESTE DA ILHA DA TRINDADE, BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná (UFPR), como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Cristina de Souza

Coorientadores: Prof. Dr. Lázaro Valentin
Zuquette

Prof. Dr. Rodolfo José Angulo

CURITIBA
2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Santos, Fernanda Avelar

Mapeamento dos processos de movimentos de massa gravitacionais e erosivos na porção leste da ilha da trindade, Brasil. / Fernanda Avelar Santos. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Cristina de Souza.

Coorientadores: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette; Prof. Dr. Rodolfo José Angulo.

1. Geologia ambiental. 2. Erosão. 3. Ilhas - vulcões. I. Souza, Maria Cristina de. II. Zuquette, Lázaro Valentin. III. Angulo, Rodolfo José. IV. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Geologia. V. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA -
40001016028P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **FERNANDA AVELAR SANTOS** intitulada: **MAPEAMENTO DOS PROCESSOS DE MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS E EROSIVOS NA PORÇÃO LESTE DA ILHA DA TRINDADE, BRASIL**, sob orientação da Profa. Dra. MARIA CRISTINA DE SOUZA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 29 de Março de 2023.

Assinatura Eletrônica
29/03/2023 15:09:22.0
MARIA CRISTINA DE SOUZA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
29/03/2023 14:40:19.0
MARTA LUZIA DE SOUZA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ)

Assinatura Eletrônica
29/03/2023 15:33:28.0
CLAUDIA MARISSE DOS SANTOS ROTTA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS)

Assinatura Eletrônica
30/03/2023 09:26:09.0
JOSE AUGUSTO DE LOLLO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE EST. PAULISTA JÚLIO DE
MESQUITA FILHO/ILHA SOLT)

Assinatura Eletrônica
16/05/2023 13:29:31.0
ADRIANA AHRENDT TALAMINI
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

A Ilha da Trindade, o paraíso.
Aos meus professores e professoras que me inspiram todos os dias.
A ciência do Brasil.

Agradecimentos

Agradeço ao Laboratório de Estudos Costeiros da Universidade Federal do Paraná (Lecost), especialmente à minha orientadora Maria Cristina de Souza, pela confiança, paciência e amizade. Ela me ensinou e inspirou a atuar na carreira acadêmica nos três pilares da universidade federal pública: ensino, pesquisa e extensão. Foi um privilégio e a realização de um sonho de vida. Agradeço ao meu coorientador, Rodolfo José Angulo, pela honra de conviver e crescer na minha vida acadêmica ao lado de um renomado cientista brasileiro, a quem admiro profundamente. Também agradeço à Cris e ao Angulo pela oportunidade de atuar como geóloga no projeto das ilhas oceânicas do Lecost. Foi através dessas longas e gratificantes expedições que aprendi a ser uma cientista de campo. Agradeço ao meu coorientador, Lázaro Valentine Zuquette, pela mentoria, disponibilidade e orientação fundamentais durante todo o desenvolvimento da minha tese. Sua contribuição foi inestimável para o meu crescimento acadêmico. Também gostaria de expressar minha gratidão à Adriana Ahrendt Talamini pela parceria e pelos valiosos *insights* fornecidos ao longo desta jornada. Sua colaboração foi extremamente significativa para o sucesso do trabalho.

Aos meus colegas Maurício Henrique Garcia, Herick Faust Daufenbach, Leonardo Barão, Luiz Sielski, Luiz Mota e à minha querida amiga Carolina Almeida Figueiredo, gostaria de expressar minha profunda gratidão por sua participação nas expedições de campo. Com muita parceria, vocês tornaram tudo divertido e geologicamente incrível. Foi um prazer conhecê-los e trabalhar com todos vocês. Também gostaria de agradecer a todos os colegas que participaram das expedições científicas para a Ilha da Trindade, incluindo as PROTRINDADE IV e V/2017, PROTRINDADE II e IV/2018, 77^a e 78^a expedições científicas do PROTRINDADE, PROTRINDADE V/2022 e VI/2022. Conquistar as 5840 milhas náuticas navegadas ao lado de cientistas brasileiros incríveis foi um privilégio. Um agradecimento especial à Maria Luiza Correa da Camara Rosa por dedicar seu tempo e energia nas expedições de campo de 2019 e 2022 para levantamentos do terreno com geotecnologias. Sua companhia fez uma diferença significativa nessas experiências transformadoras e singulares. Também agradeço a Yara de Mello por auxiliar nos levantamentos do terreno por meio de geotecnologias na expedição de 2022.

Ao Programa de Pós-graduação em Geologia, gostaria de expressar meu agradecimento especial ao Carlos Conforti Ferreira Guedes, que desempenhou um papel fundamental como coordenador. Sua dedicação em lutar por recursos e melhorias fez uma grande diferença para todos os estudantes envolvidos. Em nome de todos os discentes, agradeço por seu compromisso e esforços contínuos. Aos meus colegas da pós-graduação, especialmente aqueles do Lecost, como Augusto Simões Neto, Shaiely Fernandes dos Santos e Marcelo Bogo, gostaria de agradecer a convivência harmônica, agradável e pelas jornadas divertidas nos congressos da ABEQUA.

Agradeço à Marinha do Brasil por toda a infraestrutura, ensinamentos e parceria em campo. Sou grata a todos os oficiais e praças que viabilizaram a realização deste trabalho com segurança e bom humor. Também gostaria de expressar minha gratidão ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) e à Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM) pelo apoio logístico, financeiro e infraestrutura proporcionados. Agradeço ainda à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Por fim, agradeço aos meus pais por apoiarem as minhas escolhas e investirem na minha trajetória. Sou eternamente grata a vocês.

*“We cannot eliminate disasters, but we can mitigate the risk.
We can reduce damage. We can save more lives.”
Ban Ki-moon (United Nations, 2011)*

*“Environmental science is a way of managing our existence
so as to maximize human success while minimizing the negative aspects.
At the heart of environmental geology is the concept
of sustainable management – working with natural systems
to sustain development but not at an unacceptable environmental cost”
Doyle, P. (Encyclopedia of Geology, 2005)*

RESUMO

A Ilha da Trindade é um território brasileiro remoto e de difícil acesso, localizado no Atlântico Sul, a cerca de 1.140 km do setor sudeste da margem continental brasileira. O acesso à ilha é restrito a militares e pesquisadores, sendo realizado por navios da Marinha do Brasil. A Ilha da Trindade desempenha um papel estratégico no contexto das questões oceanopolíticas e é uma região de grande importância para a Amazônia Azul, justificando a presença de ocupação e operações de soberania no local. Com uma área emersa de 12 km², apresenta um relevo escarpado dominado por rochas vulcânicas alcalinas, como derrames de lava, corpos fonolíticos remanescentes e depósitos piroclásticos. A evolução da paisagem na ilha é influenciada pela geodinâmica destrutiva, resultando na formação de depósitos quaternários que cobrem grande parte do terreno. Nesse contexto, a ocupação atual na Ilha da Trindade está sujeita a processos geológicos exógenos, como erosão e movimentos de massa gravitacionais. No entanto, a avaliação do risco desses processos na ilha é desafiadora devido à heterogeneidade geológica, ao isolamento geográfico de difícil acesso e à falta de dados temporais e mapeamentos detalhados. O objetivo principal desta tese foi realizar um mapeamento geológico-geotécnico para compartimentar a área de estudo, concentrando-se nas condições propícias para ocorrência de movimentos de massa gravitacionais e processos erosivos. A área de estudo abrange as bacias hidrográficas localizadas na região leste da ilha, onde há ocupação permanente, edifícios e infraestrutura. Para atingir o objetivo proposto, foram conduzidas extensas campanhas de campo entre 2018 e 2022, utilizando técnicas de campo e geoprocessamento, visando o mapeamento e inventário dos processos erosivos e de movimentos gravitacionais. Realizaram-se descrições detalhadas do substrato rochoso, dos materiais inconsolidados e das feições resultantes dos processos exógenos, utilizando critérios geológico-geotécnicos. Para a caracterização do terreno, incluindo a geomorfologia, hidrografia e a obtenção de dados temporais da evolução das feições, foram empregadas geotecnologias, como a utilização de aeronaves remotamente pilotadas (*RPA*) e o sistema global de navegação por satélite (*GNSS*) em tempo real (*RTK*). Além disso, foram realizados ensaios de campo em parcela experimental e instalou-se um pluviógrafo digital (com resolução de 0,33 mm/s) para analisar a relação entre as chuvas e os processos superficiais. A área de estudo apresenta uma variação altimétrica de 425 metros, com declividades que variam de 0% a 75%. Isso resulta em um relevo fortemente ondulado, que abrange 34% da área total. As bacias hidrográficas possuem drenagens predominantemente efêmeras com sistemas de até a 4^a ordem. Também foram observados conjuntos de drenagens efêmeras e ramificadas relacionados à dinâmica dos leques aluviais. A área de estudo foi dividida em 23 unidades de terreno, incluindo zona costeira com infraestrutura, rios efêmeros e perenes, encostas com erosão linear, erosão interna, erosão intersulcos, formação de leques aluviais, encostas cobertas por depósitos de avalanche, quedas e tombamentos, encostas íngremes com rochas expostas, e estruturas vulcânicas como necks e domos. O substrato rochoso predominante é constituído por fonolitos e depósitos piroclásticos do Complexo Trindade, correspondendo a aproximadamente 40% da área, enquanto olivina-nefelinitos e depósitos piroclásticos da Formação Morro Vermelho compõem cerca de 60%. Os depósitos quaternários recobrem cerca de 44% da área, sendo que aproximadamente 56% da superfície é composta por rochas expostas. Foi constatado que a topografia da área de estudo está passando por uma intensa fase destrutiva, relacionada ao processo de erosão diferencial deflagrada principalmente pelo escoamento superficial de águas das chuvas, alta declividade do terreno e baixa densidade de vegetação. As chuvas episódicas, como ciclones e tempestades, têm um papel crucial nos processos destrutivos da ilha, deflagrando processos erosivos acelerados, movimentos de massa gravitacionais e danos

ambientais. Sua ocorrência deve ser monitorada ao analisar a degradação e evolução da região. Neste contexto, a ocupação e o patrimônio da Ilha da Trindade estão sujeitos a processos geológicos que representam perigos significativos de danos e perda de vidas. Os movimentos de massa gravitacionais acelerados pelos processos erosivos hídricos, particularmente desencadeados pelas chuvas episódicas, emergem como a maior ameaça. Além disso, a evolução da paisagem na ilha é uma combinação de processos naturais e da influência humana, com impactos expressivos desde a colonização inicial. Portanto, a Ilha da Trindade se enquadra em um contexto de processos quase-naturais. O trabalho pioneiro e de extrema importância realizado nesta tese destaca a necessidade de medidas de mitigação e proteção adequadas para garantir a segurança das áreas habitadas na Ilha da Trindade, devido aos perigos significativos representados pelos processos geológicos, como os movimentos de massa gravitacionais acelerados pelos processos erosivos hídricos, especialmente desencadeados pelas chuvas episódicas.

Palavras-chave: geologia ambiental; erosão linear; avalanche de rochas; perigos geológicos; ocupação; ilha vulcânica.

ABSTRACT

Trindade Island is an inhabited Brazilian territory. It is a remote and isolated island in the South Atlantic Ocean, approximately 1,140 km southeast of the Brazilian coast. Trindade Island plays a strategic role in the context of ocean political issues. It is a region of great importance to the Blue Amazon and justifies the presence of occupation and sovereignty operations on the island. The island presents a 12 km² emergent area with rugged terrain formed by alkaline volcanic rocks, such as lava flows, remaining phonolitic structures, and pyroclastic deposits. Also, destructive geodynamics influences the evolution of the landscape. These processes lead to the Quaternary deposits formation that encompass a significant portion of the land. In this context, the Trindade Island occupation has been exposed to exogenous geological processes, such as erosion and gravitational mass movement. However, assessing the risk of these processes on the island is challenging due to geological heterogeneity, difficult-to-access isolation, and the lack of temporal data and detailed mapping. This research aimed to conduct comprehensive geological-geotechnical mapping to target areas prone to gravitational mass movements and erosive processes. The study area encompasses the watersheds from the eastern region of the island, where there are permanent settlements, buildings, and infrastructure. Extensive field campaigns were conducted from 2018 to 2022, utilizing field techniques and geoprocessing methods. The primary focus was to map and document erosive processes and gravitational movements. We conducted detailed descriptions utilizing geological-geotechnical criteria to analyze the bedrock, unconsolidated materials, and features resulting from exogenous processes. We employed technologies to characterize the terrain, such as remotely piloted aircraft (RPA) and real-time kinematic (RTK) global navigation satellite systems (GNSS). These techniques involved assessing geomorphology and hydrography and gathering temporal data on the evolution of terrain features. We conducted field tests in an experimental plot and installed a digital pluviograph (with a resolution of 0.33 mm/s) to analyze the relationship between rainfall and surface processes. The study area exhibits an altimetric variation of 425 meters, with slopes ranging from 0% to 75%. This results in a highly undulating relief, covering 34% of the total area. The watersheds feature predominantly ephemeral streams with systems up to the 4th order. We observed sets of ephemeral and branching streams related to the dynamics of alluvial fans. We divided the study area into 23 land units, including the coastal zone with infrastructure, ephemeral and perennial rivers, linear erosion slopes, internal erosion, gully erosion, alluvial fan formation, slopes covered by avalanche deposits, cliffs, and toppled rocks, steep slopes with exposed rocks, and volcanic structures such as necks and domes. The dominant bedrock substrate is composed of phonolites and pyroclastic deposits from the Trindade Complex, which account for approximately 40% of the area, while olivine-nephelinites and pyroclastic deposits from the Morro Vermelho Formation make up around 60%. Quaternary deposits cover about 44% of the terrain, with exposed rocks comprising approximately 56% of the surface. We observed that the topography of the study area is undergoing an intense phase of destruction, primarily associated with differential erosion processes triggered by surface runoff from rainfall, high terrain slopes, and low vegetation density. Episodic rainfall events, such as cyclones and storms, play a crucial role in the destructive processes on the island, triggering accelerated erosive processes, gravitational mass movements, and environmental damage. Monitoring their occurrence is essential when assessing the degradation and evolution of the region. In this context, the occupation and heritage of Trindade Island are subject to geological processes that pose significant hazards to life and property. Accelerated gravitational mass movements, driven by water-induced erosive processes triggered by episodic rainfall events, emerge as the greatest threat. Additionally, the island's landscape evolution

encompasses natural processes and human influence, with significant impacts dating back to its initial colonization. Thus, Trindade Island exists within a context of quasi-natural processes. The pioneering and crucial research carried out in this thesis emphasizes the need for appropriate mitigation and protection measures to ensure the safety of inhabited areas on Trindade Island, given the significant hazards posed by geological processes such as accelerated gravitational mass movements driven by water-induced erosive processes triggered by episodic rainfall events.

Keywords: environmental geology; gully erosion; rock avalanche; geological hazards; occupation; volcanic island.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 – Contexto geral da área de investigação.....	2
Fig. 2 – A geologia ambiental caracteriza-se pela relação ampla entre as atividades humanas com o meio físico da Terra.....	5
Fig. 3 – Esquema das relações dos diferentes domínios ambientais que constituem o geoambiente e a expertise da geotecnia ambiental.....	6
Fig. 4 – Diversos mecanismos que interagem e contribuem para a evolução da paisagem nos vulcões de ilhas oceânicas	9
Fig. 5 – Diagrama sobre a abordagem multi-hazard em ilhas vulcânicas.....	10
Fig. 6 – Exemplos de erosão natural	12
Fig. 7 – Esquema que ilustra os diferentes agentes e tipos de áreas em que ocorrem processos erosivos	13
Fig. 8 – Feições lineares de processos erosivos em terreno de tufo vulcânico	16
Fig. 9 – Erosão linear em bacia hidrográfica em Turbolo (Itália).....	17
Fig. 10 – Processos erosivos associados a movimentos de massa gravitacionais, na ilha vulcânica Santorini, Grécia, na praia de Red Beach.....	19
Fig. 11 – Exemplos de quedas de blocos	21
Fig. 12 – Falésias que apresentam quedas de rocha em Santorini, Grécia, na praia de Red Beach.....	21
Fig. 13 – Mapa das áreas ativas e propensas à queda de rochas na região das Ilhas Canárias na Espanha	22
Fig. 14: Diferentes ambientes geológicos onde são observados blocos rochosos tombados	23
Fig. 15: Ilustração de uma ruptura durante o processo de tombamento flexural de rochas em encostas	23
Fig. 16: Exemplos de deslizamentos rotacionais	24
Fig. 17: Ilustração de deslizamento translacional em rocha no Mont Granier (França).....	25

Fig. 18: Modelos geométricos simplificados de deslizamentos de rochas desencadeados por terremotos na Itália Central entre 2016 e 2017	26
Fig. 19: Exemplo de deslizamento composto	27
Fig. 20: Exemplo de colapso de rocha em Preonzo, Suíça	28
Fig. 21: Exemplo de avalanche de detritos em Cortenova, Itália	29
Fig. 22: Espalhamento lento de blocos areníticos, resultante da deformação profunda de um substrato xistoso frágil.	30
Fig. 23: Vista da encosta após um episódio de avalanche de rocha na Ilha Martinica, região do Caribe, em 2018	31
Fig. 24: Padrões de fluxo em grãos secos em condições de velocidade reduzida	32
Fig. 25: Exemplos de avalanches de detritos	33
Fig. 26: Processo de deformação de encosta.....	34
Fig. 27: Evidências de campo dos principais indicadores geomorfológicos de deformação de encostas rochosas na região dos Alpes centrais na Itália	35
Fig. 28: Reconhecimento semiautomático de deslizamentos de terra rasos por meio de imagens ópticas de satélite, na região de Giampilieri (Messina, Itália).....	37
Fig. 29: Inventário de movimentos de massa gravitacionais em Monte Castello di Vibio (Umbria, Itália)	37
Fig. 30: Estudo comparativo de inventários de deslizamentos	38
Fig. 31: Exemplo de inventário levantado a fim de obter atributos para estudo posterior de suscetibilidade de erosão linear em Turbolo (Itália).....	39
Fig. 32: Esquema que resume os principais tipos de modelos, suas respectivas hierarquias e definições.....	41
Fig. 33: Modelo conceitual com enfoque na variação espacial dos elementos fundamentais	42
Fig. 34: Modelos conceituais focados na distribuição espacial dos elementos.....	43
Fig. 35: Modelo conceitual focado na evolução temporal dos elementos.....	43
Fig. 36: Relação entre a taxa de erosão e o tamanho das partículas.....	44
Fig. 37: Etapas envolvidas na abordagem do modelo observacional	45

Fig. 38: Modelo observacional 3D	46
Fig. 39: Modelo conceitual abordando a variação espacial dos elementos fundamentais na paisagem vulcânica da ilha grega de Santorini.....	48
Fig. 40: Modelo conceitual de evolução da bacia do Papenoo em Tahiti-Nui nos últimos 500 mil anos	48
Fig. 41: Modelo conceitual com foco nas condições hidrológicas da Ilha da Madeira, em Portugal	49
Fig. 42: Modelos conceituais hidrogeológicos de ilhas vulcânicas	50
Fig. 43: Pluviógrafo de leitura manual da Estação Meteorológica da Ilha da Trindade	56
Fig. 44: Procedimentos de instalação do pluviógrafo digital (resolução 0,33 mm) na área de estudo.....	56
Fig. 45: Detalhes da parcela experimental na Ilha da Trindade.....	58
Fig. 46: Registros durante e pós-eventos de chuvas, mostrando drenagens efêmeras ativas nas bacias hidrográficas da ocupação da Ilha da Trindade.....	59
Fig. 47: Análise dos dados de chuva obtidos através do pluviógrafo digital instalado na área de estudo.....	61
Fig. 48: Registros do pluviógrafo digital da distribuição da precipitação ao longo do dia 08 de maio de 2019.....	63
Fig. 49: Registros do pluviógrafo digital da distribuição da precipitação ao longo do dia 18 de maio de 2019.....	64
Fig. 50: Registros do pluviógrafo digital da distribuição da precipitação ao longo do dia 20 de maio de 2019.....	65
Fig. 51: Após os eventos de chuvas destrutivas nos dias 8 e 20 de maio de 2019, foram observados os seguintes processos e feições.....	66
Fig. 52: Background of the study site.....	69
Fig. 53: Geology of Trindade Island on scale 1:10.000.....	71
Fig. 54: Trindade Island landscape.....	72
Fig. 55: Climatic settings of Trindade Island.....	73
Fig. 56: Non-perennial drainages upstream of anthropogenic infrastructure).....	73

Fig. 57: General workflow of the primary steps of the research.	75
Fig. 58: Morphometric parameters of the study area.	76
Fig. 59: Study area settings	77
Fig. 60: Landforms mapping of the occupied watershed basins of Trindade Island.....	78
Fig. 61: Main features of inventory that occur at Morro Vermelho Formation	82
Fig. 62: Remaining isolated volcanic hills and associated deposits of Trindade Complex.	84
Fig. 63: Talus slope facing anthropogenic infrastructure	85
Fig. 64: Hillsides facing occupation and Portugueses beach.....	86
Fig. 65: Perennial river which supplies the Trindade Island's occupation.	87
Fig. 66: Slopes facing Portugueses beach.....	88
Fig. 67: Steeply Hillside, from Complex Trindade, facing Portugueses beach.....	89
Fig. 68: Units located at the eastern boundary of the study.	90
Fig. 69: Location of the study site.	95
Fig. 70: The study area indicating occupation downstream, MVF outcropping with the prevalence of linear erosive features, and outflow of the erosive valley.	96
Fig. 71: Pre-existing topographic data	97
Fig. 72: RTK-GNSS surveying	98
Fig. 73: RPA and GNSS vertical data surveying.....	99
Fig. 74: Survey data: camera locations and image overlap.	100
Fig. 75: Camera calibration: image residuals for FC300S (3.61 mm).	100
Fig. 76: The workflow presents a multi-step process to generate orthophoto images and models through RPA survey	102
Fig. 77: Spatial interpolation algorithm employed with the ArcGis software to evaluate the most appropriate model to portray the study area compared to field-based measurements.	104
Fig. 78: DTMs from different metadata	105
Fig. 79: Comparative assessment of the topographic profiles	107

Fig. 80: The selected site area to compare the 3D models generated in the GIS environment according to different techniques	108
Fig. 81: Geo-referenced orthophotos	109
Fig. 82: Geo-referenced orthophotos	109
Fig. 83: Challenges faced during the RTK-GNSS surveying.....	112
Fig. 84: Issues during the RPA survey and post-processing results	113
Fig. 85: Principais feições descritas na área de estudo	115
Fig. 86: O método de estaqueamento horizontal foi utilizado para mensurar a evolução das feições erosivas na área de estudo	116
Fig. 87: Distribuição geológica da área de estudo	118
Fig. 88: Afloramento típico da encosta investigada na Ilha da Trindade.....	119
Fig. 89: Afloramentos de tufo-brecha da Formação Morro Vermelho na encosta estudada	119
Fig. 90: Depósitos piroclásticos.	120
Fig. 91: Destaque para os horizontes dos derrames da Formação Morro Vermelho.....	121
Fig. 92: Limite sudoeste (SW) da área investigada encoberto por depósitos de tálus provenientes do Pico Preto, um morro testemunho do Complexo Trindade.....	122
Fig. 93: Modelo 3D da encosta investigada, obtido por meio de levantamento com aeronave remotamente pilotada (RPA), destacando as principais feições e litotipos.....	123
Fig. 94: Processos erosivos a montante da ocupação na Ilha da Trindade.....	124
Fig. 95: Representação de um possível cenário em relação aos processos erosivos a montante da região ocupada na Ilha da Trindade	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos processos erosivos lineares gerados pela ação da água... 13	13
Tabela 2: Características dos processos erosivos comuns gerados pela ação da água... 14	14
Tabela 3: Atributos e características que influenciam a erosividade das águas das chuvas em vertentes que controlam a deflagração do processo erosivo de forma sazonal ou contínua..... 15	15
Tabela 4: Resumo da nova versão proposta do sistema de classificação de movimentos de massa gravitacionais. As palavras em itálico são marcadores20	20
Tabela 5: Atributos dos processos naturais associados ao meio físico que podem ser considerados nos inventários36	36
Tabela 6: Dados qualitativos das chuvas que ativaram as drenagens efêmeras entre 6 de abril e 14 de junho de 201859	59
Tabela 7: Dados de detalhe das chuvas registradas no dia 08/05/2019.63	63
Tabela 8: Detalhe das chuvas das horas com registro de precipitação do dia 18/05/2020.64	64
Tabela 9: Detalhe das chuvas das horas com registro de precipitação do dia 20/05/2020.65	65
Table 10: Summary of the inventory of earth surface features. These features were grouped into 19 units according to different landforms79	79
Table 11: Details of RPA survey.101	101
Table 12 Cameras of RPA survey.101	101
Table 13: Calibration coefficients and correlation matrix.101	101
Table 14: Checkpoints (CP) in altitude (m) and differences between respective DTMs and checkpoints in meters (m) are listed by different spatial interpolation algorithms enable in the ArcGis software103	103
Table 15: Summary of Inventory of spatial variability of terrain features (types and size) according to each source data and time spent on processing data.106	106

Table 16: Checkpoints (CP), altitude (m) of each checkpoint, and differences between respective DTMs and checkpoints in meters (m) were listed by pre-existing data from nautical charts (1968), RTK-GNSS, and RPA (phantom 3). 107

Tabela 17: Resultados do monitoramento das feições erosivas em 2017, 2018 e 2019. 125

LISTA DE SIGLAS

CPRM	- Serviço Geológico do Brasil
DHN	- Diretoria de Hidrografia e Navegação
DTM	- Digital Terrain Model
EMIT	- Estação Meteorológica da Ilha da Trindade
GEBCO	- General Bathymetric Chart of the Oceans
GCP	- Ground Control Points
IDW	- Inverse Distance Weighted
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LiDar	- Light Detection and Ranging
Ma	- Milhões de anos
MAE	- Mean Absolute Error
mm	- milímetros
mm/h	- milímetros por hora
mm/min	- milímetros por minuto
mm/s	- milímetros por segundo
MVF	- Morro Vermelho Formation
NE	- Nordeste
NW	- Noroeste
ONU	- Organização das Nações Unidas
PVF	- Paredão Volcano Formation
RAM	- Random-Access Memory
RGB	- Red Green Blue
RMSE	- Root Mean Square Error
RPA	- Remotely Piloted Aircraft
RTK-GNSS	- Real-time Kinematic Global Navigation Satellite Systems

SW - Sudoeste
TC - Trindade Complex
TIN - Triangulated Irregular Network

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1 Estrutura da tese	2
2. Premissas, hipóteses e objetivo	3
3. Fundamentação teórica.....	3
3.1 Aspectos conceituais	3
3.1.1 Ciência Ambiental	4
3.1.2 Terminologia	6
3.2 Ilhas vulcânicas oceânicas.....	8
3.3 Fontes de eventos perigosos.....	11
3.3.1 Erosão.....	11
3.3.2 Movimentos de massa gravitacionais	17
3.4 Inventário	35
3.5 Modelos geológicos: aplicação na avaliação geológica-geotécnica e geoambiental 40	
3.5.1 O que são modelos geológicos?	40
3.5.2 Tipos e hierarquia dos diferentes tipos de modelos geológicos.....	41
3.5.3 Modelos aplicados em regiões insulares com terreno vulcânico.....	47
4. Materiais e métodos.....	50
5. Resultados	53
5.1 Características gerais da área de estudo	53
5.1.1 Propriedades morfológicas e hidrográficas (águas superficiais)	53
5.1.2 Unidades de feição de terreno e descrições	53
5.1.3 Distribuição das chuvas	54
5.1.4 Cobertura vegetal.....	54
5.1.4 Ocupação	54
5.2 Dados de chuvas	55

5.2.1	Análise da relação das chuvas com as drenagens efêmeras	58
5.2.2	Detalhamento das chuvas episódicas	60
5.3	Mapping and assessment of erosion and gravitational mass movements on the volcanic island in Southern Atlantic Ocean: Trindade Island, Brazil	68
5.3.1	Introduction	68
5.3.2	Trindade Island.....	70
5.3.3	Study area.....	74
5.3.4	Methodology for site mapping	75
5.3.5	Results	76
5.3.6	Discussion.....	90
5.4	Inventory of natural processes with nautical charts, real-time kinematic global navigation satellite systems (RTK-GNSS), and Remotely Piloted Aircraft (RPA), Trindade Island, Brazil	93
5.4.1	Introduction	93
5.4.2	Study area settings	94
5.4.3	Material and methods.....	96
5.4.4	Results	103
5.4.5	Discussion.....	110
5.4.6	Conclusions.....	114
5.5	Dinâmica dos processos erosivos, movimentos de massa gravitacionais e depósitos de sedimentos	114
5.5.1	Caracterização do substrato rochoso.....	117
5.5.2	Caracterização das feições erosivas.....	122
5.6	Análise das chuvas e a ocorrência de movimentos de massa gravitacionais e processos erosivos	126
6.	Discussão integrada e conclusão	128
6.1	Reflexão dos perigos geológicos na Ilha da Trindade	128
6.2	Análises de riscos geológicos na Ilha da Trindade: o que é necessário?	129

7. Conclusão e considerações finais	130
REFERÊNCIAS	132
ANEXO 1 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	145
ANEXO 2 – IMAGEM AÉREA DA ÁREA DE ESTUDO (2011).....	146
ANEXO 3 – IMAGEM AÉREA DA ÁREA DE ESTUDO (2018).....	147
ANEXO 4 – IMAGEM AÉREA DE DETALHE DA ÁREA DE ESTUDO (2019)	148
ANEXO 5 – IMAGEM AÉREA DE DETALHE DA ÁREA DE ESTUDO (2022)	149
ANEXO 6 – MAPA TOPOGRÁFICO.....	150
ANEXO 7 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO.....	151
ANEXO 8 – MAPA DE RELEVO SOMBREADO	152
ANEXO 9 – MAPA DIGITAL DE DECLIVIDADE	153
ANEXO 10 – MAPA HIDROGRÁFICO	154
ANEXO 11 – MAPA DE UNIDADES DE FEIÇÃO DE TERRENO.....	155
ANEXO 12 – MAPA DE UNIDADES GEOLÓGICAS DE DETALHE	156

1. Introdução

As ilhas oceânicas de origem vulcânica, nas quais o dinamismo eruptivo responsável pela construção da paisagem encontra-se inativo ou extinto, como a Ilha da Trindade, geralmente apresentam contínuas alterações morfodinâmicas e forte recuo das vertentes. Tal cenário é decorrente dos processos destrutivos predominantes na evolução da paisagem, tais como fenômenos erosivos e deposicionais.

As ocupações habitacionais insulares enfrentam severas fontes de eventos perigosos exógenos, em comparação com as ocupações do continente, devido à localização geográfica dos territórios oceânicos. Além dos processos terrestres, as ilhas também estão sujeitas a processos marinhos e climáticos episódicos, como linhas de instabilidade e ciclones, que aceleram a erosão e a perda de massa.

A infraestrutura e atividades antropogênicas na Ilha da Trindade estão localizadas próximas às áreas que possuem processos geológicos ativos (Angulo et al., 2017; Santos et al., 2022) ou com possibilidade de instabilização. Neste cenário, estudos que investiguem os perigos geológicos são necessários nessa região. Portanto, existe uma demanda de investigações, que gerem produtos para tomadas de medidas preventivas e/ou de remediação, principalmente nas bacias hidrográficas habitadas, a fim de preservar vidas e danos ao patrimônio. Além disso, a ausência de mapas e banco de dados geoambientais disponíveis, prejudicam a visualização dos problemas por parte das autoridades e técnicos, prejudicando assim a evolução das pesquisas científicas no âmbito das Geociências na Ilha da Trindade.

As investigações que analisam os perigos geológicos visam avaliar as variáveis físicas do meio ambiente e definir suas potencialidades e limitações para o uso humano do território, o que é fundamental para a conscientização sobre a importância de modelos sustentáveis de planejamento territorial (INPE, 2020). No entanto, ao nível nacional, há uma lacuna de dados técnicos geoambientais e geotécnicos em territórios oceânicos, como na Ilha da Trindade, tanto em órgãos públicos (p. ex., INPE, CPRM), quanto no âmbito técnico-científico das universidades. Este estudo buscou preencher essas lacunas de conhecimento.

No presente estudo foi realizado o mapeamento para avaliar os perigos geológicos associados aos processos exógenos no setor leste da Ilha da Trindade, onde se concentra a ocupação. Os resultados aqui apresentados, foram gerados para serem aplicados na resolução de problemas entre a ocupação e o meio ambiente, além de servir como alerta e incentivo para a continuidade do monitoramento proposto, visando a produção de dados temporais precisos, que permitam estudos de previsão dos processos perigosos. Além disso, o presente estudo enquadra-se nos objetivos da ONU no âmbito do Quadro de Sendai para Redução de Riscos de Desastres (2015-2030) e a Década do Oceano (2021-2030).

A Ilha da Trindade (Fig. 1), é um território brasileiro que representa uma área de estudo não convencional (ANEXO 1). Implica tal enquadramento, o fato de ser remota e representar uma área militar que também é dedicada as atividades de pesquisa científica. A ilha possui uma ocupação permanente e rotativa, restrita a costa leste. Atualmente representa um importante patrimônio científico da humanidade devido as suas riquezas naturais, na qual se encontra delimitada como área de preservação ambiental permanente e de monumento natural (Brasil, 2018). Tal posicionamento espacial, em latitude próxima do setor sudeste da margem continental brasileira, eleva a importância da região no

contexto oceanopolítico internacional¹, que implica na permanência contínua de pessoal e infraestrutura, como garantia da soberania territorial². Tal ocupação, permanente e rotativa, restrita a militares e pesquisadores, encontra-se em condições de isolamento com poucos recursos médicos, caso acidentes ou desastres ocorram na região.

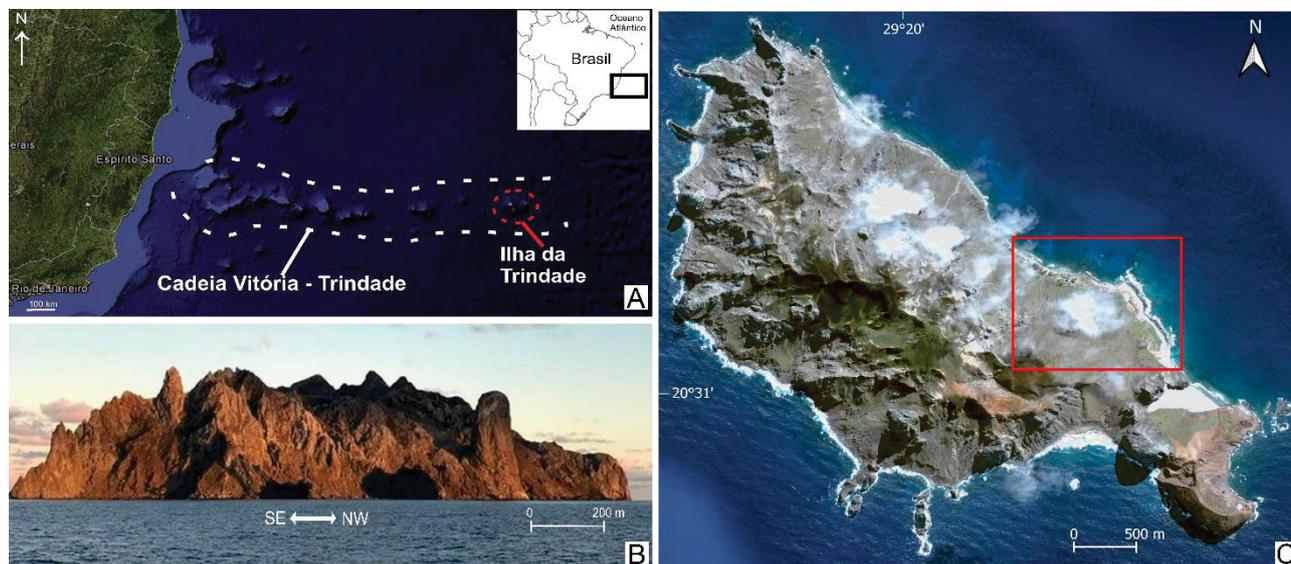


Fig. 1 – Contexto geral da área de investigação: a) a Ilha da Trindade ($20^{\circ} 30' 40''$ S, $29^{\circ} 18' 40''$ W), território vulcânico offshore brasileiro, localizado no sudoeste do Oceano Atlântico, no extremo leste da cadeia vulcânica submarina Vitória-Trindade; b) vista panorâmica da ilha; e c) vista aérea da área de estudo ($0^{\circ} 30' 40''$ S, $29^{\circ} 18' 40''$ W) delimitada em vermelho, localizada na parte leste da ilha e engloba as bacias hidrográficas que possuem elementos ou atividade antropogênicas.

1.1 Estrutura da tese

A seção introdutória acima ilustra de forma simples o amplo contexto da investigação de problemas ambientais em regiões insulares. Na parte 2, são descritas as premissas, hipóteses e objetivos da tese. A parte 3 apresenta a fundamentação teórica, incluindo os principais conceitos, fontes de eventos perigosos em ilhas oceânicas, técnicas de inventário e aplicação de modelos geológicos para avaliações de perigos geológicos. A parte 4 refere-se ao resumo dos principais passos seguidos no desenvolvimento dos métodos. Na parte 5, encontram-se os resultados da pesquisa no formato de artigos

¹ Marinha em Revista (2019): “A defesa do espaço marítimo é tão importante quanto à continental, o que remete ao conceito da oceanopolítica, na qual os limites das relações de poder são estabelecidos pela dimensão global dos oceanos, suas potencialidades e seu ordenamento jurídico próprio, deixando questões relativas a proximidades territoriais, em segundo plano.”

² Marinha do Brasil (2019): “Conforme dispõe o Art. 20, inciso IV, da Constituição Federal, a Ilha da Trindade é um bem da União, entregue pela Secretaria do Patrimônio da União (SPU) ao encargo da Marinha do Brasil (MB). (...) A MB ocupa a Ilha da Trindade, de forma contínua, desde 1957” (...) “A Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM-1982) dá ao Brasil o direito de estabelecer, ao redor da Ilha da Trindade, Mar Territorial, Zona Contígua, Zona Econômica Exclusiva e Plataforma Continental, conforme disposto na Lei número 8.617/1993.” (...) “Por sua localização, em latitude próxima das principais bacias petrolíferas e da região de maior desenvolvimento econômico e concentração populacional do país, a Ilha da Trindade constitui um posto avançado, vital para a Defesa Nacional (...) Em especial como ponto de apoio às forças navais em operação no Atlântico Sul, em proteção às linhas de comunicação marítima em águas jurisdicionais brasileiras.”

científicos. O artigo intitulado “Inventory of natural processes with nautical charts, real-time kinematic global navigation satellite systems (RTK-GNSS), and remotely piloted aircraft (RPA), Trindade Island, Brazil” foi publicado no Brazilian Journal of Geology, referenciado como Santos et al. (2022). Finalmente, a parte 6 contém a discussão integrada e a parte 7 apresenta as conclusões e considerações finais. Ressalta-se que a lista das figuras e tabelas deste documento engloba também os artigos científicos (parte 5), justificando a presença de dois idiomas nas descrições. O ANEXO 1 refere-se ao mapa da área de estudo, os ANEXOS 2 e 3 referem-se às imagens aéreas utilizadas, e os ANEXOS 4 e 5 referem-se às imagens aéreas geradas no presente estudo. Os ANEXOS 6 ao 12 contêm os produtos cartográficos gerados nesta tese.

2. Premissas, hipóteses e objetivo

A infraestrutura e atividades antropogênicas na Ilha da Trindade estão localizadas próximas às áreas que possuem processos geológicos ativos (Angulo et al., 2017) ou com possibilidade de instabilização, relacionados à dinâmica erosiva e deposicional da ilha (Santos et al., 2022). Por esse motivo, há uma demanda de estudos para avaliar os processos geológicos perigosos associados aos movimentos de massa gravitacional e erosão na região ocupada. Além disso, a Ilha da Trindade é uma área remota de difícil acesso que se caracteriza pela falta de avaliações e bancos de dados dos processos exógenos nas bacias hidrográficas. Esse cenário prejudica não apenas a evolução do conhecimento das geociências na ilha, mas também afeta a gestão integrada de riscos geológicos. Destaca-se ainda que a falta de conhecimento e de dados técnicos expõe deliberadamente as atividades humanas a perigos geralmente evitáveis, que podem resultar em perda de vidas humanas e prejuízos irreversíveis.

Visando abordar a lacuna do conhecimento e problemática existente na Ilha da Trindade, parte-se da hipótese de que novos eventos perigosos possam ocorrer, causando perdas ambientais, sociais, econômicas e humanas. Assim, esta tese tem como objetivo realizar um mapeamento geológico-geotécnico para a compartimentação da área de estudo, com foco nas condições para ocorrência de movimentos de massa gravitacionais e processos erosivos.

3. Fundamentação teórica

3.1 Aspectos conceituais

O estudo dos processos de superfície e sua relação com as atividades antropogênicas e o meio ambiente fazem parte do escopo da geologia ambiental. Nesta parte da tese, são apresentados os conceitos fundamentais do domínio da geologia ambiental que orientaram esta pesquisa. Além disso, é fornecida uma descrição detalhada da terminologia utilizada em relação aos estudos de caráter geológico-geotécnico.

3.1.1 Ciência Ambiental

A ciência ambiental (*environmental science*) está intimamente ligada ao estudo de riscos e perigos geológicos, pois ambos podem ter impactos significativos no meio ambiente e na sociedade. Além disso, representa uma área interdisciplinar que se preocupa com o estudo e a gestão dos impactos ambientais, incluindo aqueles relacionados aos riscos geológicos, tais como movimento de massa gravitacional, erosão, inundação, terremotos e erupções vulcânicas. Ela busca desenvolver estratégias para minimizar esses riscos e proteger a saúde pública e o meio ambiente.

A ciência ambiental – em um senso mais amplo – é área de conhecimento interdisciplinar que recorre à geologia, meteorologia, biologia, química, engenharia e física – para estudar sistematicamente os fenômenos físicos no meio ambiente (*environment*) em combinação com os organismos vivos e, conseqüentemente, os efeitos da atividade humana sobre estes (Singh, 2006; Kte'pi, 2022). O meio ambiente é composto por fatores físicos, químicos e biológicos que determinam a forma e a sobrevivência de organismos e comunidades ecológicas, incluindo a atmosfera, o clima, as feições de terreno continentais, a hidrosfera e o oceano (Britannica, 2022).

O estudo do meio ambiente é tão antigo quanto qualquer esforço humano, no entanto, o campo moderno da ciência ambiental desenvolveu-se a partir do crescimento da consciência humana, assim como a sua preocupação com os problemas ambientais a partir da década de 60 e 70 (Kte'pi, 2022). O fator humano na equação, define as ciências ambientais e, conseqüentemente, a geologia ambiental, que considera tanto os impactos quanto os benefícios da nossa existência (Doyle, 2005). Segundo Kte'pi (2022), a ciência ambiental é considerada separada dos estudos ambientais (*environmental studies*), os quais enfatizam a relação humana com o meio ambiente e suas dimensões políticas e sociais. Por exemplo, enquanto um pesquisador em estudos ambientais poderia se concentrar nas dimensões econômicas e política dos desastres naturais, um cientista ambiental procuraria entender esses problemas aplicando modelos e avaliando os meios de mitigação. De qualquer forma, segundo o autor, a ciência ambiental é uma disciplina com aspectos aplicados e teóricos, que tem sido influente em informar as políticas governamentais em todo o mundo.

O campo das ciências ambientais representa uma reflexão e debate global, demonstrando que os cenários atuais impactam o futuro da vida na Terra, ou que o presente é resultado de uma série de fatores conduzidos no passado. Além disso, é uma ferramenta que pode ser utilizada para administrar a nossa existência de modo a maximizar o sucesso humano, enquanto minimiza os impactos negativos na natureza. Ou seja, integra o conceito de gestão sustentável, no intuito de trabalhar com os sistemas naturais para sustentar o desenvolvimento, mas sem um custo ambiental inaceitável (Doyle, 2005).

3.1.1.1 Geologia ambiental

De uma maneira ampla, a geologia ambiental pode ser definida como a interação humana com o meio ambiente (Doyle, 2005; Doyle, 2021) (Fig. 2) e, conseqüentemente, como os problemas geológicos são causados pela interação das atividades antropogênicas com a superfície terrestre (Leiz e Amaral, 1989). Segundo Keller (1988), os processos geodinâmicos perigosos são inerentes à existência humana e, portanto, devem ser

identificados e, dentro do possível, impedidos ou minimizados quando representarem ameaças às vidas humanas ou propriedades.

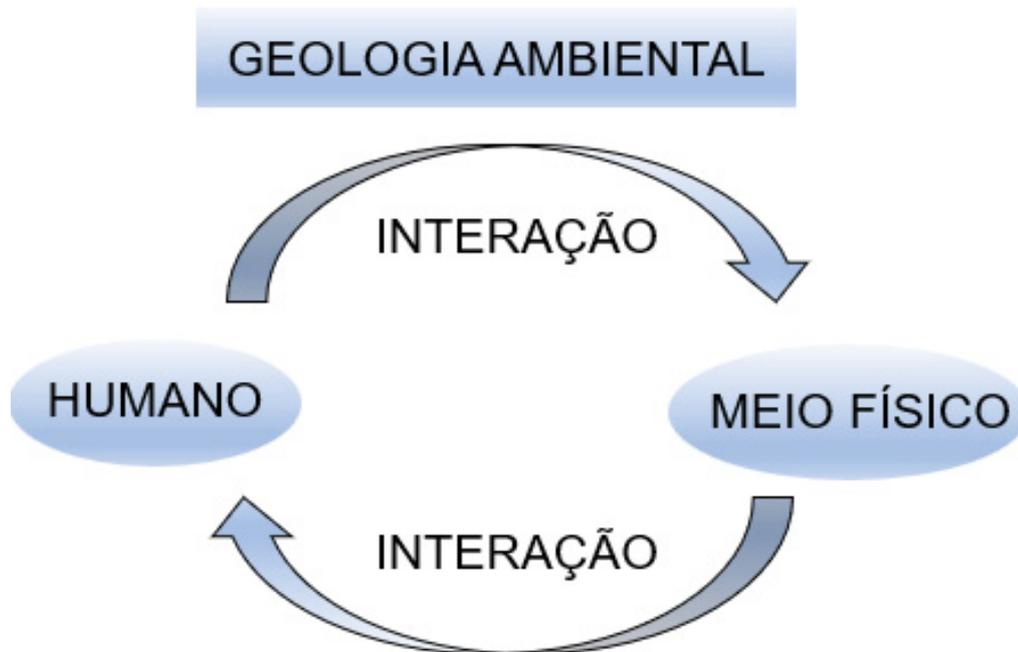


Fig. 2 – A geologia ambiental caracteriza-se pela relação ampla entre as atividades humanas com o meio físico da Terra (modificado de Unesp/IGCE, 1999).

3.1.1.2 Geotecnia ambiental

Segundo Zuquette (2015), a geotecnia ambiental é o domínio que envolve os conhecimentos da geologia de engenharia, mecânica dos solos, mecânica das rochas e áreas afins, que busca soluções para os problemas ambientais de forma sustentável. Ou seja, representa a ciência que aplica técnicas que permitem a previsão e soluções para minimizar os problemas ambientais (por exemplo, Sarsby, 2000; Sharma e Reddy, 2004; Fang e Daniels, 2006). Neste sentido, entra o conceito de geoambiente, entendido como uma parcela do ambiente que interage com as parcelas da litosfera, atmosfera, hidrosfera, antroposfera e biosfera (Yong et al., 2014) (Fig. 3). O ambiente, em uma perspectiva geotécnica ambiental, pode ser entendido como o conjunto de elementos naturais e antropogênicos que envolvem todos os seus constituintes, onde o desequilíbrio das esferas ambientais (ver Fig. 3) pode ser gerado por meio de atividades humanas, processos naturais e vida orgânica, ao longo da escala do tempo humano (Zuquette, 2015).

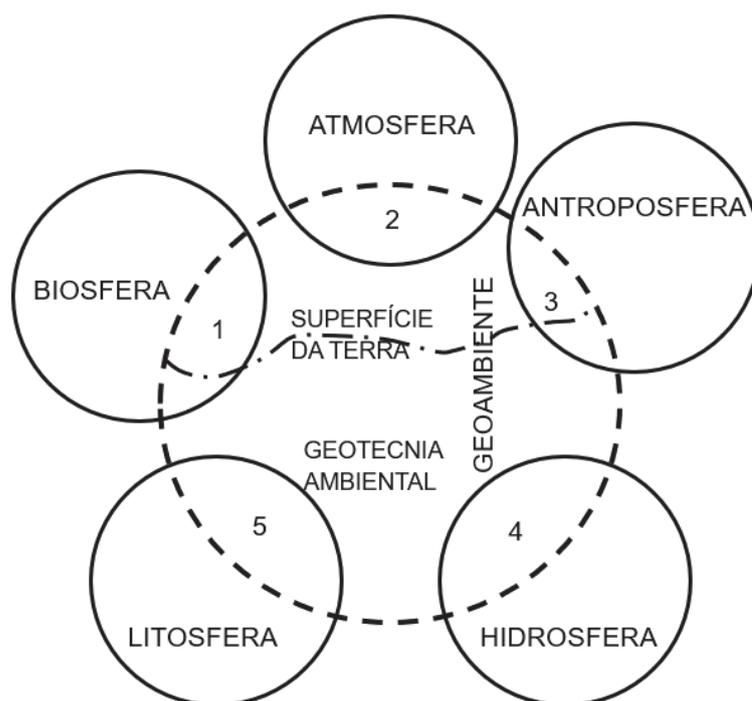


Fig. 3 – Esquema das relações dos diferentes domínios ambientais que constituem o geoambiente e a expertise da geotecnia ambiental. 1 - zonas com vida no âmbito da biosfera; 2 - interação dos gases com a litosfera; 3 - regiões da litosfera impactadas pelas atividades humanas; 4 - parcelas da hidrosfera que sofrem influência antropogênica; 5 - todos os materiais geológicos (rochas e materiais inconsolidados) da litosfera (Zuquette, 2015).

3.1.2 Terminologia

Zuquette (2018a) avaliou termos e conceitos de inúmeros trabalhos científicos, buscando uniformizar e manter o significado real dos termos para serem aplicados em trabalhos científicos e técnicos que envolvem eventos geológicos perigosos. Os conceitos mais pertinentes à presente tese foram adaptados e encontram-se sumarizados a seguir, conforme as definições levantadas pelo autor:

- Evento: fenômeno deflagrado, em um local e em um intervalo de tempo, relacionado com diversos aspectos do meio ambiente. É classificado em natural, quasi-natural, natural-tecnológico e antropogênico;
- Evento natural: evento originado de cenários geológicos, hidrológicos, atmosféricos e biológicos, que geram consequências de extensão e escala variadas, que podem repercutir por poucas horas até décadas;
- Evento quasi-natural: evento que engloba componentes ambientais potenciados ou deflagrados pela atividade humana (p.ex., desertificação);
- Evento antropogênico: evento decorrente (direta ou indiretamente) da atividade humana;
- Evento perigoso (*hazard*): evento com magnitude e intensidade acima de um limite, com potencial para provocar danos aos elementos ambientais e probabilidade de ocorrer em um espaço e intervalo de tempo;

- Desastre: pode ser definido como a ocorrência do evento perigoso, que ocasionou as consequências negativas previstas anteriormente e excedem a capacidade dos elementos do meio ambiente resolverem sozinhos;
- Risco: grau calculado do somatório das probabilidades de consequências negativas para o meio ambiente, resultantes da probabilidade de um evento perigoso, considerando os aspectos espaciais e temporais;
- Perigo geológico: evento ocorrido ou com potencial de ocorrer, possui caráter natural, sendo apresentado em termos de geometria e mecanismo, sem prognóstico de ocorrência temporal;
- Acidente: evento ocorrido, previsto ou não, que provoca prejuízo a um número pequeno de pessoas, ou representa perdas de pequena magnitude para as estruturas físicas;
- Elementos do meio ambiente (*elements at risk*): uso e ocupação humana, em relação aos aspectos naturais existentes (ou que poderão existir), na região que potencialmente pode ser afetada pelo evento perigoso;
- Exposição: nível ao qual elementos antropogênicos, físicos e biológicos do meio ambiente estão submetidos em uma área com probabilidade de ocorrência de um evento perigoso;
- Predisposição: combinação dos atributos, geralmente categorizados, que condicionam a ocorrência de um evento;
- Fatores predisponentes (*predisposing factors*): condições inerentes ao local de análise fundamentais para a ocorrência do evento perigoso;
- Fatores de sustentação: fatores que controlam a duração do evento (p. ex., duração das chuvas);
- Fatores modificadores: ações naturais ou humanas que influenciam a ocorrência de um evento perigoso, seja induzido, acelerando, potencializando ou retardando;
- Fatores preparatórios: processos e atividades que ocorrem ao longo do tempo, sem a ocorrência do evento, que modifica as características dos fatores predisponentes e, conseqüentemente, favorece a ocorrência do evento perigoso;
- Áreas vulneráveis: locais que podem ser afetados direta ou indiretamente pelas consequências de um evento perigoso;
- Análise: procedimento de caráter interdisciplinar, desenvolvido em etapas, tais como obtenção, avaliação e interpretação dos dados obtidos em relação ao objeto de análise;
- Análise de risco: processo que envolve a identificação do evento perigoso, probabilidade temporal/espacial e perdas (econômica, social, ambiental) potenciais em função da magnitude/intensidade;
- Análise de evento perigoso: conjunto de etapas (procedimentos, técnicas e métodos) que viabilizam calcular a predictabilidade em termos de magnitude, local, intensidade e temporalidade;
- Avaliação de risco (*risk evaluation*): níveis de riscos estimados, comparados com os limites determinados como toleráveis, considerando a legislação, indivíduos e sociedade submetidas as consequências.

3.2 Ilhas vulcânicas oceânicas

As ilhas oceânicas, em geral, apresentam pequena área de superfície subaérea, que ascende do assoalho oceânico, distante da costa continental e são tipicamente vulcânicas (Menard e Lass, 1963). As ilhas oceânicas são sistemas geológicos complexos. Podem ser definidas como terrenos vulcânicos formados por magma, rocha sólida, rocha alterada, sedimentos, sistemas hidrotermais e, às vezes, depositadas em curtos períodos, quando comparadas com outros processos de sedimentação não relacionados com erupções vulcânicas (López-Saavedra e Martí, 2023).

A evolução de vulcões oceânicos (hotspots) está intrinsicamente correlacionada com a competição entre a construção vulcânica e a destruição erosiva (Ramalho et al., 2013) (Fig. 4). Os processos de perda de material por movimentos gravitacionais (por exemplo, Holcomb e Searle, 1991; Mitchell, 2003) e erosão (por exemplo, Wentworth, 1927; Draut et al., 2009; Ferrier et al., 2013) são cruciais na transformação da paisagem e, comumente, estão relacionados aos perigos geológicos, os quais são o foco da presente pesquisa.

Em termos de evolução, colapsos catastróficos de edifícios vulcânicos, em grande escala, mudam drasticamente a paisagem e reiniciam os processos de erosão marinha (Mitchell, 2003). De qualquer forma, seja pequeno, gradual ou catastrófico, os movimentos de massa gravitacionais são mecanismos efetivos na evolução das encostas e importante fonte de sedimentos grossos (Griggs e Trenhaile, 1994; Bird, 2008; Trenhaile, 2011) que chegam até a costa. A degradação do terreno também é severamente influenciada pela erosão proveniente do regime das chuvas e, conseqüentemente, da erosão fluvial, principalmente em ilhas onde ocorrem chuvas orográficas (Draut et al., 2009; Ferrier et al., 2013). O regime de erosão fluvial - perene, efêmero e torrencial - influencia a distribuição da deposição de sedimentos no espaço e no tempo (Ramalho et al., 2013). De acordo com Ramalho et al. (2013), os sedimentos gerados por esses processos atuam tanto como abrasivos, ao contribuir fortemente no recuo de falésias marinhas, quanto como barreiras para a erosão, quando estão disponíveis em quantidade suficiente, somados com condições dinâmicas favoráveis, para a formação de praias.

Os mecanismos, sumarizados por Ramalho et al. (2013), que interagem e contribuem para a evolução da paisagem nos vulcões insulares (Fig. 4) são: a) o vulcanismo, principal agente do crescimento insular, predominam durante a fase emergente e nas etapas de construção do escudo subaéreo; b) as estruturas ativas e inativas (p. ex., escarpas de falha, enxame de diques), podem controlar a geometria da costa e as taxas de erosão, tanto em eventos de movimentos de massa gravitacionais, quanto na sua contribuição na erosão diferencial; c) propriedades mecânicas dos litotipos que influenciam diretamente no tipo e intensidade de erosão e, conseqüentemente, na quantidade e tipo de sedimento móvel disponível no sistema; d) parâmetros de energia das ondas, diretamente ligados a erosão costeira, que somados a erosão subaérea, representam os principais agentes de destruição das ilhas oceânicas; e) a amplitude da mudança eustática tem um efeito profundo a longo prazo na evolução costeira (influencia na erosão marinha e no crescimento dos recifes); f) perda de material por movimentos de massa gravitacionais em diferentes escalas contribui significativamente à regressão costeira; g) a erosão subaérea é importante agente na evolução da paisagem e na produção, transporte e depósito de sedimentos até as costas; h) a produção e disponibilidade de sedimentos atua diretamente na evolução costeira, assim como o i) crescimento de recife e produção biogênica; j) os movimentos verticais têm efeito direto nos processos erosivos, sedimentares e biológicos,

já a subsidência atua na redução do tamanho da ilha e, conseqüentemente, ajuda a diminuir a vida do edifício vulcânico acima do nível do mar.

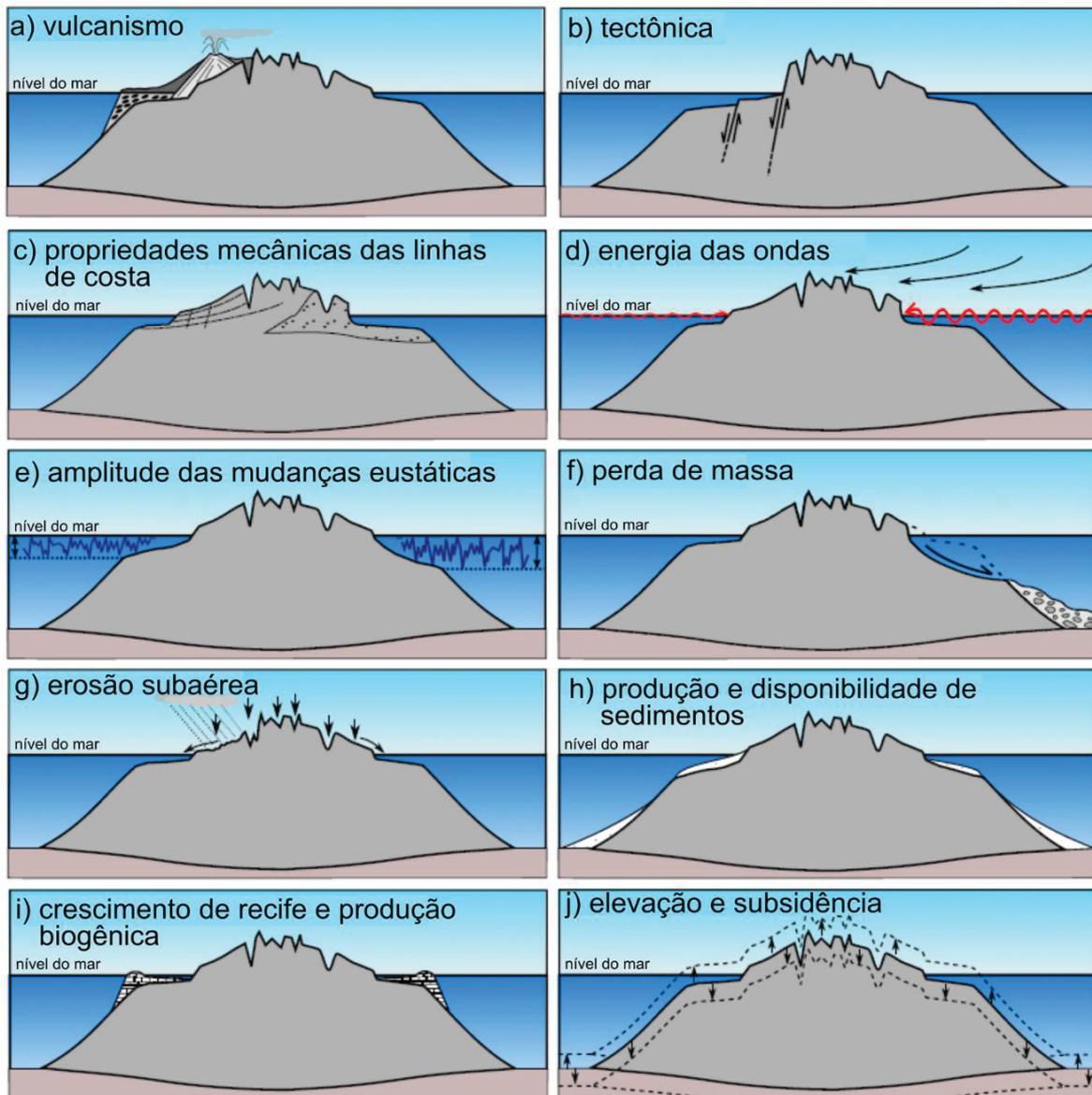


Fig. 4 – Diversos mecanismos que interagem e contribuem para a evolução da paisagem nos vulcões de ilhas oceânicas: a) o vulcanismo; b) as estruturas ativas e inativas; c) propriedades mecânicas dos litotipos d) parâmetros de energia das ondas; e) a amplitude da mudança eustática; f) perda de material por movimentos de massa gravitacionais; g) erosão subaérea; h) a produção e disponibilidade de sedimentos atua diretamente na evolução costeira, assim como o i) crescimento de recife e produção biogênica; j) os movimentos verticais têm efeito direto nos processos erosivos, sedimentares e biológicos, já a subsidência atua na redução do tamanho da ilha e, conseqüentemente, ajuda a diminuir a vida do edifício vulcânico acima do nível do mar (modificado de Ramalho et al., 2013).

López-Saavedra e Martí (2023) descrevem os diferentes fatores que controlam a evolução geológica e geomorfológica dos ambientes insulares, que condicionam terrenos mais instáveis em comparação com a maioria das áreas continentais. Isso se deve às encostas íngremes, resultantes do rápido crescimento em altitude, que facilita eventos de natureza gravitacional, como quedas e avalanches de rochas. De acordo com os autores, esses processos são agravados por estruturas fracas afetadas por intenso falhamento e alteração, correspondentes aos processos destrutivos e construtivos ao longo de sua evolução. Portanto, as ilhas vulcânicas são consideradas um dos ambientes mais vulneráveis e têm uma natureza intrinsecamente *multi-hazard*, onde os riscos naturais vulcânicos e não vulcânicos tendem a ocorrer simultaneamente, causando assim efeitos em cascata (ver Fig. 5) (López-Saavedra e Martí, 2023).

As ilhas vulcânicas insulares possuem grande importância social, política e econômica. Portanto, é necessária uma gestão intersetorial que seja socialmente inclusiva e que aplique um sistema de gestão *multi-hazard* baseado no conhecimento científico e nas demandas e soluções críticas da sociedade (López-Saavedra e Martí, 2023).

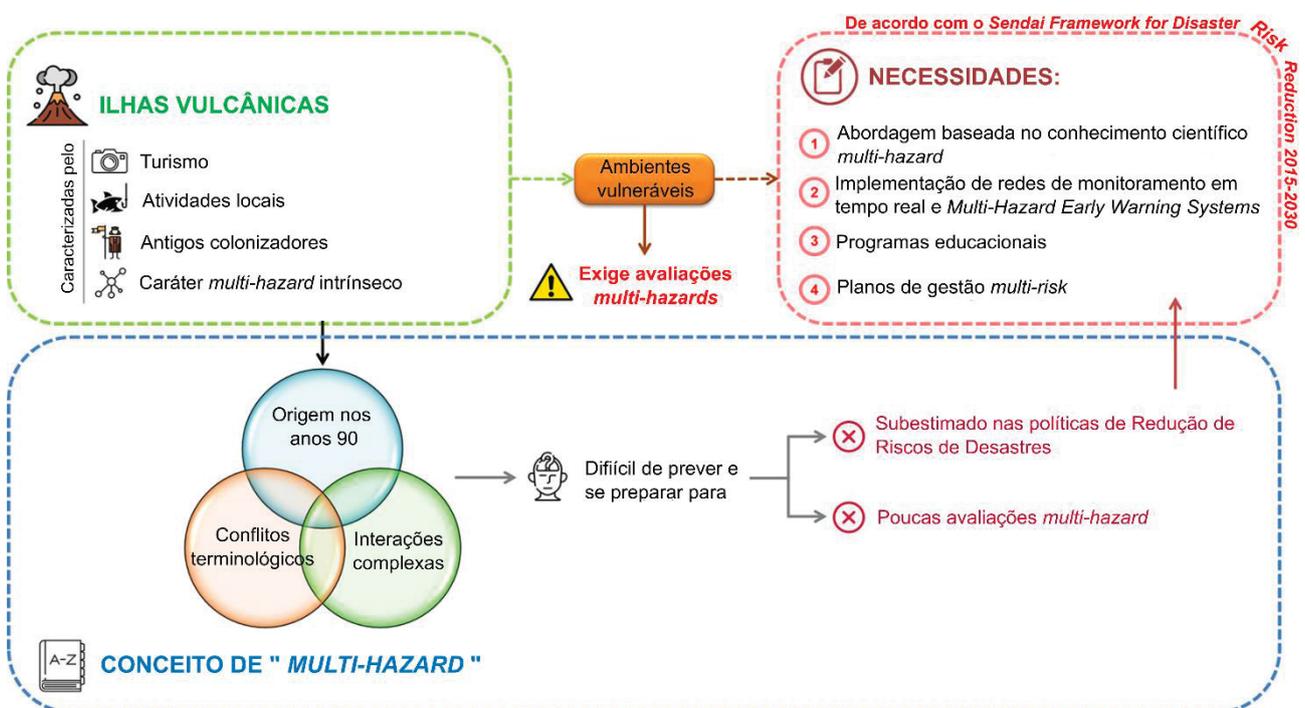


Fig. 5 – Diagrama sobre a abordagem *multi-hazard* em ilhas vulcânicas (modificado de López-Saavedra e Martí, 2023).

Considerando que a atividade vulcânica na Ilha da Trindade cessou há cerca de 0,17 Ma (Pires et al., 2016a), os riscos não-vulcânicos devem ser o foco dos processos naturais que representam riscos para a atividade humana (por exemplo, Gaspar et al., 2011; Aubaud et al., 2013; Marinos et al., 2017). Os movimentos gravitacionais de massa em magnitudes variáveis são os fenômenos mais comuns em ilhas vulcânicas, deflagrados principalmente por terremotos que representam outro fenômeno natural comum neste tipo de ambiente (López-Saavedra e Martí, 2023). A maioria das ilhas vulcânicas estão concentradas nos limites de placas em zonas de subducção, estando sujeitas a terremotos de origem tectônica. Por outro lado, as ilhas oceânicas localizadas em outro contexto

geodinâmico também podem estar relacionadas com terremotos via falhas regionais ou sistemas de falhas.

De acordo com López-Saavedra e Martí (2023), os eventos climáticos (*climatic hazards*) estão relacionados com a topografia natural das ilhas vulcânicas (por exemplo, barreiras naturais e vales profundos), somadas com a influência do mar que as rodeiam, criando contrastes climáticos em diferentes partes do território e mudanças bruscas em uma mesma área. Tais processos ambientais, segundo os autores, sujeitam tais ambientes oceânicos, tanto à erosão dos solos devido às chuvas, processos superficiais de escoamento de água, fortes ondulações, períodos de seca intensa e alterações das rochas, quanto aos processos de expansão e contração termal dos materiais rochosos. Os ambientes insulares também estão sujeitos a linhas de instabilidade e ciclones, onde tais eventos climáticos extremos também estão associados a riscos.

3.3 Fontes de eventos perigosos

Eventos perigosos são fenômenos que podem ser de origem geológica, natural ou induzidos pela ação humana, com uma intensidade e probabilidade de ocorrer no tempo e no espaço, que afetam a sociedade, elementos antropogênicos e o meio ambiente, com consequências danosas (Burton e Kates, 1964; UNDRO, 1982; Blaikie et al., 1994; Bates e Jackson, 1984; Scheidegger, 1994; CSA, 1997; Hewitt, 1997; Santos e de Souza, 2018). Tais eventos podem ser classificados em categorias: a) quanto às fontes; b) quanto à exposição dos elementos do meio ambiente; c) quanto à extensão e magnitude; e d) quanto ao caráter antropogênico. Além disso, os eventos perigosos são caracterizados, de acordo com White (1974) e Gares et al. (1994), por atributos como tipo, localização, magnitude, intensidade, frequência, dimensão, duração, extensão espacial, distribuição temporal e tipo de material envolvido. A seguir, serão abordados os tipos de eventos perigosos de natureza geológica, assim como os conceitos e tipos relevantes para o desenvolvimento da pesquisa na Ilha da Trindade.

3.3.1 Erosão

No presente estudo, entende-se como erosão os processos naturais exógenos com ação destrutiva, tais como a erosão costeira e marginal, que contrastam com os processos endógenos construtivos, como o vulcanismo. Os processos erosivos são decorrentes do destacamento, geralmente resultado do intemperismo, e transporte de fragmentos de dimensões variáveis por meio de agentes erosivos, tais como água, vento, gravidade, gelo e organismos vivos³ (Ayres, 1936; IPT, 1968; Bobrowsky e Couture, 2014) (Fig. 6).

³ Também denominado como bioerosão ocasionado por animais ou plantas.

Tipos de erosão

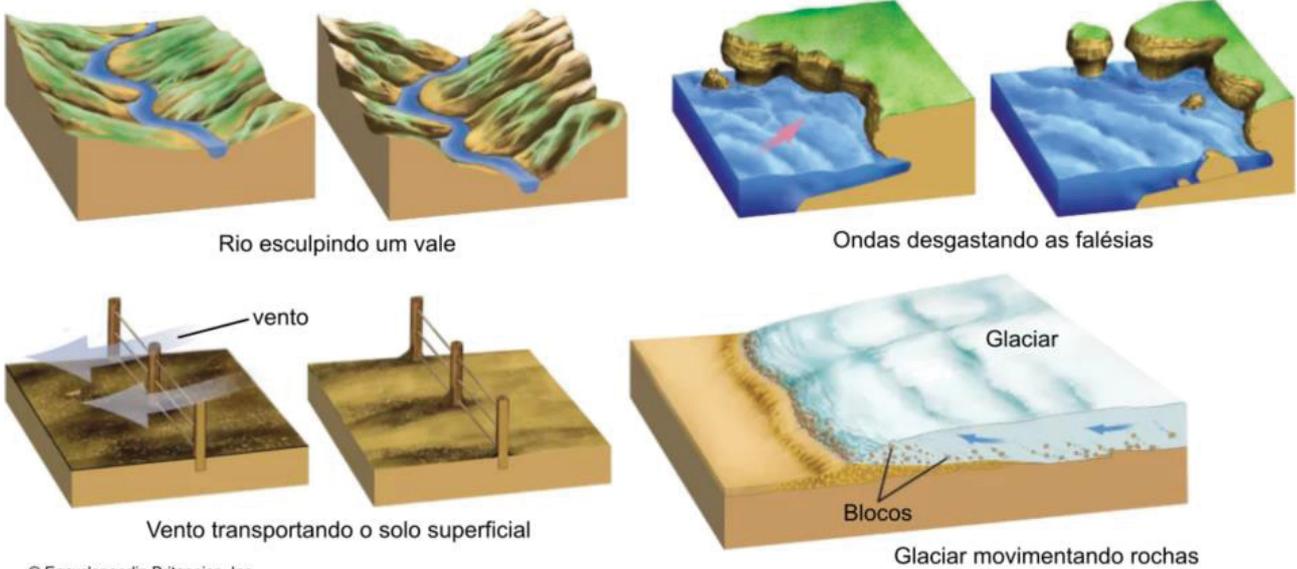


Fig. 6 – Exemplos de erosão natural que incluem a erosão fluvial, onde a água de rios carrega sedimentos e fragmentos de rochas; a erosão eólica, onde o vento transporta partículas de solo e areia; a erosão gravitacional, onde a gravidade desloca fragmentos de rochas e solos em encostas íngremes e a erosão glacial, onde o gelo transporta material rochosos (modificado de Britannica, 2021b).

Os fenômenos erosivos são inerentes aos processos geomorfológicos, sendo classificados como: a) naturais, em função das condições do terreno, e b) acelerados, por meio da atividade humana ou animal, que geralmente intensificam os processos naturais (Bobrowsky e Couture, 2014; Veerle et al., 2014; Zuquette, 2018b). É importante destacar que as atividades antropogênicas estão tão presentes e difundidas que atuam como agentes geológicos, modificando profundamente a superfície terrestre, muitas vezes de maneira irreversível (Lupia-palmieri, 2004; Wilkinson, 2005).

Os agentes mais comuns dos processos erosivos, que destacam e transportam materiais, estão relacionados à água, vento e gelo (Fig. 7). As tabelas 1 e 2 resumem as características fundamentais, em termos de geometria e evolução, dos principais tipos de processos erosivos. No âmbito da erosão, destaca-se a água como o mais importante agente erosivo natural (Brittanica, 2022), e as feições geradas pela erosão hídrica são de grande interesse para a presente tese.

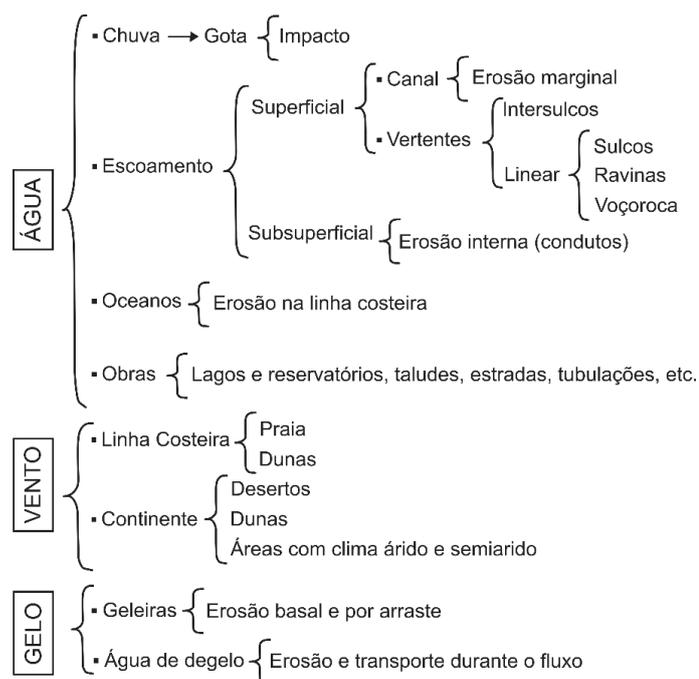


Fig. 7 – Esquema que ilustra os diferentes agentes e tipos de áreas em que ocorrem processos erosivos: a) água: atua por meio das gotas de chuva, escoamento superficial ou subsuperficial, ação das ondas e correntes em áreas costeiras; b) vento: nas regiões costeiras e continentais, o fluxo de ar age por meio de processos de abrasão e deflação; e c) gelo: processos erosivos decorrentes do fluxo e degelo das geleiras (Rotta e Zuquette, 2015).

Tabela 1: Características dos processos erosivos lineares gerados pela ação da água (modificado de Zuquette, 2018b).

Tipos lineares					
	Sulco	Ravina (<i>rill</i>)	Voçoroca (<i>gully</i>)		
			Efêmera (<i>ephemeral gully</i>)	Fundo em U ^a	Fundo em V ^b
Descrição básica	Canais de pequenas dimensões, gerados por concentração de pequenos volumes de água	Feição maior que os sulcos e é a evolução dos sulcos pela propagação tanto em profundidade quanto em largura e comprimento	É a evolução dos sulcos pela propagação tanto em profundidade quanto em largura e comprimento	<ul style="list-style-type: none"> • Atingiu zona saturada • Atingiu camada mais resistente 	<ul style="list-style-type: none"> • Normalmente não atingiu zona saturada • Não atingiu camada mais resistente
Dimensão	Comprimentos de dezenas de metros, profundidades menores que 0,5 m e larguras que podem atingir a ordem de metro	Profundidades entre 0,5 m e 1 m, comprimento de dezenas de metros e larguras menores que 2 m	Profundidades maiores que 1 m, mas menores que 2 m, larguras menores que 2 m e comprimentos de dezenas de metros	Comprimentos de dezenas de metros a km, profundidades superiores a 1 m, podendo atingir centenas, e larguras variando de metros a centenas de metros	Comprimentos de dezenas de metros a km, profundidades superiores a 1 m, podendo atingir centenas, e larguras variando de metros a centenas de metros

Progressão	Propaga-se em todas as dimensões devido à concentração das águas	É parte da evolução entre sulcos e voçorocas, mas devido à profundidade do solo (rocha ou camada muito resistente rasa) e relevo (localizada em posição que atinge divisor de água) pode não evoluir para voçoroca	Apresenta progressão muito rápida em função da posição da vertente	Predominantemente e por solapamento no fundo devido ao nível de água e queda/escorregamento do material superior por falta de suporte	Predominantemente e pela erosão do fundo e instabilidade das paredes
Proporção	Comprimento >> largura >>>> profundidade	Comprimento predomina sobre largura e profundidade	Comprimento predomina sobre largura e profundidade	Profundidade pode ser maior que largura na superfície	Profundidade pode ser maior que largura na superfície

^{a, b} Apresenta ramificação tanto na cabeceira quanto nas laterais

Tabela 2: Características dos processos erosivos comuns gerados pela ação da água (modificado de Zuquette, 2018b).

	Intersulco (<i>sheet / sheet-wash</i>)	Erosão marginal (<i>streambank erosion</i>)	Erosão interna (<i>piping</i>)	Erosão costeira
Descrição básica	Não distinguem-se feições isoladas, mas sim frentes que reúnem microcanais e evidências de arraste. Destacamento e transporte por gotas de chuva e fluxo de água	Atinge os canais de drenagem e margens de lagos e reservatórios devido às correntes e ondas	Ocorre predominantemente em camadas de materiais arenosos e dispersivos, juntos às margens dos canais de drenagem, lagos, reservatórios e em áreas cársticas	Atinge a linha de costa e tem sua intensidade controlada pela intensidade e frequência de ondas, correntes e marés
Dimensão	Canais na ordem de centímetros anastomosado	Predomina a dimensão longitudinal e pode atingir quilômetros	Pode variar de diâmetros de centímetros até um metro. O comprimento pode atingir dezenas de metros	Muito variável em função do tipo de costa, usos e disposição da zona litorânea em termos de restrição espacial
Progressão	Acentua o transporte das partículas diminuindo a espessura do solo	Pode ocorrer muito rápida, mas predominam as sazonais quando ocorre o aumento do nível de água nos canais e o consequente aumento da energia	A progressão depende da fonte de água e da continuidade lateral dos materiais geológicos com características predisponentes	Depende do relevo, disposição e tipos de materiais geológicos
Proporção	Não é possível individualizar, mas sim delimitar a área com esse tipo de processo erosivo, principalmente pelo acúmulo de sedimentos em depressões	Predomínio do comprimento	Predomina a dimensão do comprimento, pois podem ocorrer feições com diâmetros e comprimentos de dezenas de metros	Varia, mas normalmente ocorre na direção paralela à linha de costa

De acordo com Zuquette (2018b), os processos erosivos resultam da interação de três componentes: a) capacidade do agente em destacar as partículas, por meio de impacto das gotas de chuva e tensão cisalhante do fluxo do escoamento superficial (laminar ou turbulento); b) capacidade do agente em transportar as partículas destacadas, por meio da energia do fluxo e do tamanho das partículas; e c) erodibilidade, que depende da resistência do material geológico, relacionada a atributos como granulometria, estrutura da matriz, densidade e tamanho de vazios, resistência ao cisalhamento, aspectos reológicos, hidrológicos e químicos, além das características mineralógicas, presença de raízes, distribuição espacial e em profundidade do material geológico e influência de atividades antropogênicas. Além disso, a erosividade é um aspecto importante que diz respeito à capacidade do agente erosivo em destacar e transportar as partículas, relacionada ao nível de energia total. (Zuquette, 2018b) (Tabela 3).

Tabela 3: Atributos e características que influenciam a erosividade das águas das chuvas em vertentes que controlam a deflagração do processo erosivo de forma sazonal ou contínua (modificado de Zuquette, 2018b).

Atributos	Aspectos	Características afetadas
Chuvas	Intensidade	Quanto maior a intensidade, maiores os impactos e o destacamento de partículas. Chuvas de baixa intensidade e longa duração propiciam uma infiltração maior, diminuindo o escoamento superficial, mas alteram a umidade de uma camada mais espessa, diminuindo a coesão
	Duração	Quanto maior for a duração, maior será o volume de água acumulado e a espessura da lâmina de água do escoamento superficial
	Tamanho das gotas	Quanto maior o tamanho das gotas, maior será a eficiência do destacamento das partículas
Rugosidade	Grandeza da amplitude	Quanto maior, maior o volume de água armazenado e menor o escoamento superficial e a ação das gotas
	Continuidade	Quanto mais persistentes forem as feições de rugosidade, maiores as possibilidades de concentração das águas
	Disposição espacial	Quanto mais próximo o posicionamento das feições de rugosidade da direção da maior declividade, maiores são as possibilidades de aumento da velocidade do escoamento superficial
Vegetação	Rasteira	Esse tipo diminui o impacto das gotas, a velocidade e a lâmina do escoamento superficial (p. ex., gramíneas e assemelhadas)
	Arbustos (ou porte maior)	Em função da folhagem pode ocorrer a diminuição do impacto das gotas e afetar a intensidade da chuva efetiva devido à interceptação
	Material orgânico	Quanto maior o volume de material orgânico acumulado na superfície, maiores a infiltração e o acúmulo de água

Segundo Lupia-Palmieri (2004), a formação das feições erosivas não depende apenas de agentes exógenos. De acordo com o autor, outros fatores também controlam tanto a natureza quanto as taxas de erosão dos processos erosivos, tais como: a) litologia, que controla fortemente os processos, assim como a erodibilidade e a erosão diferencial; b) tectônica, que influencia na erosão diferencial⁴, nas taxas, velocidade e intensidade de erosão; c) clima, que controla diretamente através de elementos climáticos (por exemplo, temperatura, chuva e vento) e interfere nos processos de intemperismo e, conseqüentemente, na morfodinâmica; d) vegetação, relacionada à erosividade, como já mencionado anteriormente; e e) impacto humano, que acelera e/ou modifica os processos erosivos naturais.

Nos estudos concentrados em bacias hidrográficas em terrenos vulcânicos recentes, que possuem feições do terreno íngremes (por exemplo, cones de escórias, falésias marinhas) compostas por rochas friáveis (por exemplo, tufos, brechas, lapilli), as águas das chuvas são importantes agentes. As feições decorrentes das chuvas podem acelerar processos perigosos geológicos, e a erosão do tipo linear se destaca (Fig. 8 e 9). As erosões lineares são decorrentes principalmente da ação das águas das chuvas via escoamento superficial, que gera canais na superfície irregular do terreno. Elas são geralmente efêmeras e podem ser classificadas em sulcos, ravinas e voçorocas, nas quais cada tipo representa a evolução em dimensão e geometria, respectivamente (Tabela 1) (Ayres, 1936; Rotta e Zuquette, 2015).



Fig. 8 – Feições lineares de processos erosivos em terreno de tufo vulcânico: a) voçoroca localizada em terreno de tufos vulcânico; b) voçoroca ativa com vários metros de profundidade; c) erosão interna (*piping*) na cabeceira de feição linear e d) armadilhas sedimentares para controle da evolução da erosão (modificado de Kropáček et al., 2016).

⁴ Segundo o *American Geosciences Institute* (2014), erosão diferencial é a erosão que ocorre de forma irregular em taxas diferentes na paisagem. É causada pela diferença de resistência e dureza dos materiais da superfície: rochas mais fracas se desgastam rapidamente, enquanto rochas mais duras e resistentes permanecem, formando cristas, colinas e montanhas.

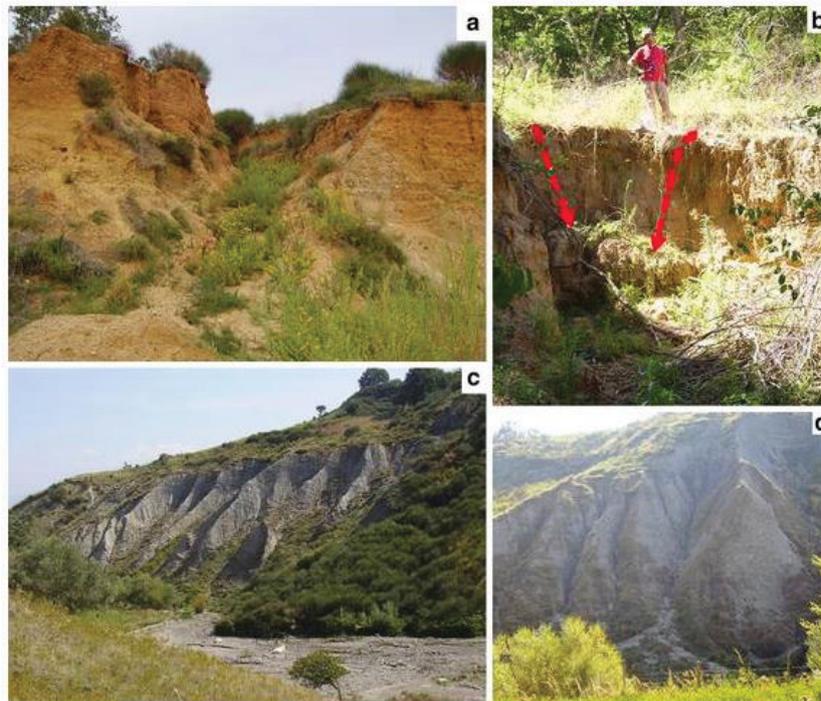


Fig. 9 – Erosão linear em bacia hidrográfica em Turbolo (Itália): a) erosão regressiva com canais estreitos com fundo em V; b) erosão ativa durante as chuvas, com quedas de materiais evidentes indicadas pelas setas vermelhas; c) *badlands* em área de litologia argilosa; e d) cones de fluxo de detritos nos canais das *badlands* (Conforti et al., 2010).

3.3.2 Movimentos de massa gravitacionais

Trata-se de sistemas físicos que envolvem o movimento de materiais geológicos e antropogênicos em vertentes⁵ naturais ou modificadas, em resposta à atração da gravidade ou ao afundamento rápido ou gradual da superfície terrestre, em uma direção predominantemente vertical, e cujo histórico dos movimentos de massa inclui superfícies de rupturas, como falhas, deformações pré-falha e deslocamentos pós-falha (Hungry et al., 2014; Zuquette, 2018; ESDAC, 2021). Anteriormente, o termo "desperdício de massa" era utilizado para se referir à movimentação, pela ação da gravidade, de grandes massas de materiais crustais, no entanto, atualmente, tal termo foi substituído por "movimento de massa" para incluir os processos de afundamento de áreas confinadas na superfície terrestre (Britannica, 2021b).

Os movimentos de massa, de maneira geral, são deflagrados segundo as condições da paisagem, que incluem os aspectos naturais, tais como geológicos, geomorfológicos e climáticos, e os fatores antropogênicos, que atuam como agentes modificadores da paisagem (por exemplo, obras em locais inadequados, degradação da cobertura vegetal, modificação na geometria da feição), também são considerados deflagradores de movimento de massa. Em ambientes de montanhas, os processos

⁵ Sinônimo de flanco e encosta. É uma região de declive topográfico que margeia o alinhamento de uma região mais elevada ou que compõem as margens de um vale e por onde correm (vertem) as águas pluviais alimentando o lençol freático do solo para dar origem a linhas de nascentes (Wingé et al., 2001).

deposicionais naturais, como deslizamentos e avalanche de detritos vulcânicos, podem ser rápidos e catastróficos, representando uma fonte dominante de sedimentos (Vanacker et al., 2014). A erosão pode aumentar significativamente o poder destrutivo de um deslizamento de terra ao amplificar o volume, mobilidade e força de impacto. Assim, a ameaça representada por um deslizamento de terra erosivo está ligada à sua mobilidade (Fig. 10) (Pudasaini e Krautblatter, 2021). O impacto e a extensão desses grandes eventos naturais podem ser amplificados pelas atividades humanas (Vanacker et al., 2014), que aumentam consideravelmente a taxa natural (Schumm e Harvey, 1982; Verheijen et al., 2019).

Os critérios de classificação propostos por Varnes (1978) e Cruden e Varnes (1996) continuam sendo amplamente difundidos e aceitos internacionalmente pela comunidade científica e por organizações governamentais. Esse sistema de classificação é considerado simplista, pois cada tipo de movimento é classificado com base em dois aspectos: a cinemática do movimento de massa deslocada e os materiais geológicos envolvidos no processo (Rotta e Zuquette, 2015).

Hungr et al. (2014) propuseram uma atualização da classificação proposta por Varnes (1978). Segundo os autores, o tipo de material é um fator crucial no comportamento dos movimentos de massa e a tríade de materiais proposta por Varnes (1978) (rocha, detritos e terra) não é compatível com a terminologia geológica de materiais distinguidos por origem, nem com classificações geotécnicas baseadas em propriedades mecânicas (por exemplo, Morgenstern 1992; Leroueil et al. 1996). Outras mudanças, relacionadas principalmente aos mecanismos de movimento, foram incorporadas (Tabela 4). Como na Ilha da Trindade predominam processos gravitacionais em rocha, a classificação de Hungr et al. (2014) foi adaptada para a presente tese.

A seguir, estão descritos os esclarecimentos dos termos traduzidos empregados no presente estudo. Por exemplo, os autores podem optar por traduzir "slide" como "escorregamento" ou "deslizamento", ambos os termos são sinônimos e, no presente trabalho, optou-se por aplicar o termo "deslizamento" para esse tipo de processo gravitacional. Por esse motivo, os termos originais são citados entre parênteses em todas as descrições sumarizadas nesta parte da tese.

É importante ressaltar que certos materiais geológicos encontram-se na fronteira entre solo e rocha, em particular os saprólitos. Estes materiais combinam propriedades físicas semelhantes às do solo, com resquícios de estruturas de rocha maciça, como estruturas de juntas e superfícies de cisalhamento desgastadas (Hungr et al., 2014). Essas condições ocorrem em maciços rochosos altamente intemperizados ou mecanicamente perturbados. As definições formais de cada tipo de movimento de massa apresentadas na Tabela 4 (1-32) podem ser encontradas no trabalho de Hungr et al. (2014). A seguir, são resumidos os tipos mais comuns de movimentos de massa em ilhas oceânicas de clima tropical.

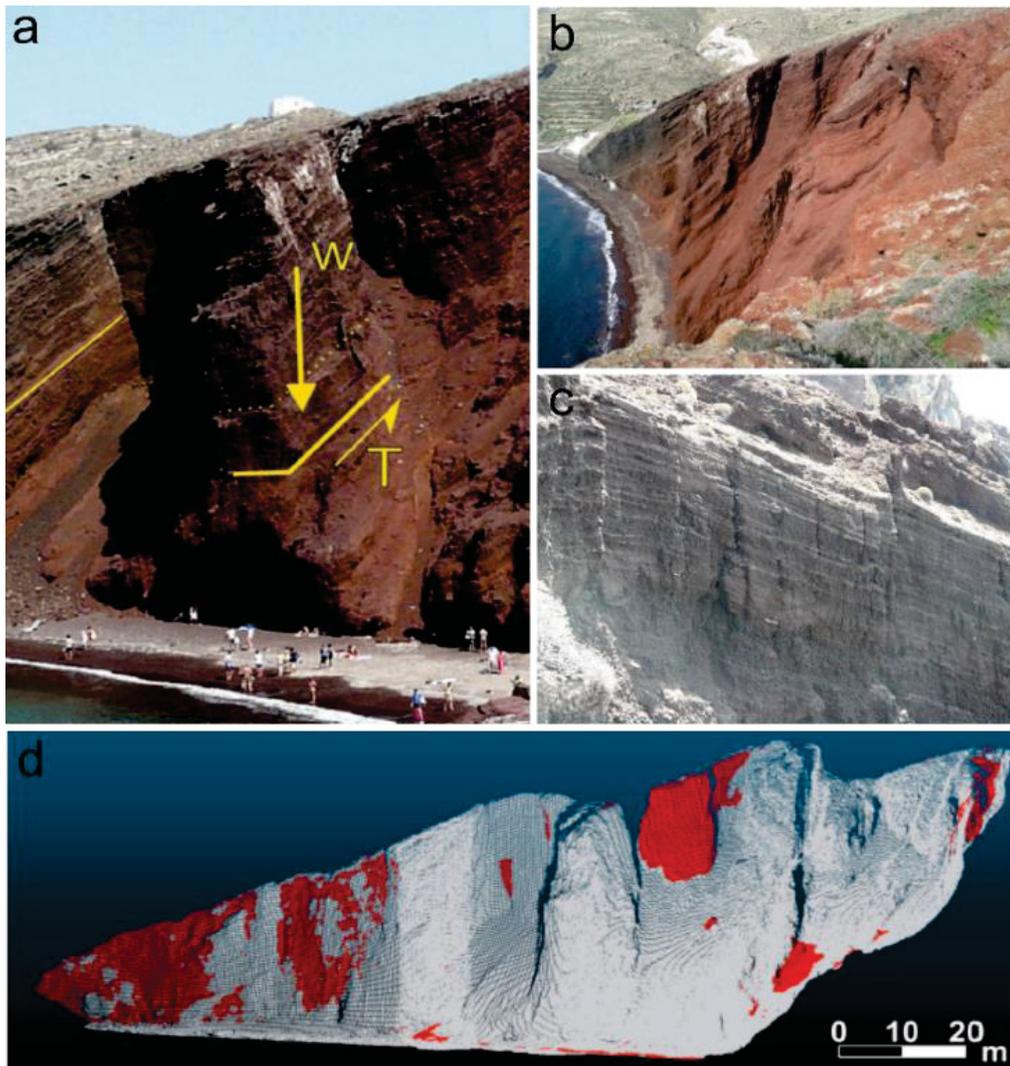


Fig. 10 – Processos erosivos associados a movimentos de massa gravitacionais, na ilha vulcânica Santorini, Grécia, na praia de *Red Beach*: a) exemplo de queda de bombas vulcânicas, devido à erosão diferencial que representa perigo para as atividades turísticas; b) taludes no cone de escória controlado por falhas, atribuído aos processos erosivos, intempéricos e à baixa resistência das rochas; c) evidência da natureza friável das rochas piroclásticas, em conjunto com as múltiplas rachaduras (*tensile cracks*) ampliadas devido aos processos erosivos; e d) movimentos de queda de rochas e erosão destacados em vermelho, ao longo da praia, a partir de análise temporal com dados obtidos via geotecnologias (modificado de Marinos et al., 2017).

Tabela 4: Resumo da nova versão proposta do sistema de classificação de movimentos de massa gravitacionais. As palavras em itálico são marcadores (deve-se usar apenas um tipo) (modificado de Hungr et al., 2014).

Tipo de movimento	Rocha	Solo
Queda	1. Queda de <i>rocha/gelo</i> ^a	2. Queda de <i>bloco/detrito/silte</i> ^a
	3. Tombamento de blocos de rocha ^a	5. Tombamento de <i>cascalho/areia/silte</i> ^a
Deslizamento	4. Tombamento flexural de rocha	
	6. Deslizamento rotacional de rocha	11. Deslizamento rotacional de <i>silte/argila</i>
	7. Deslizamento planar de rocha ^a	12. Deslizamento planar de <i>silte/argila</i>
	8. Deslizamento em cunha de rocha ^a	13. Deslizamento de <i>cascalho/areia/silte</i> ^a
	9. Deslizamento composto de rocha	14. Deslizamento composto de <i>areia/silte</i>
	10. Deslizamento irregular de rocha ^a	
Espalhamento	15. Espalhamento de rocha em encostas	16. Espalhamento pela liquefação de <i>silte/argila</i> ^a
		17. Espalhamento de argila sensível ^a
Fluxo	18. Avalanche de <i>rocha/gelo</i> ^a	19. Fluxo seco de <i>areia/silte/detritos</i>
		20. Fluxo deslizando de <i>areia/silte/detritos</i> ^a
		21. Fluxo deslizando de argila sensível ^a
		22. Fluxo de detritos ^a
		23. Fluxo de lama ^a
		24. Inundação de detritos
		25. Avalanche de detritos ^a
		26. Fluxo de terra
	27. Fluxo de turfa	
Deformação de encosta	28. Deformação em encostas montanhosas	30. Deformação da encosta de solo
	29. Deformação de encostas rochosas	31. Rastejamento de solo
		32. Solifluxão

^a Tipos de movimento que normalmente atingem velocidades extremamente rápidas, como definido por Cruden e Varnes (1996). Os outros tipos de deslizamentos de terra são na maioria das vezes (mas nem sempre) extremamente lentos a muito rápidos

3.3.2.1 Quedas e tombamentos (falls and topples)

- Queda de rocha (*rock fall*)

A principal característica das quedas de rocha (Fig. 11, 12 e 13) é que os fragmentos individuais se movem como corpos rígidos independentes e interagem com o substrato por meio de impactos episódicos, diferenciando-se das avalanches de rochas, que se movimentam em forma de fluxo como massas de fragmentos (Evans e Hungr, 1993; Turner e Schuster, 2013; Hungr et al. 2014). No entanto, segundo Hungr et al. (2014), existe uma transição entre avalanches e quedas, e alguns eventos podem ter características de ambos. De acordo com o autor, um episódio de avalanche, grandes fragmentos podem saltar e rolar por metros (ou até centenas de metros) adicionais ao local do depósito. O movimento desses fragmentos é considerado o mais perigoso, e por isso, é apropriado denominar todo o evento como queda de rocha (Hungr et al., 2014).



Fig. 11 – Exemplos de quedas de blocos: a) blocos de rochas caídos no local histórico de Monemvasia na Grécia (Saroglou et al., 2012); e b) queda de grandes blocos conglomeráticos na costa oeste da Ilha de Lefkada na Grécia (Tsangaratos et al., 2018).

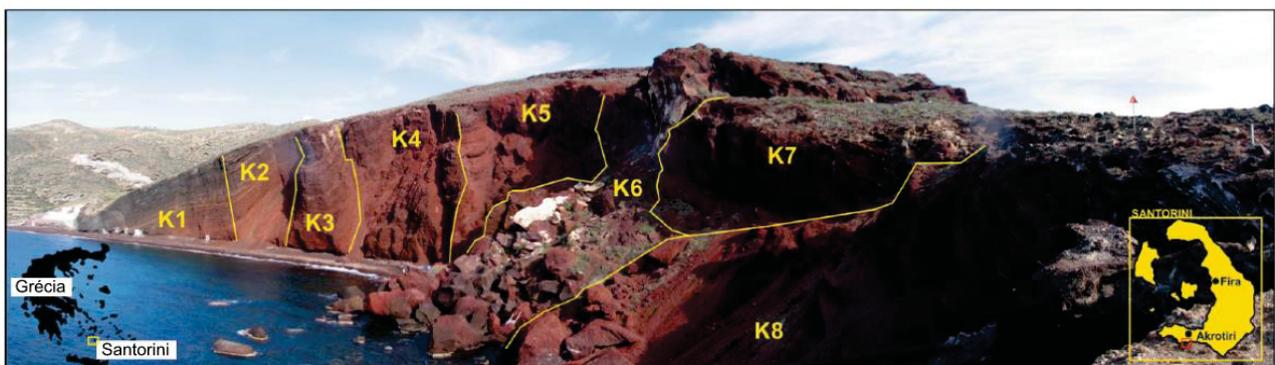


Fig. 12 – Falésias que apresentam quedas de rocha em Santorini, Grécia, na praia de *Red Beach*: a região k6 pode ser interpretada como evento misto de avalanche com quedas de rochas e as zonas (K1-K8) ilustram as potenciais áreas de queda de rochas (modificado de Marinou et al., 2017).

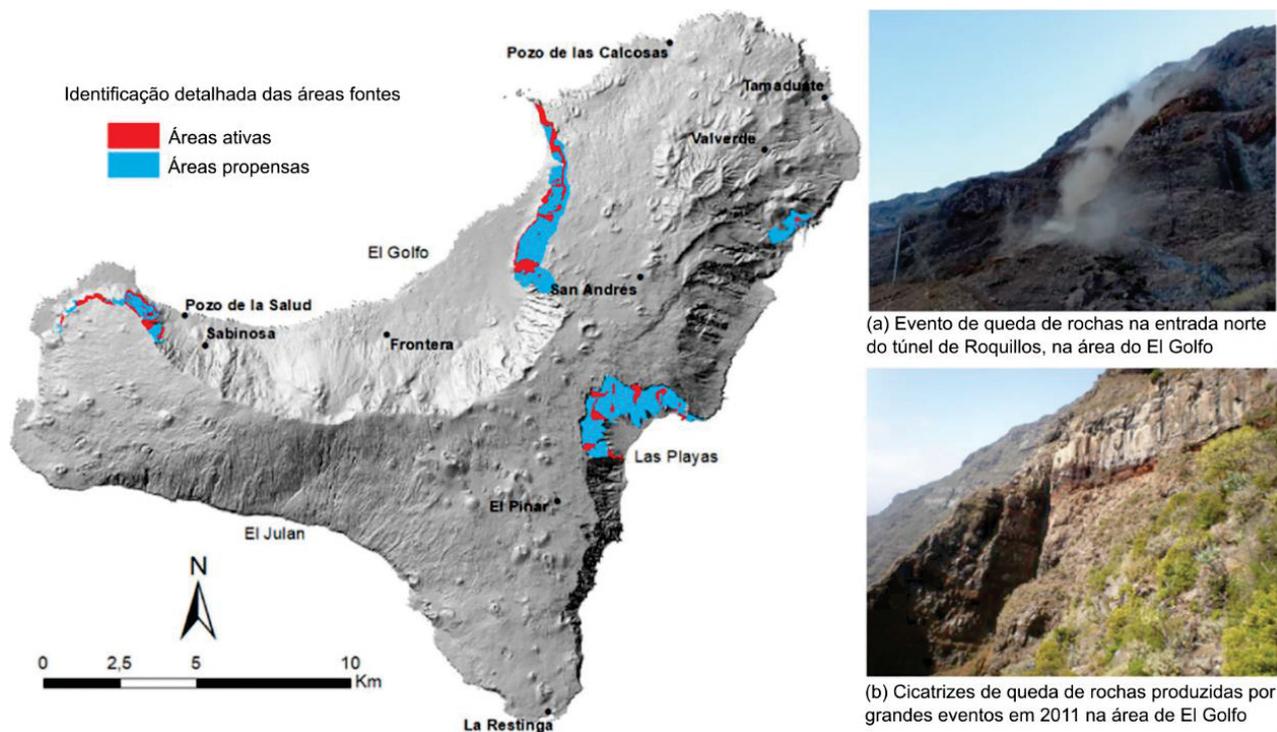


Fig. 13 – Mapa das áreas ativas e propensas à queda de rochas na região das Ilhas Canárias na Espanha (modificado de Rossi et al., 2021).

- Tombamento de blocos de rocha (*rock block topple*)

Os tombamentos de blocos, segundo Hungr et al. (2014), podem ser definidos como movimentos de rotação e tombamento de colunas ou placas de rochas, separadas por juntas de mergulho acentuado, que ocorrem em todas as escalas (Fig. 14). Conforme os autores, nesse tipo de processo, a rocha é relativamente maciça e a rotação ocorre em descontinuidades basais bem definidas. O movimento pode começar lentamente, mas o último estágio de ruptura pode ser extremamente rápido e perigoso, e a rotação do bloco é frequentemente iniciada pela pressão da água em fissuras tensionais, cedendo a uma base fraca ou por aceleração de terremotos (Hungr et al., 2014).

- Tombamento flexural de rocha (*Rock flexural topple*)

São movimentos de flexão e rotação de uma massa de rocha caracterizada pelo espaçamento estreito entre as juntas, com mergulho acentuado perpendicular à linha de queda da encosta (Hungr et al., 2014) (Fig. 15). Em contraste com o tombamento de blocos de rocha, o tombamento flexural tende a ser um processo lento com características dúcteis (Nichol e Hungr, 2002). A zona de curvatura máxima de flexão dos estratos pode desenvolver uma banda de cisalhamento, e o tombamento flexural pode ocasionalmente evoluir para um deslizamento rotacional, além disso, os desprendimentos parciais desse tipo de processo podem atingir taxas de movimento de proporções catastróficas (Hungr et al., 2014).

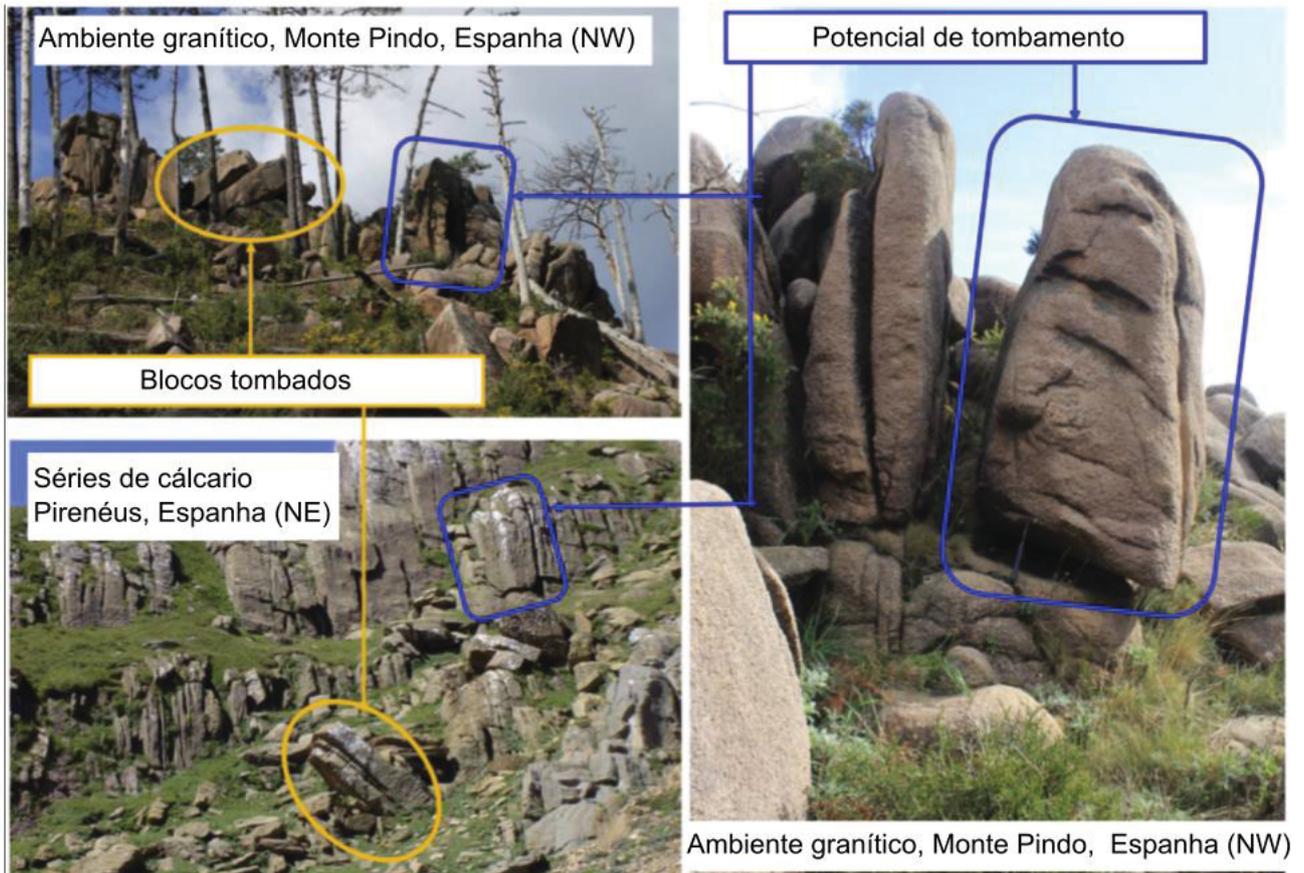


Fig. 14: Diferentes ambientes geológicos onde são observados blocos rochosos tombados (modificado de Pérez-Rey et al., 2021).

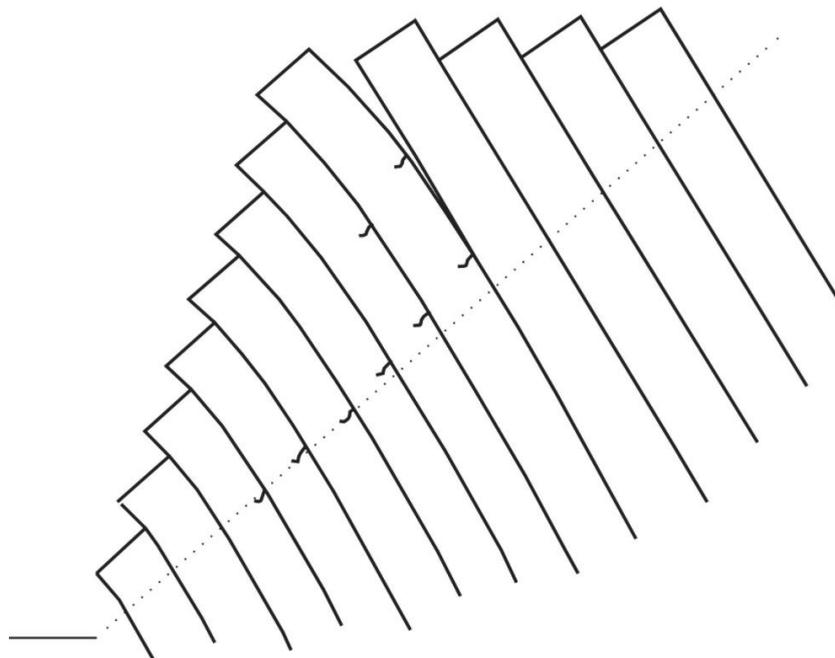


Fig. 15: Ilustração de uma ruptura durante o processo de tombamento flexural de rochas em encostas (Zheng et al., 2018).

3.3.2.2 Deslizamentos em rocha (*slides in rock*)

- Deslizamento rotacional de rocha (*Rock rotational slide*)

De acordo com Hungr et al. (2014), os deslizamentos rotacionais em rochas são definidos como o deslizamento de uma massa de rocha fragilizada sobre uma superfície cilíndrica ou outra superfície de ruptura rotacional que não é controlada estruturalmente (Fig. 16). Para os autores, sua morfologia é caracterizada por uma escarpa principal proeminente no topo da feição, uma deformação interna limitada e um movimento geralmente lento a moderadamente lento, devido ao mecanismo de rotação que pode ser autoestabilizante à medida que as forças gravitacionais motrizes diminuem com o aumento do deslocamento. Além disso, a massa rochosa fragilizada, tensionada pelo movimento rotacional, tende a falhar de forma dúctil (Hungr e Evans, 2004a). No entanto, existem algumas exceções. Por exemplo, se o deslizamento rotacional das rochas fragilizadas estiver sobrecarregado por uma espessa cobertura de rochas resistentes e quebradiças, essa condição pode induzir avalanches de rochas extremamente rápidas, pois parte das rochas da cobertura tombam ou deslizam ao longo das descontinuidades (Hungr et al., 2014).

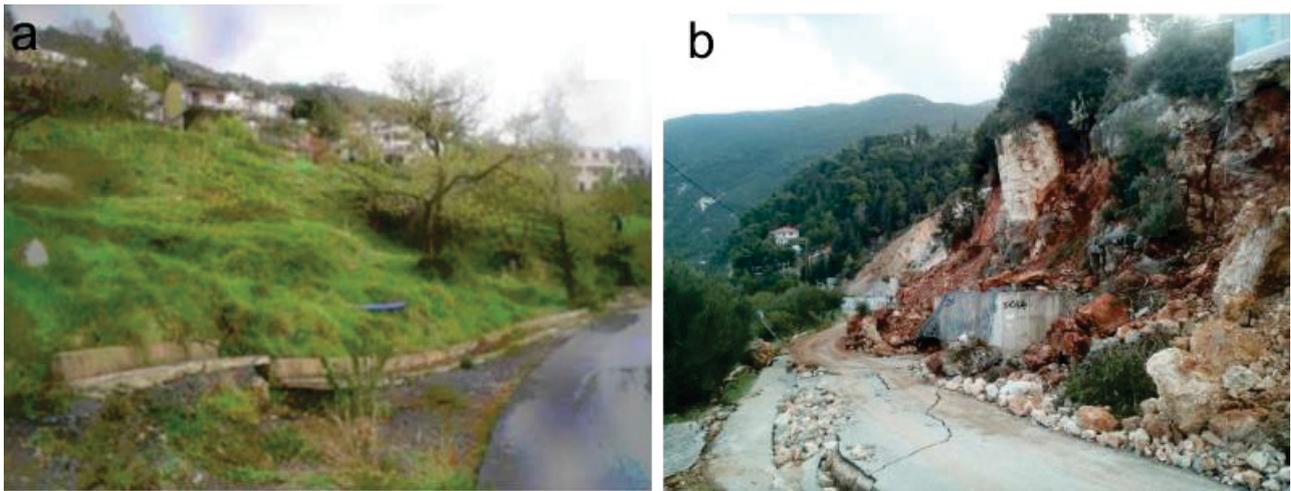


Fig. 16: Exemplos de deslizamentos rotacionais: a) ocorrido em rochas desgastadas das formações Flysch, na ilha grega de Creta, que danificaram a encosta durante a construção da estrada (imagem: Kouli et al., 2009); e b) ao longo de uma estrada na ilha de Lefkada, na Grécia (Ganas et al., 2015).

- Deslizamento planar (translacional) de rocha (*Rock planar slide*)

Esse tipo de movimento de massa gravitacional, segundo Hungr et al. (2014), pode ser definido como o deslocamento de uma massa de rocha sobre uma superfície planar de ruptura, com pouca ou ausência de deformação interna (Fig. 17). Conforme a definição dos autores, o topo do deslizamento pode se desprender de rochas estáveis ao longo de uma ruptura de tensão vertical profunda. Ao contrário do deslizamento rotacional, o mecanismo do deslizamento planar não é autoestabilizante e, geralmente, tende a ser extremamente rápido. Por isso, esses deslizamentos representam um dos tipos mais perigosos de movimentos de massa

gravitacional na superfície terrestre. Eles ocorrem em todas as escalas, principalmente em rochas sedimentares com acamamentos e dobras, rochas metamórficas que rompem ao longo dos planos de falha e em rochas intrusivas com juntas de alívio de tensão comuns em ilhas vulcânicas (Hungar et al., 2014).

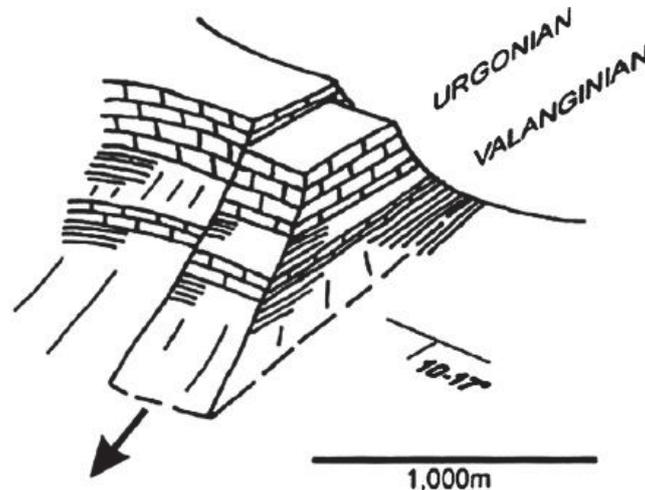


Fig. 17: Ilustração de deslizamento translacional em rocha no Mont Granier (França). O esquema mostra o mecanismo de ruptura desse tipo de movimento de massa, no qual a superfície vertical de separação 'atrás' do bloco móvel é um componente de tensão (Hungar et al., 2014, adaptado de Cruden e Antoine, 1984).

- Deslizamento em cunha de rocha (*Rock wedge slide*)

O deslizamento em cunha ocorre quando uma massa de rocha desliza ao longo da superfície de ruptura formada por dois planos, cuja intersecção é orientada para jusante da encosta, não apresentando deformação interna e, geralmente, esses deslizamentos são movimentos extremamente rápidos (Fig. 18) que ocorrem em todas as escalas, embora predominem em escalas menores (Hungar et al., 2014). Os mecanismos dos deslizamentos em cunha são análogos aos deslizamentos planares, no entanto, diferenciam-se pelo aumento das forças estabilizadoras devido ao formato em cunha (Hungar et al., 2014). Esse aumento é influenciado pela altitude dos planos que controlam o movimento, assim como pelas propriedades de resistência das descontinuidades e pela pressão das porosidades (Hoek e Bray, 1981).

- Deslizamento composto em rocha (*Rock compound slide*)

É um movimento de massa gravitacional comum em rochas sedimentares ou rochas vulcanoclásticas que apresentam características extremamente frágeis (Hungar et al., 2014). Esse tipo de deslizamento é caracterizado pelo deslocamento de uma massa de rocha sobre uma superfície de ruptura constituída por vários planos ou por uma superfície de curvatura desigual e, na parte superior, apresenta típicas feições de *horst* e *graben*, além de inúmeras superfícies de cisalhamento secundárias (Hungar et al., 2014) (Fig. 19). Os deslizamentos compostos podem ser lentos ou rápidos. O mecanismo mais comum está relacionado a uma superfície de ruptura horizontal ou levemente inclinada, que segue um

plano de fraqueza na estratigrafia da encosta exposta às intempéries, mesmo estando na base da sequência (Hutchinson, 1988).

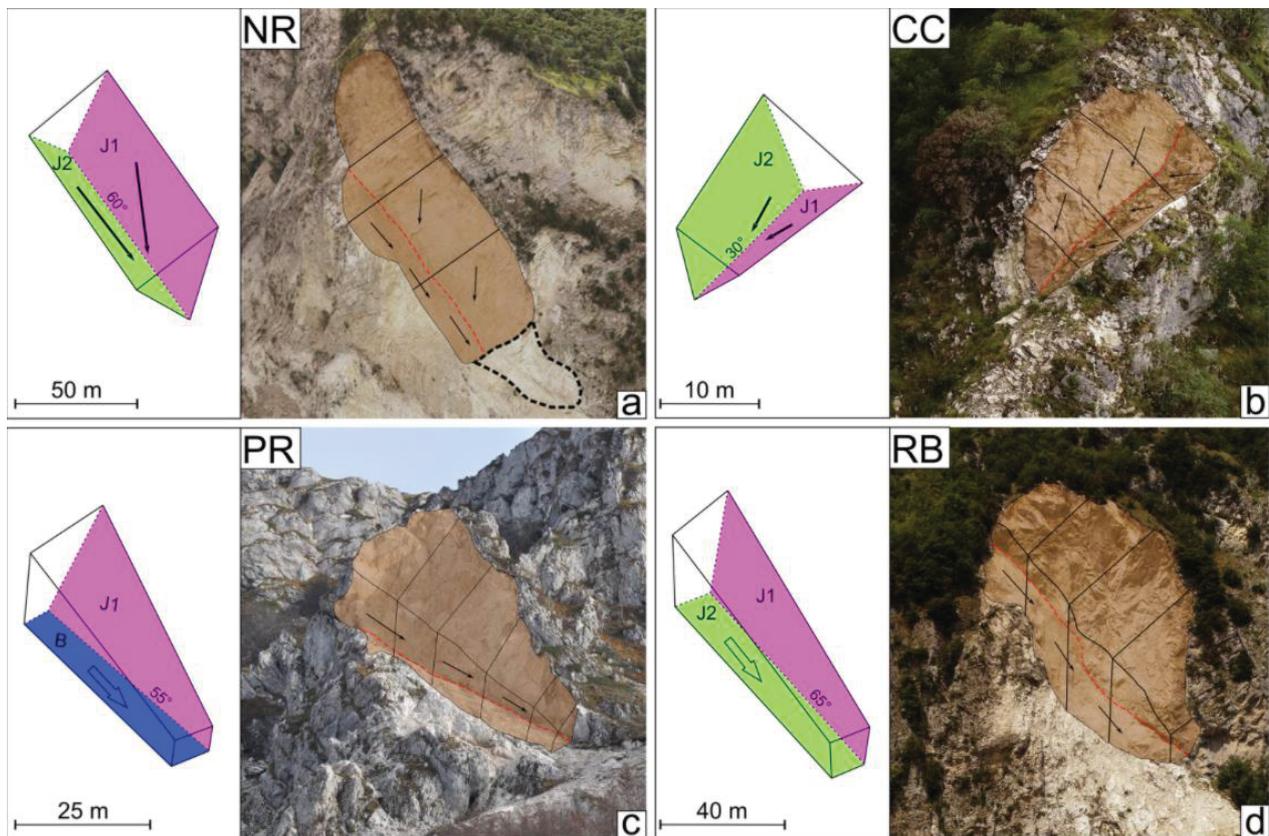


Fig. 18: Modelos geométricos simplificados de deslizamentos de rochas desencadeados por terremotos na Itália Central entre 2016 e 2017: a) Nera (NR) - a superfície irregular branca, contornada com uma linha tracejada, corresponde a uma provável falha através da massa rochosa intacta; b) Costa Cattiva (CC); c) Pi'e La Rocca (PR); e d) Rubbiano (RB) (Forte et al., 2021).

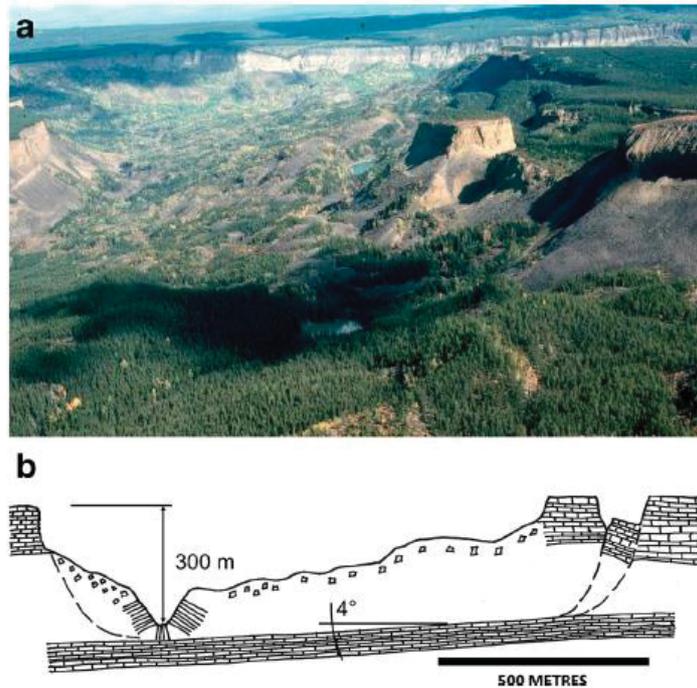


Fig. 19: Exemplo de deslizamento composto: (a) na planície de Liard, na região das Montanhas Rochosas canadenses; e (b) seção transversal esquemática. Observa-se a estrutura de horst e graben no topo do deslizamento, indicando um deslocamento quase horizontal do bloco de horst ao longo da superfície basal. Na região, o ângulo de atrito na superfície mais fraca é quase horizontal e, como mostrado na figura, esse pequeno mergulho regional da camada resultou na assimetria do vale (Hungri et al., 2014, adaptado de Gerath e Hungri, 1993).

- Deslizamento de rocha irregular (*Rock irregular slide*)

Este tipo de movimento de massa gravitacional também pode ser denominado como colapso de rocha (*rock collapse*) (Fig. 20). De acordo com Hungri et al. (2014), o movimento ocorre em encostas íngremes a partir de uma superfície de ruptura irregular com inúmeras descontinuidades, orientadas aleatoriamente, que são separadas por segmentos de rochas intactas (pontes de rochas). Segundo os autores, a estabilidade do talude depende da extensão e resistência das pontes de rochas, que falham à medida que as fissuras de ruptura se propagam ou ocorre o cisalhamento, podendo estar associados a elementos de tombamento. Esses deslizamentos ocorrem em rochas extremamente resistentes, com estruturas não sistemáticas, sendo essencial a presença dessas descontinuidades, uma vez que rochas resistentes em pouca profundidade raramente são tensionadas perto da falha (Hungri et al., 2014). Os mecanismos de falha são complexos e muitas vezes difíceis de descrever. O monitoramento contínuo torna-se necessário para gerenciar o desenvolvimento desse tipo de movimento. Por fim, são deslizamentos repentinos e extremamente rápidos, englobando a categoria de eventos catastróficos (Hungri et al., 2014).



Fig. 20: Exemplo de colapso de rocha em Preonzo, Suíça (Hungri et al., 2014).

3.3.2.3 Deslizamento em solo (*slides in soil*)

- Deslizamento de cascalho/areia/silte (*Gravel/sand/debris slide*)

Este tipo de deslizamento é composto por material granular e ocorre em uma superfície rasa e plana, disposta paralelamente ao terreno. A massa deslizante pode ocorrer em regiões de colúvios ou solos, bem como em depósitos piroclásticos que deslizam sobre um substrato mais resistente, como derrames de lava (Hungri et al., 2014). A maioria dos deslizamentos de detritos são um fator inicial para avalanches de detritos ou fluxo de detritos, já que após percorrerem pequenas distâncias podem se transformar em movimentos extremamente rápidos, sendo raro que o deslizamento falhe de forma dúctil e permaneça próximo ou na área fonte (Hungri et al., 2014).

Os deslizamentos planares rasos são frequentemente desencadeados por eventos de chuvas intensas, caracterizados por alta pluviosidade e intensidade em um curto período de tempo, como por exemplo, 900 mm durante um período de 3 dias, com uma intensidade de 400 mm/24h (Larsen e Wiczorek, 2006). Episódios de chuvas intensas têm uma correlação espacial com deslizamentos, sendo que a remoção da cobertura vegetal aumenta a densidade e a quantidade de material movimentado (Jakob, 2000). Deslizamentos translacionais frequentemente resultam em acúmulo de sedimentos grossos na base das encostas, que podem ser reativados pela erosão, infiltração de água ou tremores de terra (Fig. 21) (Hungri et al., 2014).



Fig. 21: Exemplo de avalanche de detritos em Cortenova, Itália, em 2002, com 1,2 milhões de m³ de detritos. O evento foi desencadeado pela reativação de um deslizamento translacional de detritos previamente depositados, devido a um período de intensa infiltração de água (Hungri et al., 2014).

3.3.2.4 Espalhamento (*spreading*)

- Espalhamento de rocha em encostas (*Rock slope spread*)

Pela definição de Hungri et al. (2014) o processo de espalhamento é o alongamento quase horizontal de uma massa de blocos rochosos coerente que compõem uma encosta. Segundo a compilação dos autores, este tipo de movimento ocorre devido ao deslocamento e rotação de blocos de rocha resistentes, resultante da deformação plástica intensa de um material subjacente frágil, como camadas horizontais de sequências sedimentares extremamente fracas (Fig. 22). Também pode ser influenciado por múltiplos deslizamentos anteriores controlados por uma superfície basal fraca e, geralmente, esses movimentos são lentos e têm um deslocamento limitado (Hungri et al., 2014).

Este tipo de espalhamento é um estágio transitório do fenômeno de deformação de encostas rochosas. Segundo Hungri et al. (2014), o termo "espalhamento" é aplicado quando uma parte significativa e bem definida da encosta sofre deslocamentos distintos, com uma superfície de ruptura claramente definida separando a zona móvel da zona estacionária. Por outro lado, o termo "deformação" é usado quando ocorre um aumento gradual da deformação plástica em profundidade.

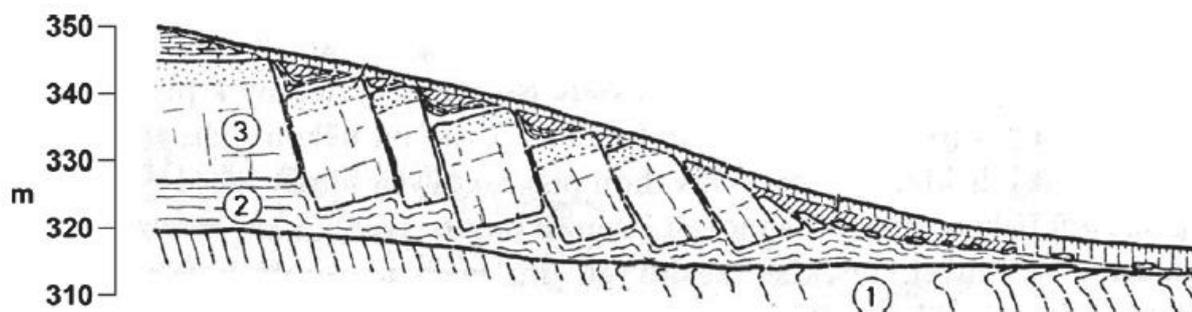


Fig. 22: Espalhamento lento de blocos areníticos, resultante da deformação profunda de um substrato xistoso frágil. 1 – filito, 2 – folhelho deformado e 3 – arenitos (Zaruba e Mencl, 1969).

3.3.2.5 Deslizamentos tipo fluxo (flow-like landslides)

- *Avalanche de rocha (rock avalanche)*

Hungr et al. (2014) destacam que avalanches de rochas são comuns em rochas ígneas resistentes, como basalto e fonolito. Trata-se de um movimento extremamente rápido e massivo, caracterizado pelo fluxo de rochas fragmentadas resultante de um grande deslizamento ou queda de rochas (Fig. 23). Esse processo gravitacional é também conhecido como "desabamento de rochas". As avalanches são entendidas como grandes deslizamentos de rochas que se desintegram rapidamente durante o movimento nas encostas, manifestando-se como fluxos extremamente rápidos de rochas fragmentadas (Hungr et al., 2014).

A mobilidade do movimento aumenta sistematicamente com o volume do evento, representado pelo seu volume seco durante a ocorrência. Isso ocorre devido à extensa fragmentação das rochas, que cria espaços de grandes dimensões que se comportam como grandes poros incapazes de serem preenchidos por água (Hungr et al., 2014). Por outro lado, existem registros de campo em que as avalanches se movem sobre camadas de materiais saturados, que, devido à carga dos detritos de rocha, podem ser arrastados (e liquefeitos) junto com o fluxo de rochas (Hungr et al., 2014).

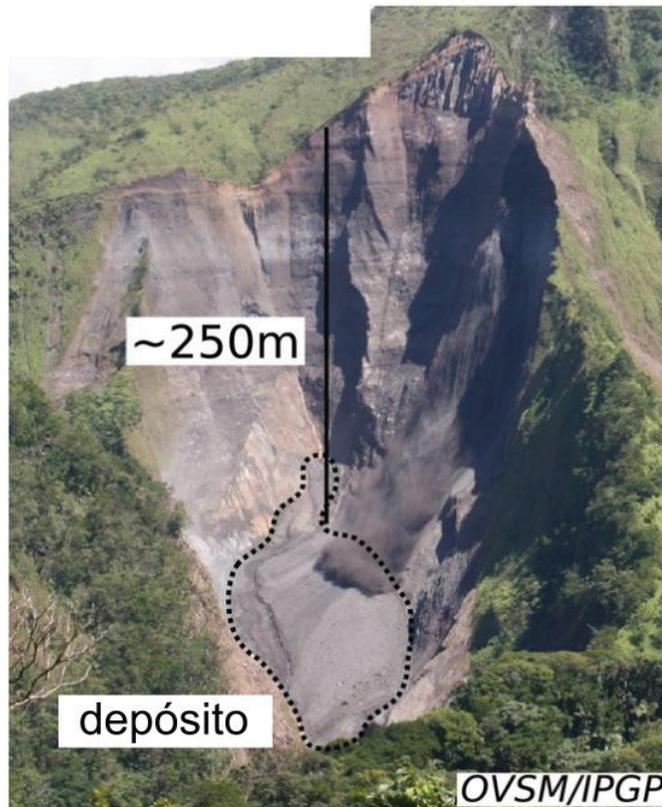


Fig. 23: Vista da encosta após um episódio de avalanche de rocha na Ilha Martinica, região do Caribe, em 2018 (modificado de Peruzzetto et al., 2022).

- Fluxo seco de areia/silte/detritos (*dry or non liquefied sand/silt/gravel/debris flow*)

De acordo com Hungr et al. (2014), este tipo de fluxo é um fenômeno que pode ocorrer de forma lenta ou rápida e pode se manifestar como um movimento seco e solto, úmido ou subaquático. O material envolvido geralmente é granular e pode ser selecionado ou não, sem apresentar excesso de poropressão. Os materiais secos granulares tendem a falhar ao longo de superfícies planares inclinadas nas encostas, e o mecanismo que explica o movimento ser do tipo fluxo refere-se à homogeneidade de resistência, onde o movimento do material granular está condicionado ao efeito de distorção devido ao cisalhamento, tornando-se fluido. Conforme destacado por Hungr et al. (2014), a ausência de mudanças de poropressão condiciona um movimento mais lento, uma vez que a diferença entre o ângulo de repouso máximo e mínimo é pequena e a perda de energia potencial é amplamente compensada pelo atrito.

Esse tipo de movimento de massa representa processos geomorfológicos significativos, como deslizamentos de depósitos de tálus e deslizamentos de areia em encostas de dunas. Além disso, existem modelos de fluxo granular seco que permitem estudar tanto a distância de escoamento observada quanto a morfologia distal. Esses modelos são úteis para investigar movimentos de massa em outros planetas, como Marte (Fig. 24), onde a presença ou ausência de água é comparativamente estudada (por exemplo, Shinbrot et al., 2004; Pelletier et al., 2008).

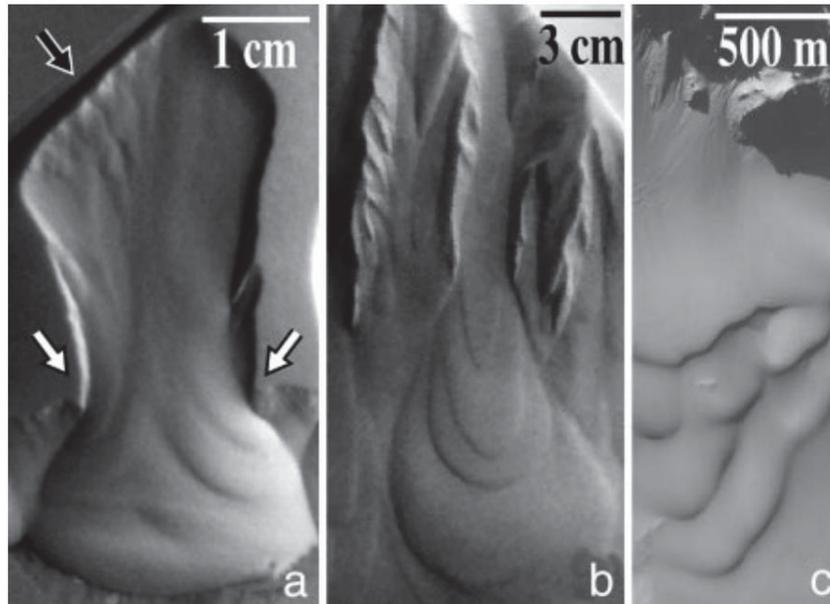


Fig. 24: Padrões de fluxo em grãos secos em condições de velocidade reduzida (Shinbrot et al., 2004).

- Avalanche de detritos (*debris avalanche*)

As informações a seguir foram extraídas de Hungr et al. (2014). Avalanches de detritos são processos comuns em detritos vulcanoclásticos⁶, caracterizados por movimento de fluxo superficial. Em termos de velocidade, eles variam de rápidos a extremamente rápidos em todas as escalas, podendo atingir facilmente 70 km/h em encostas florestadas com infraestrutura, como estradas e edificações. Essas avalanches ocorrem em detritos parcial ou totalmente saturados, em encostas íngremes, e não estão limitadas a canais estabelecidos. Ao contrário de um fluxo de detritos (*debris flow*), uma avalanche de detritos é um evento único que pode ocorrer em qualquer lugar da encosta. Essa distinção é crucial na seleção de metodologias durante estudos de perigos geológicos. No entanto, é comum que uma avalanche entre em um canal estabelecido, desestabilizando o material presente e levando ao progresso para um fluxo de detritos.

Mecanicamente, as avalanches de detritos são inicialmente deslizamentos de detritos, como deslizamentos de cascalho/areia/silte, e podem ocorrer em solos residuais, coluviais e piroclásticos. Além disso, há dificuldade em distinguir as avalanches de detritos dos flowslides. O processo de carregamento rápido e não drenado também pode desencadear avalanches de detritos, seja devido ao impacto de quedas de rochas ou ao deslizamento de rochas em encostas cobertas por solo. Uma vez iniciado, esse processo continua progressivamente à medida que o material desce pela encosta.

A previsão do volume potencial das avalanches de detritos requer estimativas da espessura da camada de arrastamento e das dimensões da superfície do trajeto do movimento. À medida que o movimento avança encosta abaixo, os trajetos geralmente se

⁶ Depósitos vulcanoclásticos, também conhecidos como rochas vulcanoclásticas, são formados a partir de processos vulcânicos primários ou por redeposição. Essas rochas são compostas parcial ou integralmente por fragmentos vulcânicos, resultantes de diversos mecanismos de formação de partículas, como piroclásticos, hidroclásticos, epiclásticos e autoclásticos (Fisher, 1961; Fisher e Smith, 1991). Os depósitos vulcanoclásticos são amplamente encontrados em ilhas vulcânicas, como a Ilha da Trindade, e podem ser considerados rochas vulcanosedimentares.

alargam, pois a carga não drenada de detritos desestabiliza uma largura crescente do segmento da encosta (Fig. 25). O ângulo de alargamento do caminho percorrido pelo movimento, conhecido como ângulo de ápice, pode variar de 5° a 50°, dependendo da profundidade do material (por exemplo, depósitos piroclásticos) e do ângulo de inclinação da encosta (Guadagno et al., 2005) (Fig. 25a). As catástrofes regionais geralmente são desencadeadas por tempestades, incluindo eventos ciclônicos (por exemplo, Crozier, 2005), ou por terremotos.

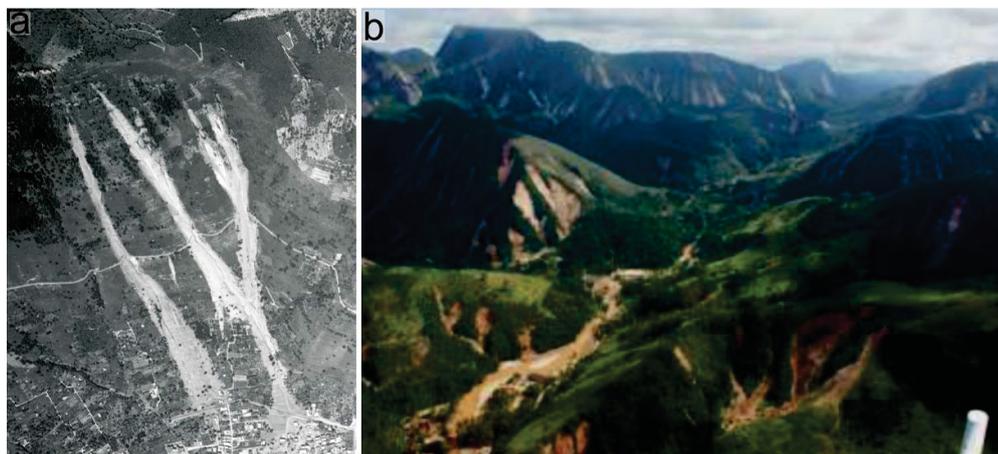


Fig. 25: Exemplos de avalanches de detritos: a) catástrofe em Siano, Itália, em 1988 (Hungur et al., 2014) e b) desastre na região serrana do Rio de Janeiro em 2011, que resultou em 1500 fatalidades (Avelar et al., 2011).

3.3.2.6 Deformação de encosta (*slope deformation*)

- Deformação de encostas montanhosas (*mountain slope deformation*)

De acordo com Hungur et al. (2014), a instabilidade de encostas em montanhas é um fenômeno de grande escala influenciado pela gravidade, resultando na deformação de encostas íngremes. Segundo os autores, esse processo é caracterizado por ser lento e quase imperceptível em escala humana e as deformações são evidenciadas por feições topográficas, tais como escarpas, bancos (*benches*), rachaduras, fendas (*trenches*), protuberâncias (*bulges*). As encostas montanhosas com relevo vertical de aproximadamente 1 km ou mais, compostas por maciços rochosos altamente tensionados, estão suscetíveis a apresentar deformações visíveis (Hungur et al., 2014).

Conforme Hungur et al. (2014), o termo "rastejo de encosta" (*slope creep*⁷) é frequentemente utilizado, porém o verdadeiro rastejo ocorre em materiais, especialmente em solos orgânicos, ou em rochas que perdem resistência devido à deterioração estrutural imediatamente antes da ruptura. Os autores ressaltam que as características de deformação gravitacional das encostas são frequentemente erroneamente identificadas como deslocamentos de falhas tectônicas. Nemčok (1982) apud Hungur et al. (2014) sugeriu que os estágios finais da deformação envolvem o desenvolvimento de superfícies de

⁷ Segundo Hungur et al. (2014), na Ciência dos Materiais, o termo "rastejo (*creep*)" é designado para o tempo desprezado de deformação sob tensão constante. Por outro lado, a aplicação do termo nos estudos de movimentos gravitacionais é ambígua.

ruptura discretas e deslizamentos por ruptura (Fig. 26). Existem casos em que encostas em diferentes estágios de deformação resultaram em grandes falhas.

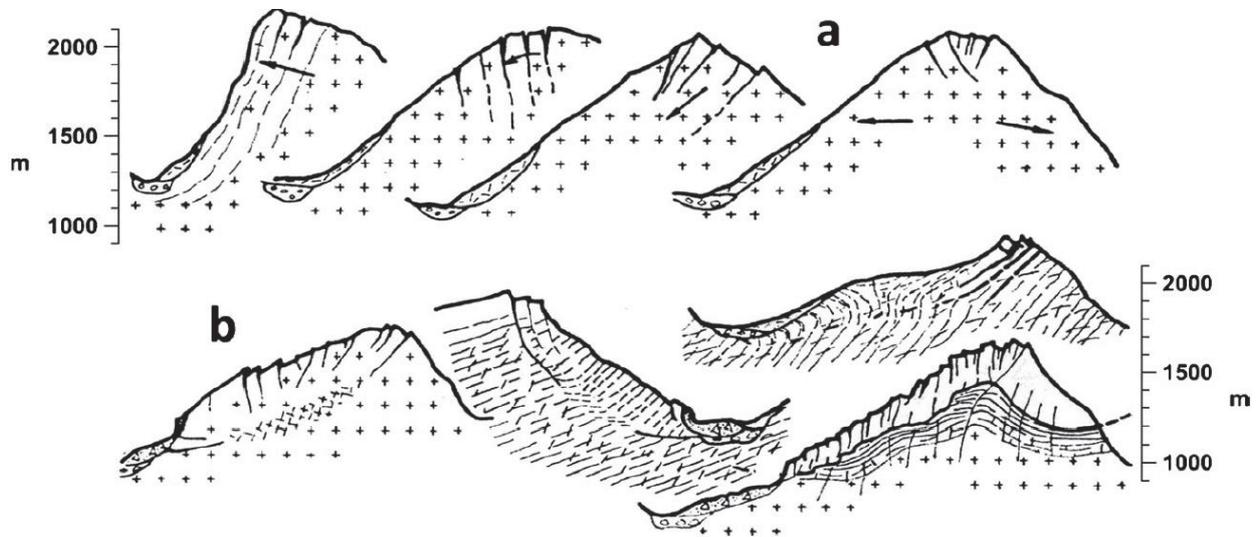


Fig. 26: Processo de deformação de encosta, descrito por Nemčok (1982), que ilustra a evolução temporal desse fenômeno, bem como as diferentes manifestações de deformação em encostas montanhosas: a) estágios iniciais; e b) estágios avançados (Nemčok, 1982 apud Hungr et al., 2014).

- Deformação de encostas rochosas (*rock slope deformation*)

Esse fenômeno refere-se a um tipo de movimento gravitacional que resulta na deformação de vales ou encostas de morros. Quanto à velocidade, o movimento ocorre em taxas lentas a extremamente lentas, caracterizando-se pelo afundamento das cristas das encostas e pelo desenvolvimento de rachaduras ou falhas, sem uma superfície de ruptura bem definida (Hungr et al., 2014) (Fig. 27).

O que diferencia a deformação de encostas rochosas do tipo deformação de encostas montanhosas (descrita na seção anterior) é a escala do movimento. Conforme Hungr et al. (2014), a deformação de encostas rochosas ocorre em encostas de algumas dezenas até centenas de metros de altura, compostas por rochas frágeis. Os autores destacam que é comum a deformação de encostas envolver a ruptura de rochas resistentes sobrepostas a camadas de rochas mais fracas (por exemplo, camadas argilosas), sendo classificada, nesses casos, como espalhamento de rochas nas encostas.

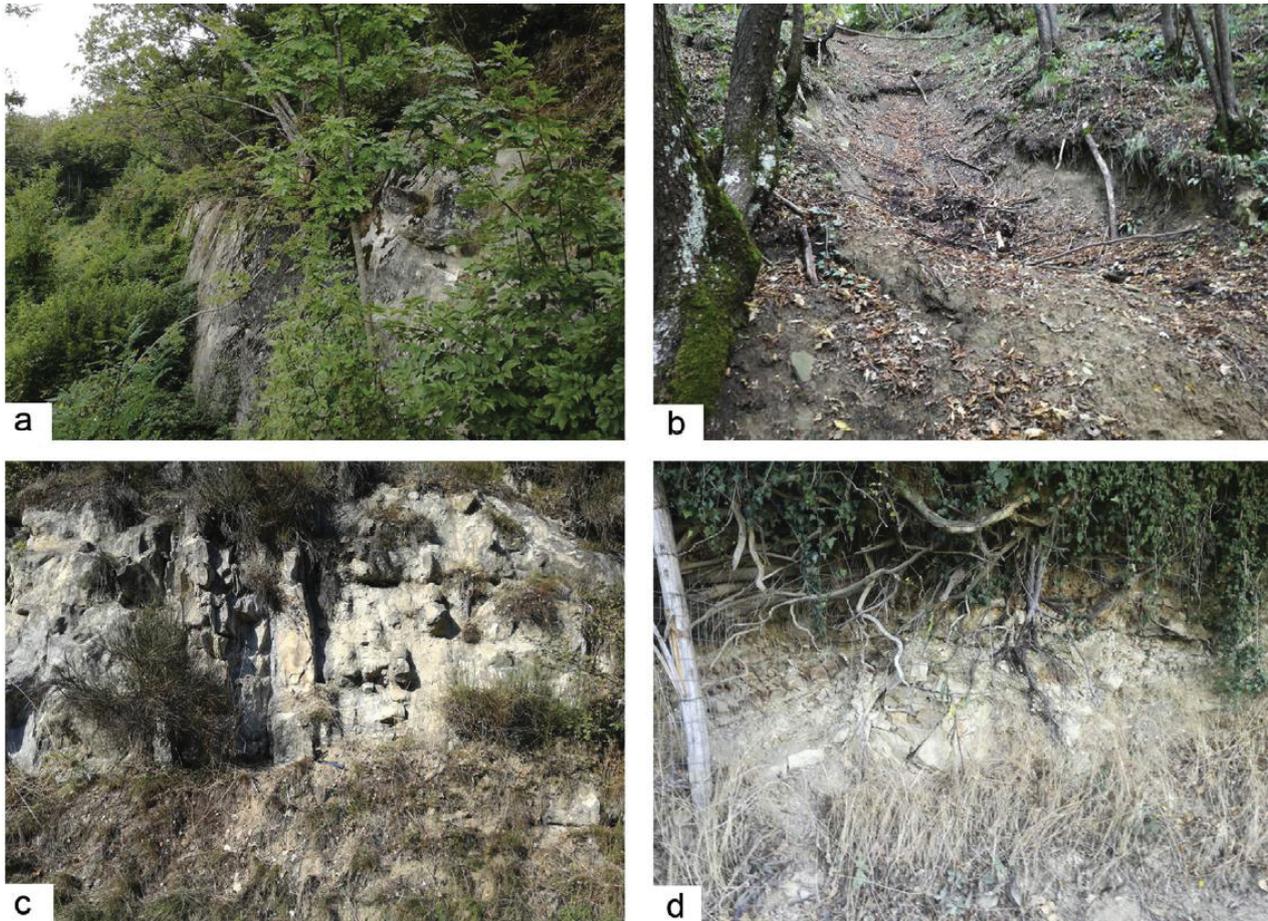


Fig. 27: Evidências de campo dos principais indicadores geomorfológicos de deformação de encostas rochosas na região dos Alpes centrais na Itália, conforme descrito pelos autores Martino et al. (2020): a) escarpa subvertical com maciço rochoso deformado; b) trincheira com zona de deformação; c) juntas regulares em maciço rochoso fora da zona de deformação; e d) maciço rochoso intensamente fraturado dentro da zona de deformação (Martino et al., 2020).

3.4 Inventário

Os inventários são utilizados para obter informações essenciais sobre a área de estudo, onde os atributos e dados podem ser obtidos por meio de diferentes procedimentos e métodos. De acordo com Zuquette e Gandolfi (2004), a função do inventário é registrar as características básicas dos componentes do meio físico, biológico e humano, levando em consideração a variação espacial dos atributos mapeados (Tabela 5).

Nos estudos sobre análise de perigo ou processos perigosos geológicos, como movimentos de massa gravitacionais e erosão, os inventários desempenham um papel crucial no entendimento da dinâmica desses processos, identificando suas causas e fatores desencadeantes (Guzzetti et al., 2012). A seleção da técnica de inventário, ou a combinação de várias técnicas, depende da finalidade do inventário, da extensão da área, da escala da investigação (incluindo mapas base e coleta de dados em campo), do tipo de dados disponíveis (por exemplo, ortofotos, imagens aéreas, dados LiDAR), da experiência dos pesquisadores e dos recursos (humanos e financeiros) disponíveis para a realização da pesquisa (Guzzetti et al., 2000; van Westen et al., 2006; Guzzetti et al., 2012).

Tabela 5: Atributos dos processos naturais associados ao meio físico que podem ser considerados nos inventários (Zuquette e Gandolfi, 2004).

Atributos	Caracterização	Formas de obtenção
Deposição (indícios de assoreamento)	Distribuição; Intensidade e volume	Fotointerpretação; Trabalho de campo
Sismicidade (intensidade)	Intensidade; Magnitude	Registros
Subsidência	Distribuição; Dimensões	Fotointerpretação; Trabalho de campo
Erosivos	Distribuição; Dimensões; Tipos	Fotointerpretação; Trabalho de campo
Alterações naturais nos canais de drenagem	Distribuição; Dimensões	Fotointerpretação; Trabalho de campo
Movimentos de massa	Distribuição; Tipos	Fotointerpretação; Trabalho de campo

Os inventários também são ferramentas valiosas para análises pré e pós-evento, como por exemplo, de deslizamentos induzidos por eventos de chuvas (Fig. 28). Os mapas de inventários são amplamente utilizados em análises temporais de movimentos de massa gravitacionais, nos quais são registrados dados sobre a data de ocorrência e o tipo de movimento, deixando cicatrizes discerníveis na área de estudo (Pašek, 1975; Hansen, 1984a, 1984b; McCalpin, 1984; Wieczorek, 1984; Guzzetti et al., 2000) (Fig. 29). Eles também podem ser utilizados para comparar resultados de diferentes métodos de obtenção do mesmo tipo de dado (Fig. 30). Além disso, os inventários são utilizados para caracterizar vários tipos de processos exógenos em uma mesma área de estudo, a fim de analisar fatores predisponentes, independentemente de sua natureza temporal (Fig. 31).

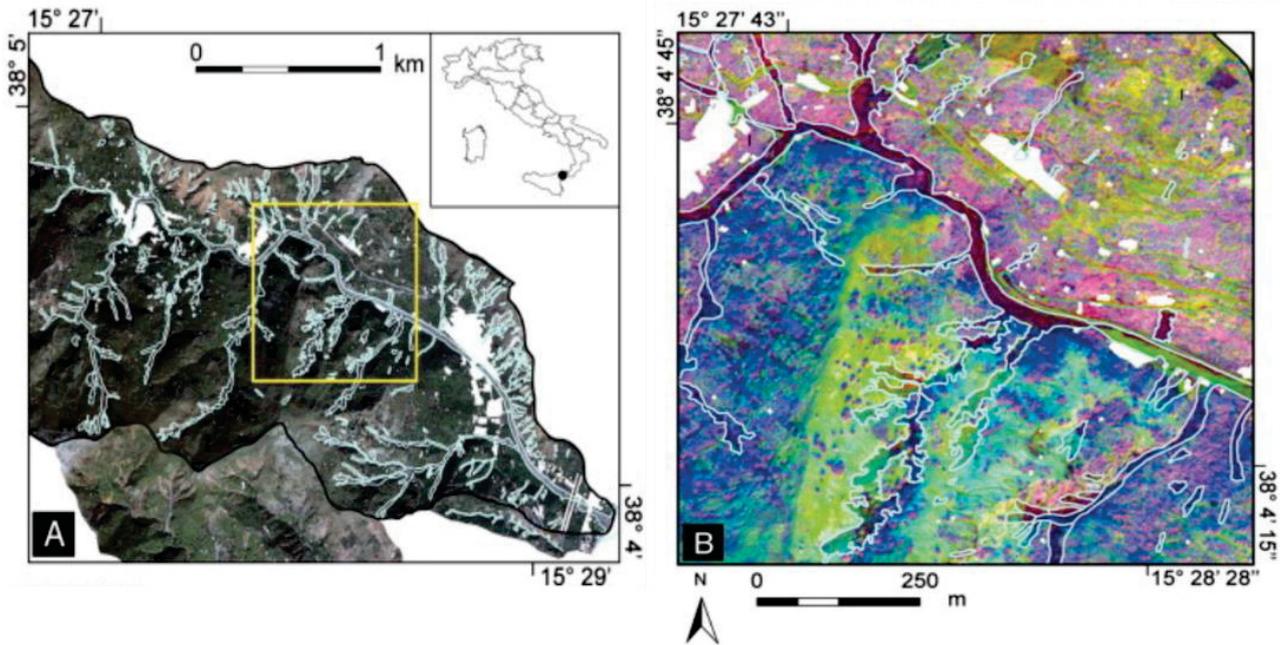


Fig. 28: Reconhecimento semiautomático de deslizamentos de terra rasos por meio de imagens ópticas de satélite, na região de Giampileri (Messina, Itália): a) bacia hidrográfica analisada; e b) ampliação mostrando a composição RGB, onde as áreas de deslizamentos são identificadas por cores distintas das áreas estáveis (modificado de Mondini et al., 2011).

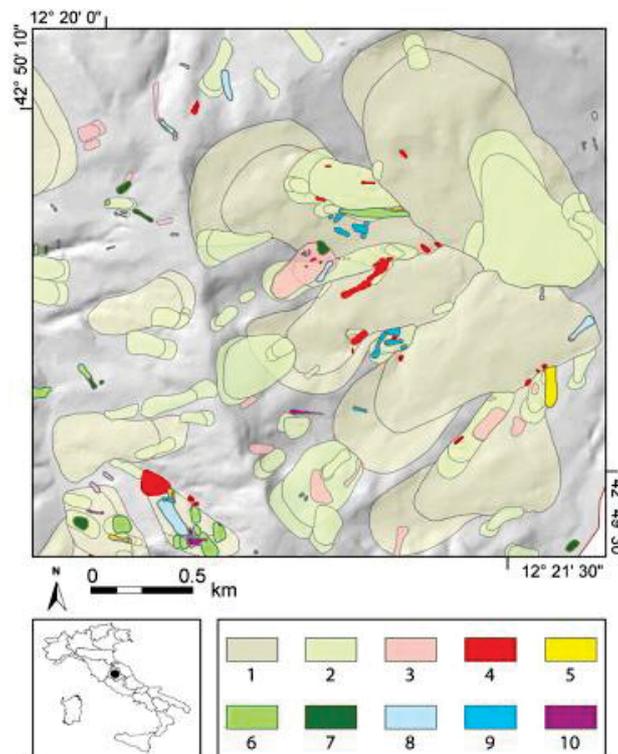


Fig. 29: Inventário de movimentos de massa gravitacionais em Monte Castello di Vibio (Umbria, Itália). Os autores compilaram o mapa utilizando um conjunto de fotografias aéreas de diferentes escalas, abrangendo o período entre 1941 e 1997, juntamente com levantamentos de campo realizados em 2010. As unidades numeradas de 1 a 10 representam deslizamentos de terra de diferentes idades (Guzzetti et al., 2012).

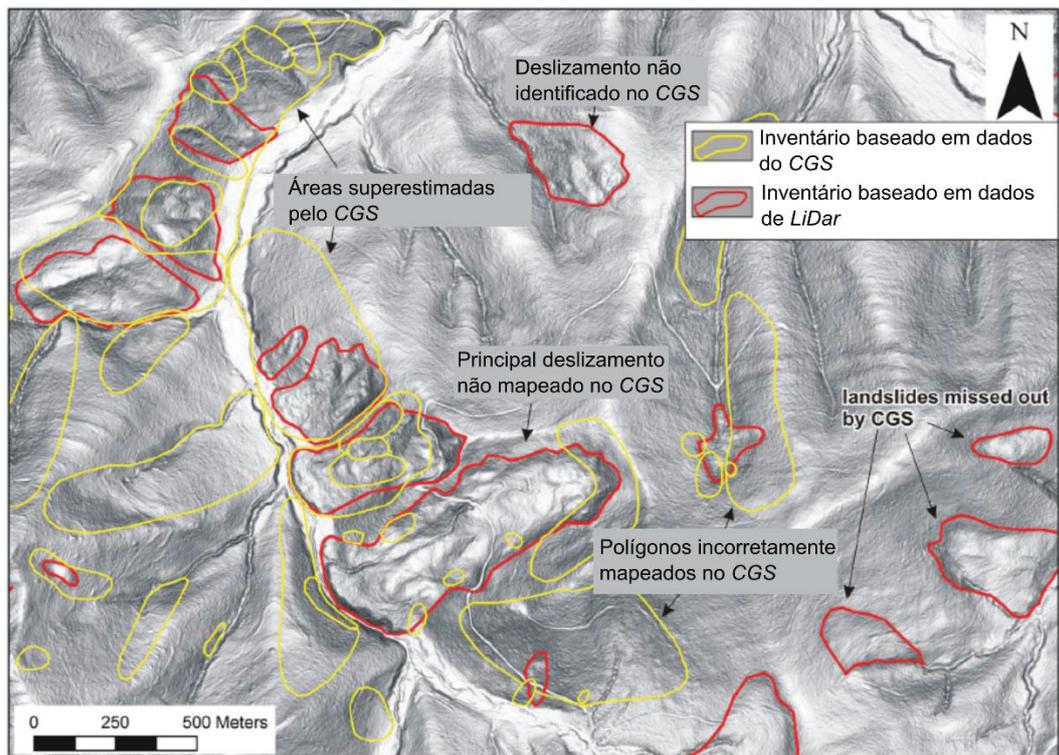


Fig. 30: Estudo comparativo de inventários de deslizamentos mapeados utilizando dados topográficos obtidos por LiDAR e dados mais antigos do *Czech Geological Survey (CGS)* (moficado de Pánek et al., 2019).

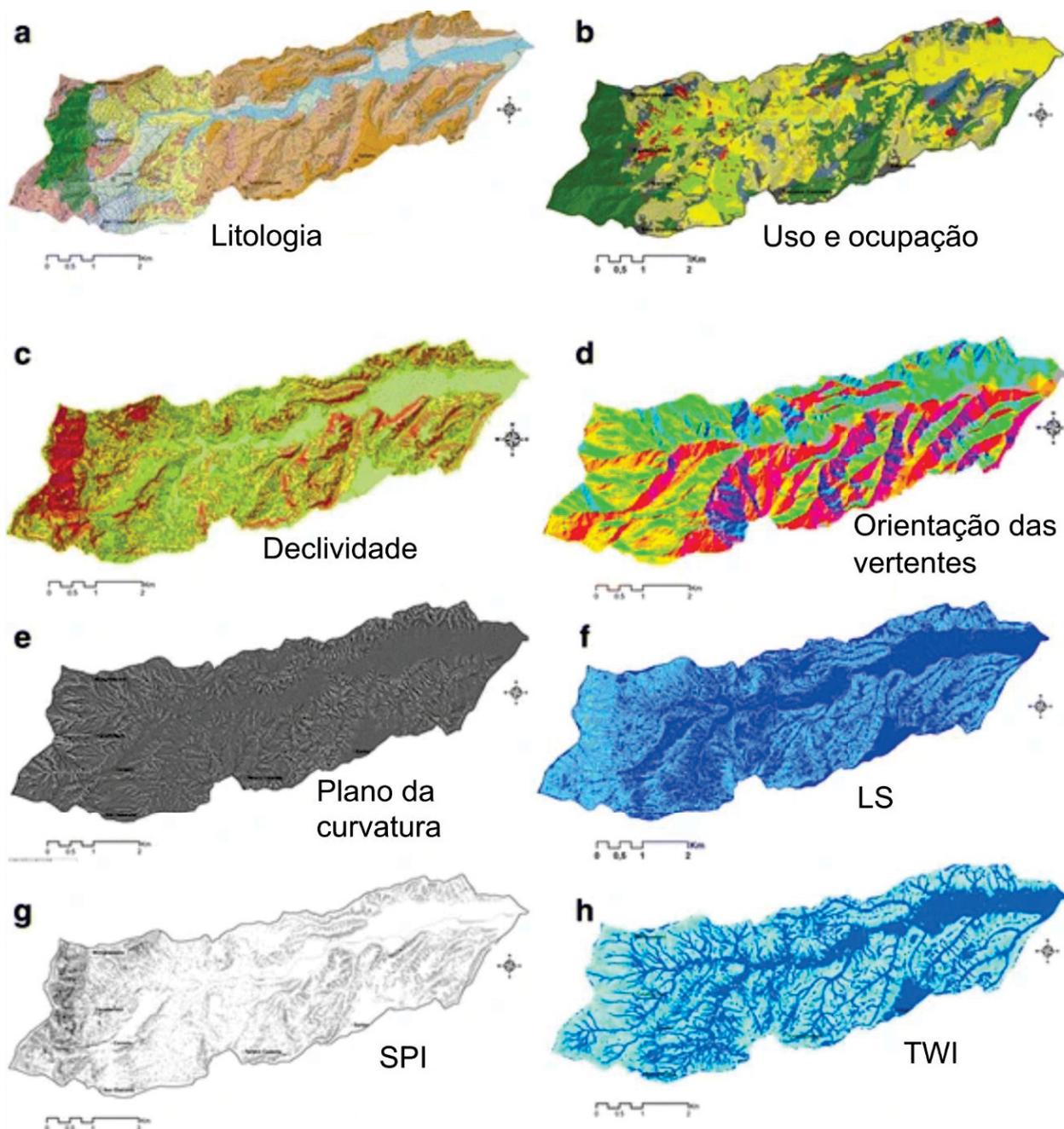


Fig. 31: Exemplo de inventário levantado a fim de obter atributos para estudo posterior de suscetibilidade de erosão linear em Turbolo (Itália) (Conforti et al., 2010). LS – *length-slope factor*; SPI – *stream power index*; TWI – *topographical wetness index*.

3.5 Modelos geológicos: aplicação na avaliação geológica-geotécnica e geoambiental

A modelagem de cenários geológicos é uma atividade crucial nas análises de geologia ambiental e é amplamente utilizada na geotecnia, como, por exemplo, em avaliações de perigos geológicos. Os perigos geológicos, no presente estudo, são entendidos como fenômenos naturais (como deslizamentos, enchentes e terremotos) que ocorreram ou têm potencial para ocorrer, sem prognóstico de ocorrência temporal, representando perigo para a vida humana e propriedades (ver item 3.1.2).

Os modelos têm como objetivo facilitar a análise de estudos que envolvem inúmeras variáveis. A seguir, serão abordados os principais aspectos relacionados ao uso de modelos geológicos, incluindo sua definição, tipos, hierarquia dos diferentes tipos, os eventos que serão considerados neste estudo e os respectivos modelos utilizados para tais eventos na literatura especializada.

3.5.1 O que são modelos geológicos?

Do ponto de vista filosófico, os modelos são utilizados como hipóteses e o termo "modelo" é empregado pelos cientistas para descrever variáveis em escalas físicas, desenhos, equações e simulações computacionais (Parry et al., 2013). De acordo com a *International Association for Engineering Geology and the Environment Commission - C25*, na geologia de engenharia, e conseqüentemente na geologia ambiental, o modelo é definido como uma aproximação da realidade criada com o propósito de resolver um problema. Em outras palavras, um modelo geológico é qualquer aproximação das condições geológicas em escalas variáveis para resolver questões de natureza geológica, como obras de engenharia, instabilidade de encostas e processos de superfície perigosos (Parry et al., 2013).

Essa abordagem para solucionar problemas não segue uma sequência padronizada de procedimentos, mas sim um ciclo contínuo em constante desenvolvimento, que utiliza modelos e métodos abrangentes. Assim como o método científico, essa abordagem inclui observação, definição de uma pergunta ou problema, pesquisa (planejamento, avaliação das provas atuais), formação de hipótese, predição a partir da hipótese (raciocínio dedutivo), experimentação (teste da hipótese), avaliação e análise, revisão e avaliação por pares e publicação (Parry et al., 2013).

A abordagem de modelos para estudos de geologia para engenharia começou com Morgenstern e Cruden (1977), que consideraram a complexidade geotécnica em três processos: a) processos genéticos, relacionados à formação original do material geológico; b) processos epigenéticos, resultantes da diagênese e deformação; e c) processos de resistência ao intemperismo. Já Stapledon (1982) introduziu a abordagem do diagrama de fluxo de trabalho, na qual os modelos geológicos geotécnicos devem refletir o entendimento da geologia regional, da história geológica e da descrição geológica detalhada da área de estudo em termos quantitativos.

3.5.2 Tipos e hierarquia dos diferentes tipos de modelos geológicos

A seguir, estão resumidas as principais distinções e hierarquia entre os modelos mais utilizados (Fig. 32), assim como as aplicações para estudos de processos erosivos e gravitacionais, que são o foco do presente estudo.

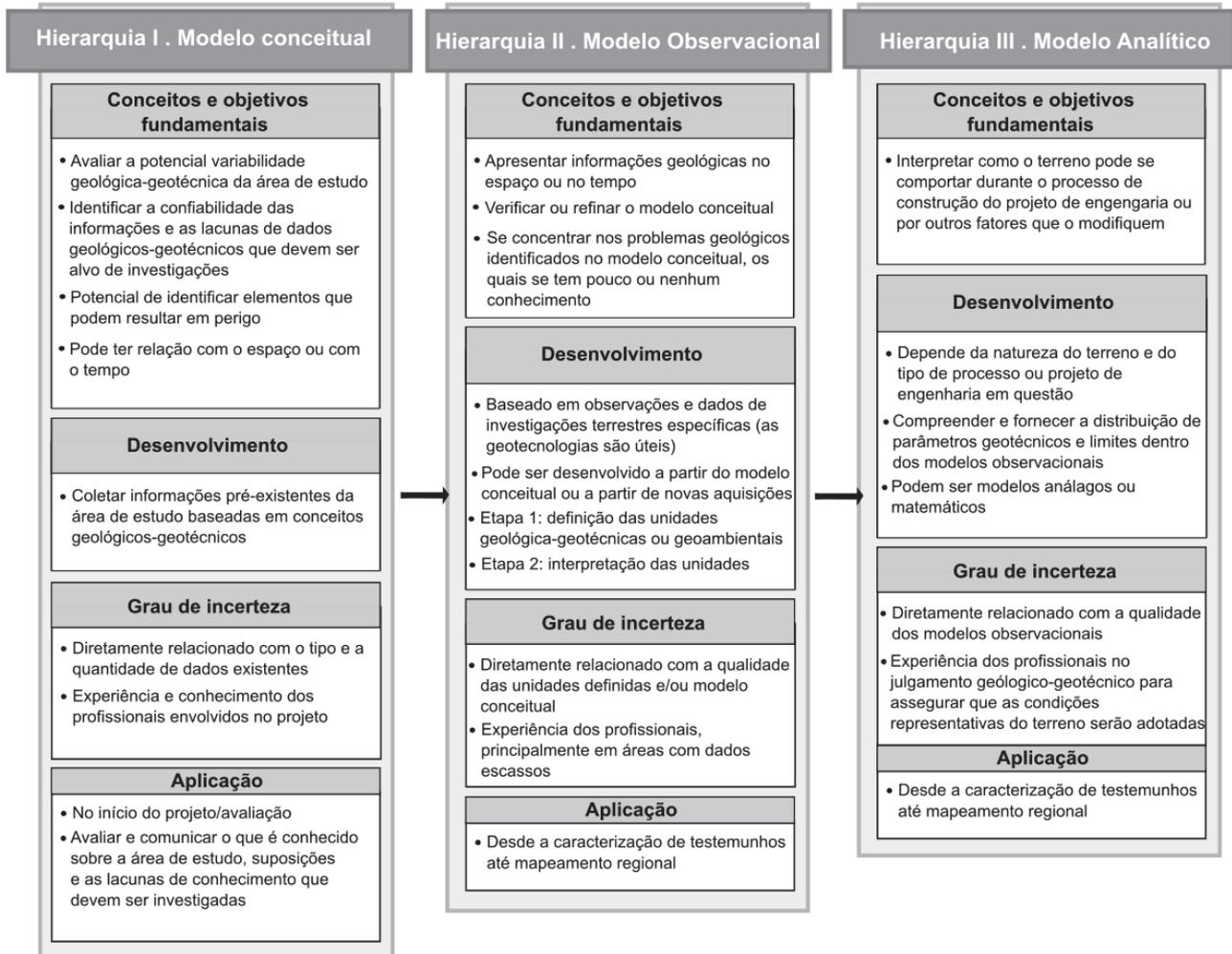


Fig. 32: Esquema que resume os principais tipos de modelos, suas respectivas hierarquias e definições. Os conceitos e definições foram adaptados da *International Association for Engineering Geology and the Environment Commission (C25)*.

3.5.2.1 Modelo conceitual (Hierarquia I)

Essa é a primeira etapa de desenvolvimento de um projeto ou avaliação. A abordagem conceitual é geralmente baseada em dados pré-existentes, como mapas geológicos, mapas topográficos, imagens de sensoriamento remoto e literatura especializada na área (Parry et al., 2013). Para compreender a história geológica de um local e criar um modelo geológico específico, é necessário considerar a geologia regional, a geologia local, os aspectos geomorfológicos e as condições atuais da superfície do terreno (Fookes et al., 2000).

Esta estratégia envolve a avaliação sistemática das variáveis do modelo conceitual e pode incluir, de acordo com Parry et al. (2013): a) Identificação das principais unidades geológicas e suas correlações estratigráficas, bem como a identificação da variabilidade espacial das propriedades geológicas-geotécnicas de cada unidade, juntamente com seus respectivos mecanismos (características ou processos geológicos); b) Identificação dos regimes de tensão atuais e passados, e como esses regimes se relacionam com as estruturas geológicas e as condições do terreno; c) Análise do histórico e das previsões futuras do clima e das condições ambientais gerais (por exemplo, vegetação) e dos processos associados, para avaliar como essas variáveis afetam o terreno, ou seja, a evolução geomorfológica da área de estudo; d) Identificação dos problemas geológicos que podem afetar a área, como deslizamentos ou terremotos, e uma estimativa de sua gravidade;

Os modelos conceituais podem ser divididos em dois grupos, de acordo com Parry et al. (2013): a) Relacionados ao espaço: informações extrapoladas do conhecimento pré-existente do ambiente e dos processos geológicos da área de investigação (Fig. 33 e 34). b) Relacionados ao tempo: ilustram a evolução geológica de um local ou os processos geológicos específicos relevantes para a investigação (Fig. 35).

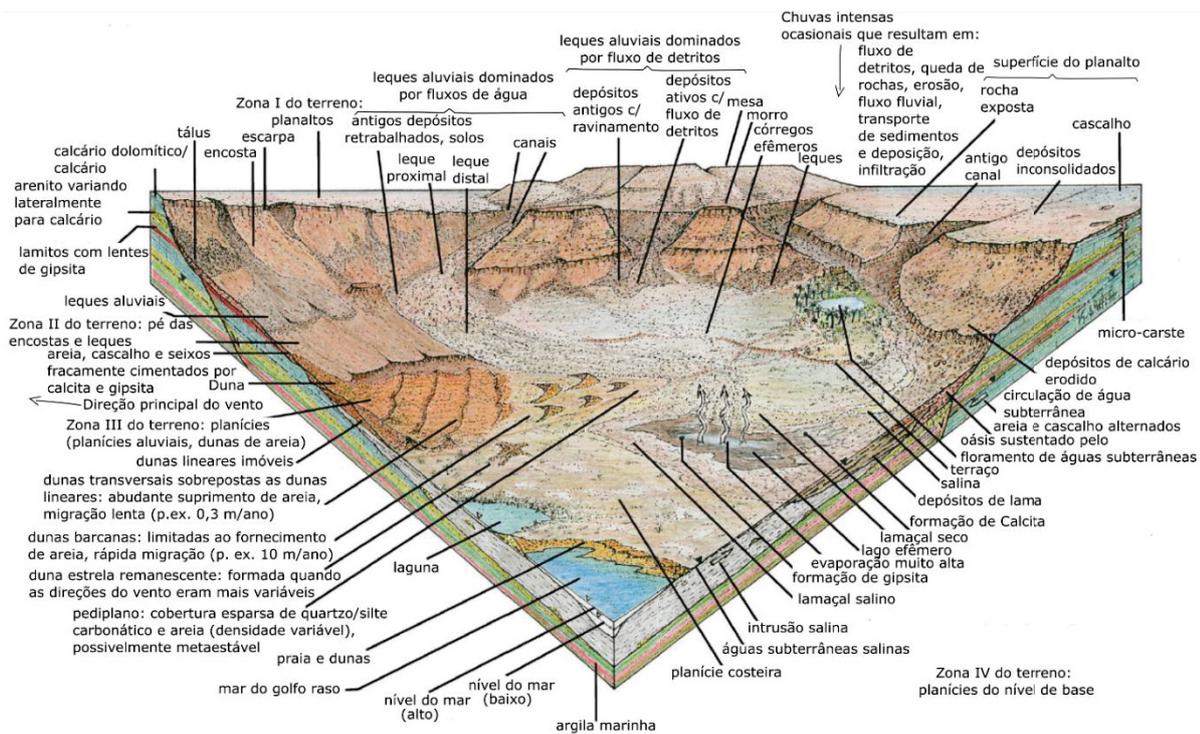


Fig. 33: Modelo conceitual com enfoque na variação espacial dos elementos fundamentais (modificado e simplificado de Fookes et al., 2007).

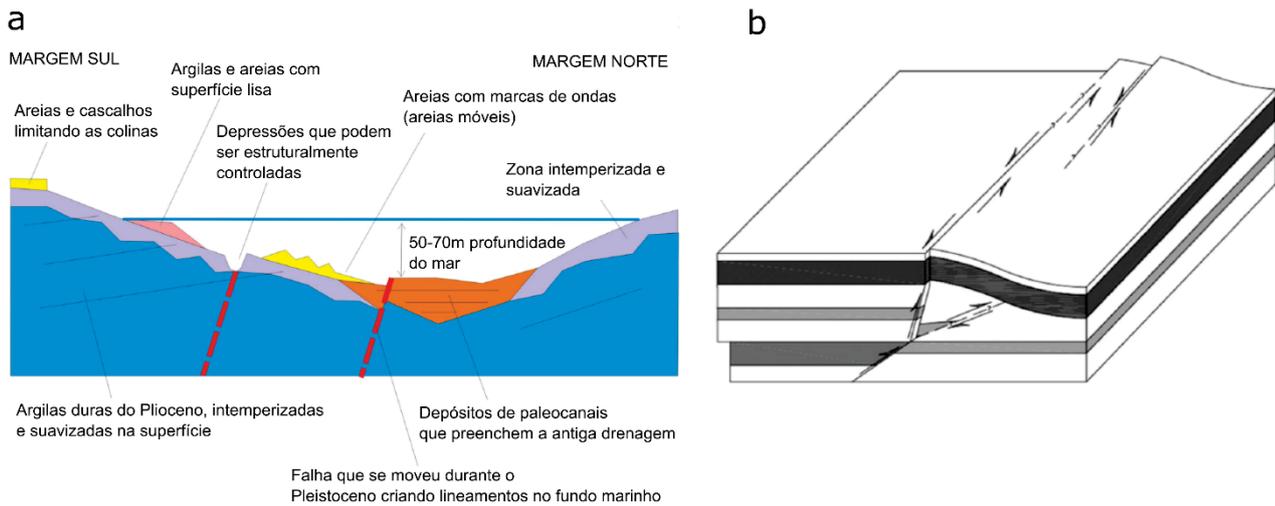


Fig. 34: Modelos conceituais focados na distribuição espacial dos elementos: a) Modelo utilizado para comunicar de forma simplificada a distribuição offshore de fundações e os riscos que podem ser antecipados em uma investigação em andamento; e b) Modelo de estratos sedimentares utilizado para comunicar a geometria das falhas em uma área sismicamente ativa para um público não especializado em geologia (modificadas de Parry et al., 2013).

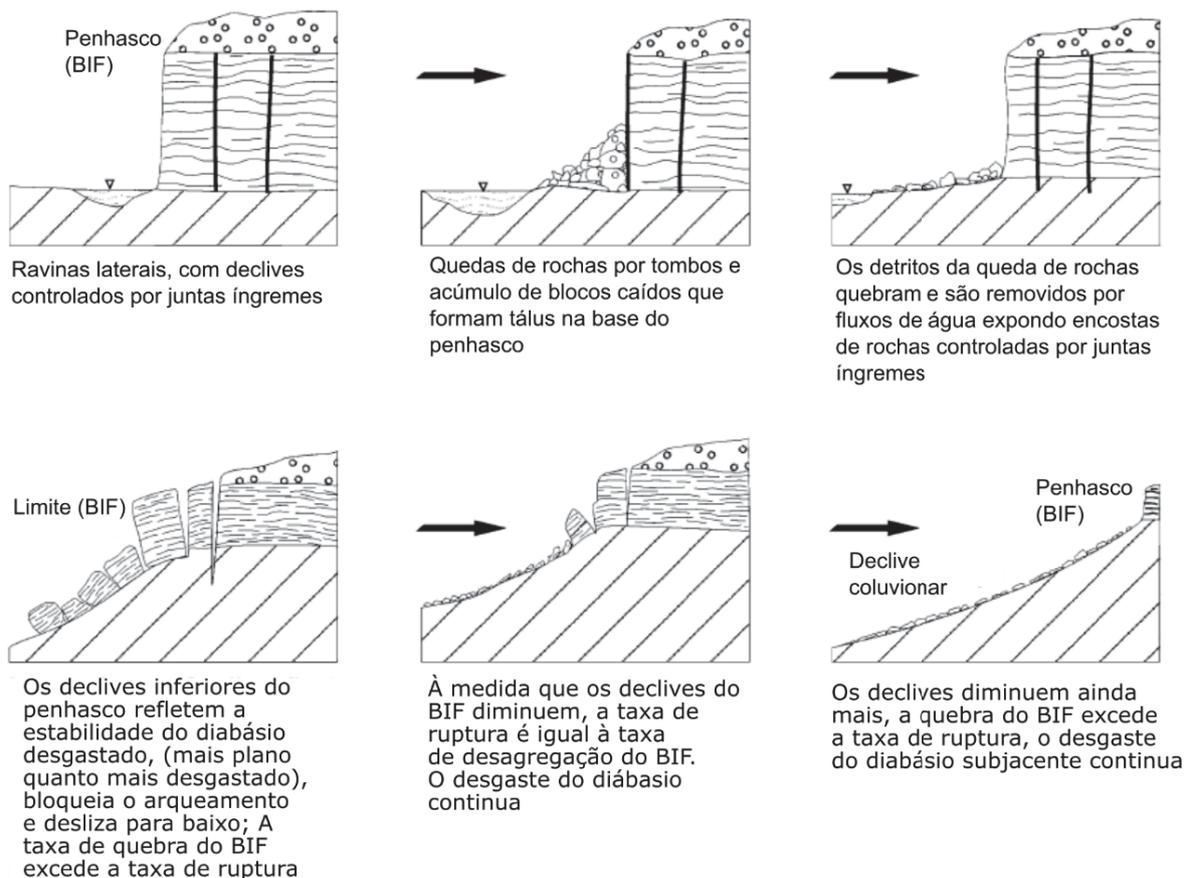


Fig. 35: Modelo conceitual focado na evolução temporal dos elementos: exemplo de investigação desenvolvida no projeto e construção de uma ferrovia na Austrália Ocidental (modificado de Baynes et al., 2005).

Os modelos conceituais também podem ser aplicados para resolver paradoxos encontrados na literatura, como no caso do modelo proposto por Parsons et al. (2004). Os autores analisaram estimativas de erosão do solo por águas e, por meio de um modelo conceitual, questionaram os argumentos tradicionais baseados em relações simples entre taxa de erosão e área. O modelo apresentado aborda a taxa de erosão levando em consideração o arrastamento e as distâncias percorridas por partículas individuais (Fig. 36).

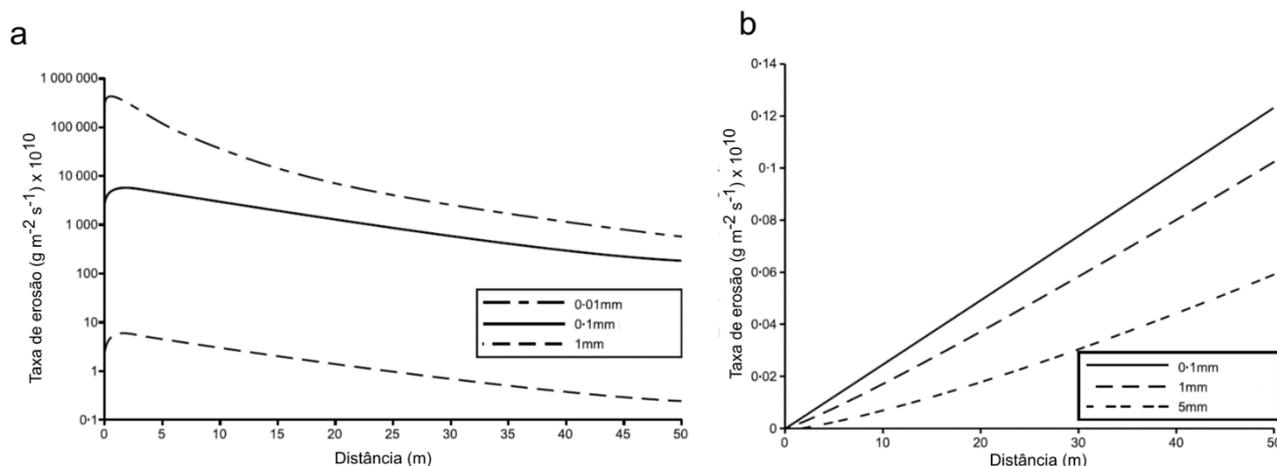


Fig. 36: Relação entre a taxa de erosão e o tamanho das partículas, assim como a distância, em (a) áreas intersulcos e (b) ravinas e voçorocas. Em ambos os estudos de caso, o fluxo de sedimentos apresenta uma variabilidade espacial significativa. Portanto, ao calcular as taxas de erosão dividindo o fluxo de sedimentos medido pela distância percorrida a partir do ponto de medição, a taxa dependerá do local de medição (modificado de Parsons et al., 2004).

3.4.2.2 Modelo observacional (Hierarquia II)

Esta abordagem é resultado de observações e dados específicos obtidos durante as investigações de campo. Os modelos observacionais podem ser desenvolvidos diretamente a partir de modelos conceituais previamente elaborados ou por meio de novas aquisições de dados (Parry et al., 2013). É importante ressaltar que, apesar de ser possível construir esse tipo de modelo a partir de novos dados, é fundamental utilizar um modelo conceitual adequado previamente elaborado. A partir desse modelo conceitual, devem-se identificar as incertezas e lacunas existentes para construir e interpretar de maneira eficaz o modelo observacional. Por exemplo, enquanto os dados observacionais, como os limites em furos de sondagem, são limitados no espaço (x, y, z), o modelo conceitual é utilizado para estabelecer as relações que fundamentam a interpretação das superfícies geológicas entre esses pontos. Além disso, a interpretação dos próprios dados de observação baseia-se em uma abordagem conceitual para diferenciar o significado de cada elemento específico dos dados observados (Parry et al., 2013).

A geração do modelo observacional geralmente envolve um processo dividido em duas etapas (Fig. 37). A etapa 1 consiste na definição das unidades geológico-geotécnicas (ou geoambientais), agrupadas em classes com características semelhantes e relevantes para o estudo. Nessa etapa, é importante utilizar uma abordagem conceitual. Parry et al. (2013) destacam a importância da utilidade e qualidade das unidades definidas, assim como do modelo conceitual utilizado, pois essa etapa determina o grau de incerteza do modelo observacional. A etapa 2 envolve a análise de observações e dados de medições, na qual é necessário interpretar a distribuição das unidades definidas em três dimensões, estabelecendo taxas de processos e delimitando o modelo no espaço ou no tempo, com base em dados reais.

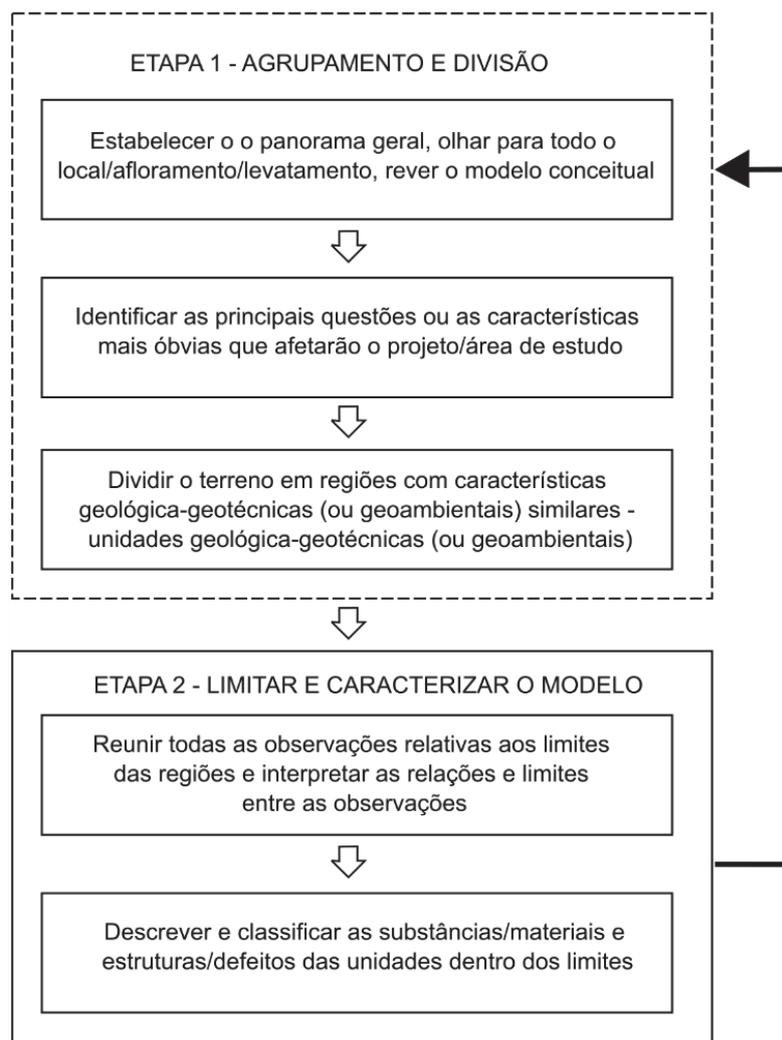


Fig. 37: Etapas envolvidas na abordagem do modelo observacional (modificado de Parry et al., 2013).

Os modelos observacionais variam em escala, desde escalas locais (por exemplo, descrição e correlação de testemunhos) até escalas regionais (por exemplo, mapeamentos regionais), e apresentam diferentes formas, como unidimensionais (por exemplo, perfis gráficos de testemunhos), bidimensionais (por exemplo, seções geológicas e mapas) e tridimensionais (Fig. 38). Os recursos computacionais e o uso de geotecnologias no levantamento do terreno são aliados importantes na geração desses modelos,

especialmente no processamento de múltiplas variáveis em um único modelo, que requer precisão espacial e vertical.

No entanto, como observado por Kessler et al. (2009), a análise da precisão das unidades geológicas e sua distribuição depende da experiência geológica da pessoa que realiza o estudo, principalmente em áreas onde os dados são escassos ou de baixa qualidade. Essas situações exigem uma abordagem mais detalhada e abrangente, como é o caso da Ilha da Trindade.

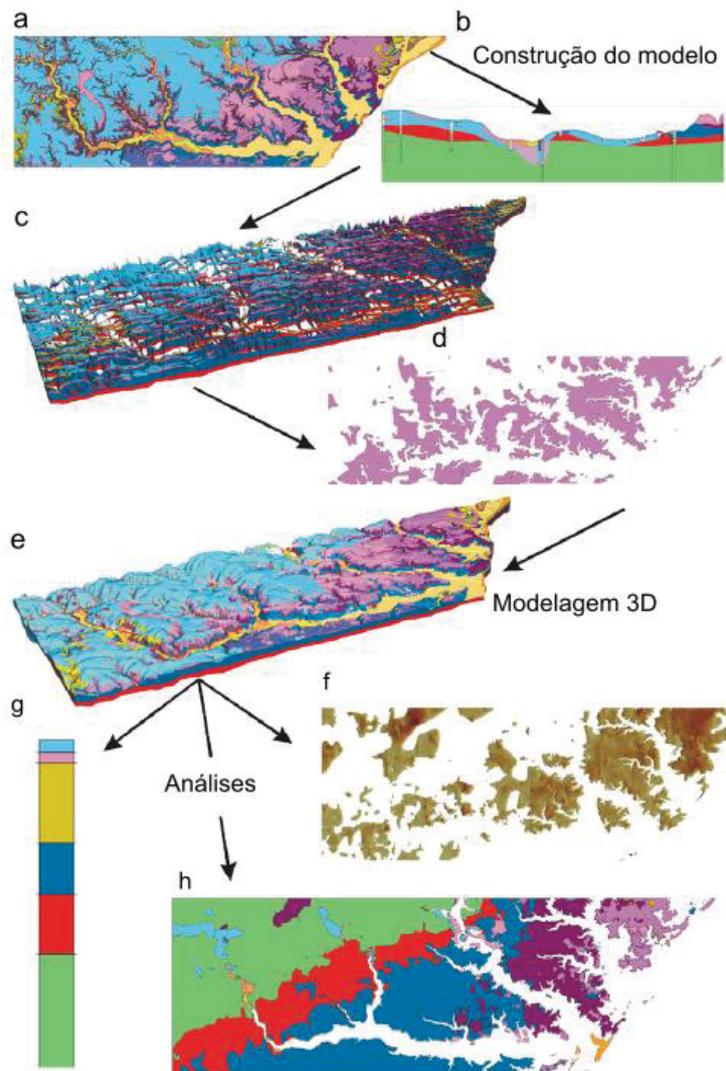


Fig. 38: Modelo observacional 3D: (a–e) demonstram o fluxo de trabalho na construção do modelo 3D de interesse e (f–h) demonstram exemplos analíticos extraídos e calculados a partir do modelo observacional (modificado de Kessler et al., 2009).

3.4.2.3 Modelo analítico (Hierarquia III)

O objetivo deste modelo analítico é compreender e fornecer a distribuição de parâmetros (como resistência ao cisalhamento, condutividade hidráulica, módulo de deformação) dentro dos modelos observacionais. Esse tipo de modelo é amplamente utilizado na execução de obras de engenharia. No entanto, é necessário simplificar

consideravelmente o modelo observacional e fazer um julgamento geológico de engenharia significativo, incluindo a definição de parâmetros e limites geotécnicos (Parry et al., 2013).

Sullivan (2010) observou que o desenvolvimento de um modelo simples pode ser desafiador, especialmente quando se lida com grandes conjuntos de dados ou condições geológicas complexas. Nessas situações, é necessário elaborar um modelo que represente de forma robusta a essência do projeto de engenharia ou do contexto estudado, a fim de ilustrar os problemas inerentes e a variabilidade geológica-geotécnica.

Os modelos analíticos podem abranger tanto modelos análogos, que utilizam várias ferramentas para representar o que está sendo modelado (como mencionado por Mossman et al., 2008), quanto modelos matemáticos que representam um processo, sistema ou conceito por meio de uma série de variáveis (entradas, saídas e estado interno) e equações governantes que descrevem a interação dessas variáveis (Parry et al., 2013).

3.5.3 Modelos aplicados em regiões insulares com terreno vulcânico

A aplicação de modelos tem o propósito de entender a correlação entre os elementos da área investigada e interpretar a dinâmica do local, especialmente quando os processos geológicos representam perigo para as pessoas e infraestrutura. A seguir, são descritos exemplos práticos de modelos aplicados em regiões insulares vulcânicas.

3.5.3.1 *Processos erosivos e gravitacionais*

As regiões vulcânicas apresentam uma complexidade geológica, que combinada com a evolução da paisagem em áreas insulares, torna desafiadora a análise e interpretação dos processos envolvidos. Um exemplo da importância da utilização de modelos é o estudo realizado por Marinos et al. (2017) na ilha vulcânica de Santorini, onde um modelo conceitual de uma praia foi desenvolvido para avaliar o risco e o potencial de quedas de rochas decorrentes da evolução natural do local.

Através desse modelo conceitual (Fig. 39), os autores puderam correlacionar o fornecimento de sedimentos provenientes de processos erosivos e deposicionais com o equilíbrio da dinâmica da praia. A análise realizada indicou que qualquer tentativa de interromper esses processos por meio de medidas geotécnicas poderia desencadear outros problemas na região, como a erosão costeira. Os autores concluíram que soluções de engenharia para evitar esses processos perigosos não devem ser adotadas ou autorizadas. Em tais casos, segundo eles, a melhor prática é simplesmente reconhecer, declarar e gerenciar os riscos inevitáveis por meio de abordagens geoambientais ou de engenharia.

Os modelos desempenham um papel importante na reconstrução da evolução da paisagem em regiões vulcânicas, que passaram por múltiplas fases de vulcanismo, erosão e intemperismo. Um exemplo disso é o modelo conceitual desenvolvido na ilha de Tahiti-Nui (Fig. 40) por Hildenbrand et al. (2007), onde os autores enfatizam a importância dos processos erosivos controlados pela estrutura na evolução da paisagem.

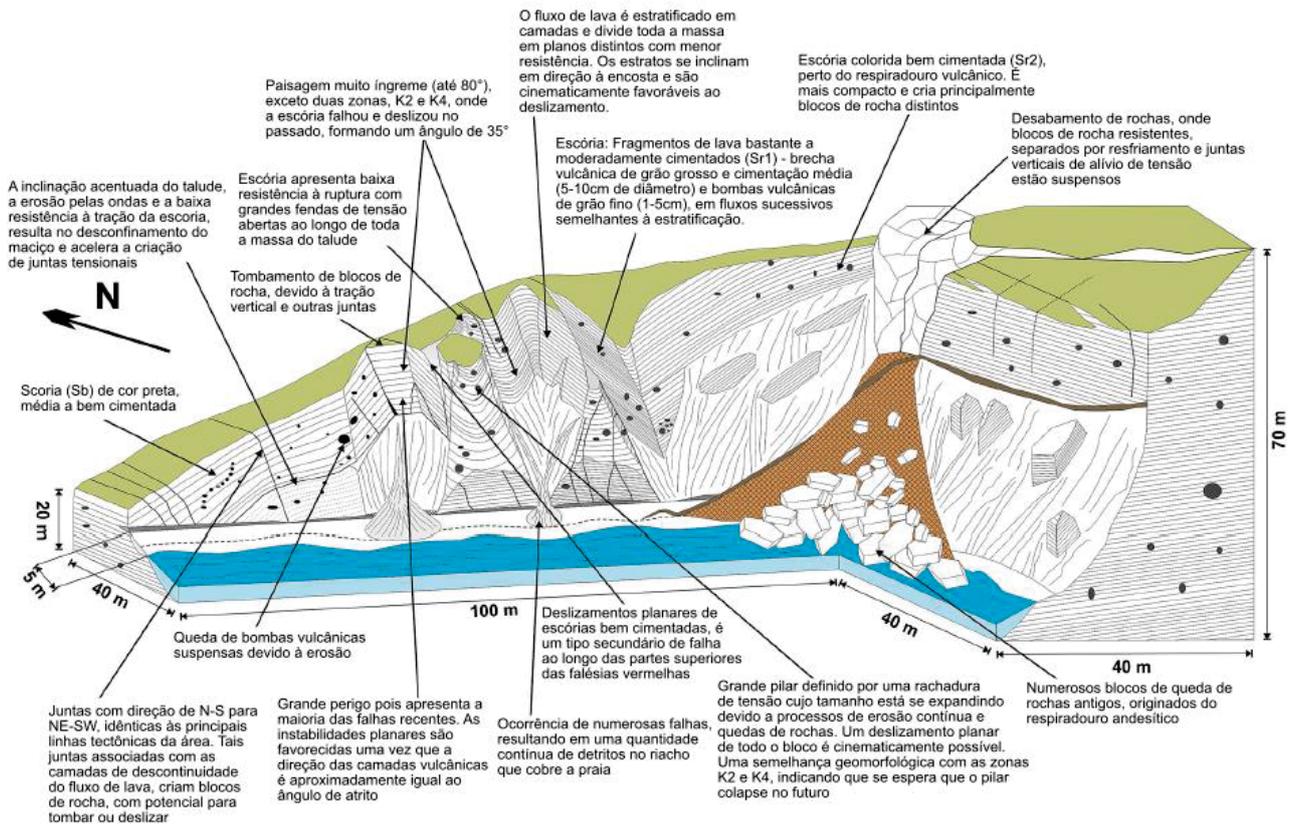


Fig. 39: Modelo conceitual abordando a variação espacial dos elementos fundamentais na paisagem vulcânica da ilha grega de Santorini (modificado de Marinós et al., 2017).

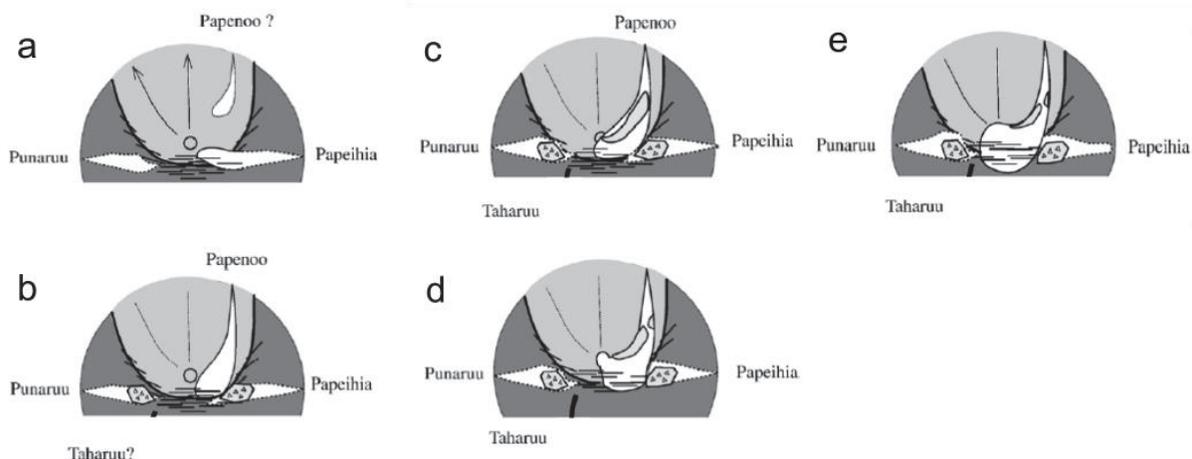


Fig. 40: Modelo conceitual de evolução da bacia do Papenoo em Tahiti-Nui nos últimos 500 mil anos. O escudo principal e o segundo escudo vulcânico são representados em cinza escuro e cinza claro, respectivamente. As setas indicam a direção predominante da erupção dos fluxos vulcânicos do segundo escudo, representados por linhas finas nas etapas subsequentes. A depressão causada por deslizamentos no norte é marcada por uma linha sólida preta, e os diques da principal zona de rift (E-W) são mostrados como segmentos pretos finos. As bacias de drenagem são representadas por áreas brancas delineadas por uma linha preta fina. As áreas cinza claro com símbolos triangulares representam as brechas e fluxos de lava preenchendo as bacias de Punaruu e Papeihia.

3.5.3.2 Processos hidrológico e de escoamento superficial

Os aspectos hidrológicos e hidrográficos das ilhas vulcânicas ao redor do mundo ainda são pouco compreendidos, apesar das populações que habitam nesses ambientes dependem principalmente das águas doces provenientes dessas ilhas. Essa situação é ainda mais complexa devido à estrutura geológica complexa, heterogeneidade e, em alguns casos, processos vulcânicos ativos, o que dificulta uma análise simplificada da dinâmica hidrológica (Prada et al., 2016). O desenvolvimento de modelos conceituais para águas subterrâneas e escoamento superficial em ilhas vulcânicas representa um desafio devido à complexidade geológica e à dificuldade em obter dados sobre a estrutura interna, dada a morfologia da paisagem e o difícil acesso (Izquierdo, 2014).

Um exemplo de aplicação de modelo ocorre na Ilha da Madeira, situada no Oceano Atlântico, onde os recursos hídricos subterrâneos são a principal fonte de abastecimento de água (Fernandes et al., 2020). Nesse exemplo, os autores analisaram um extenso conjunto de dados hidroquímicos e aplicaram essas informações ao modelo hidrológico conceitual da ilha (Fig. 41) (Prada et al., 2016). A partir do modelo elaborado, os autores preveem uma diminuição na quantidade de chuva até o final do século, o que poderá levar a escassez no abastecimento de água. Diante desse cenário, propõe-se que a interceptação da água das nuvens poderá se tornar um aspecto cada vez mais importante na hidrologia da Ilha da Madeira (Prada et al., 2016).

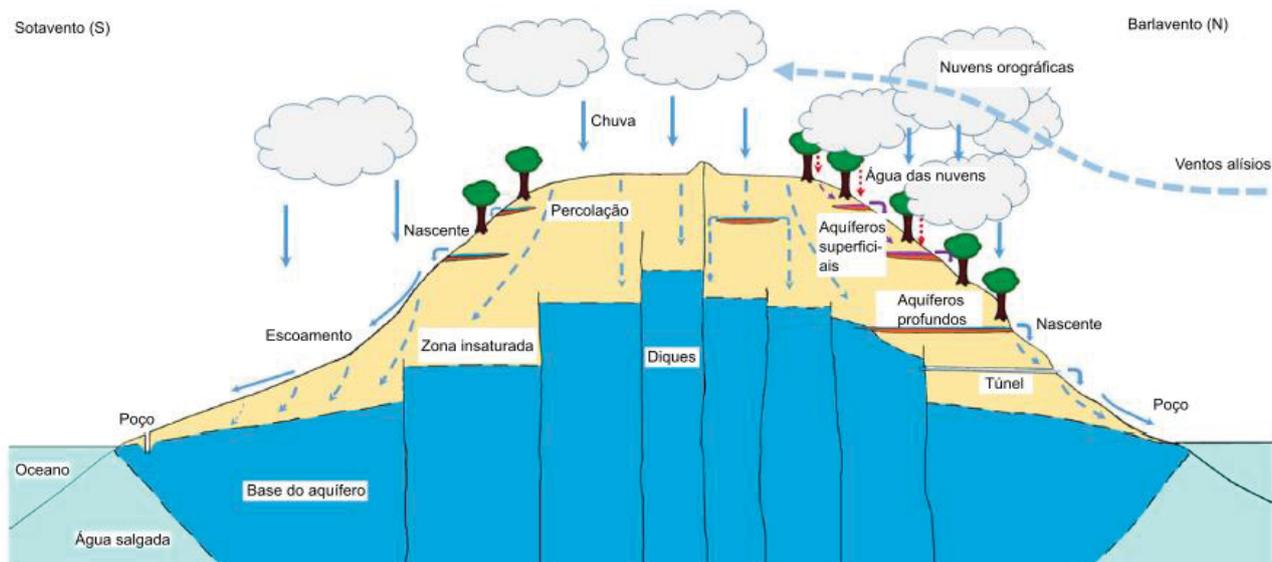


Fig. 41: Modelo conceitual com foco nas condições hidrológicas da Ilha da Madeira, em Portugal. De maneira geral, as vias de fluxo das águas subterrâneas são localizadas e rasas, e os aquíferos são recarregados principalmente pela interceptação da água da chuva e das nuvens durante o outono e o inverno, por meio da vegetação existente nas encostas. Acredita-se que as águas subterrâneas dos poços têm sua origem no escoamento superficial da chuva ao longo das encostas, que se infiltra nas proximidades dos riachos (modificado de Prada et al., 2016).

Outro exemplo é o estudo de caso realizado por Lachassagne et al. (2014) que apresenta um modelo hidrológico conceitual da Ilha Mayotte, localizada nas Comores (Fig. 42a). Através desse modelo, os autores identificaram que a ilha não possui um aquífero contínuo, mas sim uma sucessão descontínua de aquíferos isolados por aquícludes e aquitardes. Essa configuração, de acordo com os autores, é resultado da complexa estrutura geológica da ilha, que passou por diversas fases de vulcanismo, erosão e intemperismo, e é influenciada pela alta resolução dos levantamentos realizados. O modelo hidrológico da Ilha Mayotte difere do modelo havaiano (Fig. 42b) e é análogo ao modelo das Ilhas Canárias (Fig. 42c). A modelagem conceitual detalhada mostrou-se crucial e necessária para compreender a realidade geológica da ilha e, a partir disso, desenvolver projetos para solucionar problemas geológicos.

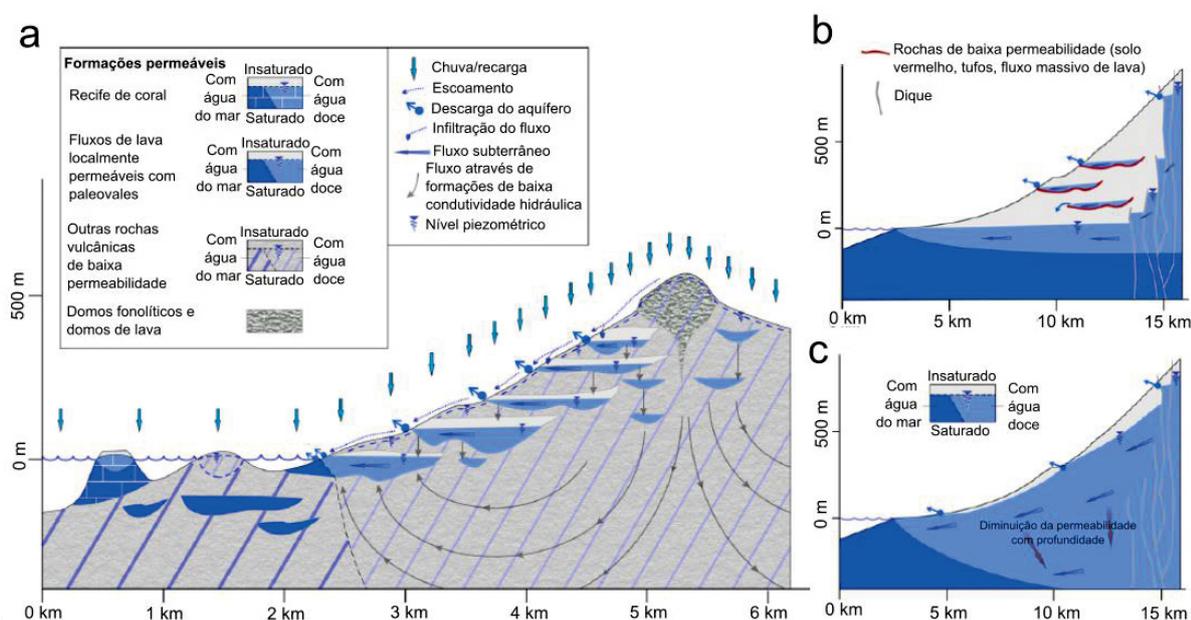


Fig. 42: Modelos conceituais hidrogeológicos de ilhas vulcânicas: a) Mayotte (Comoros); b) Havaí; e c) Ilhas Canárias (modificado de Lachassagne et al., 2014).

4. Materiais e métodos

As etapas envolvidas na obtenção dos dados fundamentais foram extensas campanhas de campo, a aplicação de geotecnologias e a habilitação do banco de dados temporais por meio de técnicas de monitoramento. Além disso, foram realizadas análises e interpretações dos dados, resultando em representações cartográficas. No estudo, também foram relatadas as fragilidades naturais da paisagem, como os processos erosivos e os movimentos de massa gravitacionais, que representam perigos geológicos nas bacias hidrográficas ocupadas na Ilha da Trindade. As técnicas aplicadas nesta pesquisa podem ser reproduzidas em regiões remotas ou de difícil acesso, caracterizadas por relevos acidentados e de difícil trânsito.

Considerando as características singulares da Ilha da Trindade, foi decidido adotar uma abordagem que combina elementos da geologia ambiental (item 3.1.1.1) e da geotecnia ambiental (item 3.1.1.2). Devido à falta de dados técnicos e temporais essenciais para estudos geotécnicos, bem como à dificuldade de acesso a modelos digitais do relevo que permitam visualizar as características em escala detalhada, todos os atributos foram

obtidos integralmente neste estudo, por meio de procedimentos de campo e pós-processamento de dados.

Nesse contexto, foi adotada a abordagem de análise de perigos geológicos (ver item 3.1.2). Foram considerados elementos naturais, como aspectos geológicos, geomorfológicos, climáticos e cobertura vegetal, além de elementos antropogênicos, como edificações, infraestrutura e atividades humanas. Os dados obtidos nas diferentes etapas do estudo, que serão detalhadas ao longo desta tese, foram avaliados e interpretados para identificar os mecanismos e responder à hipótese proposta. A escala adotada foi de detalhe 1:1.500, com três campanhas de campo realizadas entre abril e junho de 2018 e 2019, e entre outubro e dezembro de 2022. A seguir, são resumidas as principais etapas desta pesquisa, que estão ilustradas e detalhadas nos artigos apresentados no item dos resultados da tese (item 5):

- Delimitação da escala de estudo: a utilização de uma escala de detalhe (1:500) (ver classificação de escalas em Zuquette e Gandolfi, 2004) ao mapear uma área de aproximadamente 2 km² em uma ilha oceânica é justificada para obter informações precisas e abrangentes sobre a topografia, características geológicas e vegetação, permitindo uma melhor compreensão do ambiente, gestão eficiente e identificação de potenciais perigos geológicos específicos à região insular. Além disso, a escala de dados disponíveis, como as cartas náuticas dos anos 60 (escalas 1:15.000 e 1:5.000) e o mapa geológico do Almeida (1961) na escala 1:10.000, demanda trabalhos adicionais na escala de detalhe.
- Delimitação da área de estudo: Delimitação da área de estudo: A partir das bacias hidrográficas habitadas, foi realizada a delimitação utilizando o método de traçado da linha de divisores de água até segunda ordem proposto por Strahler (1957). O sistema de drenagens foi delineado por meio de trabalhos de campo, juntamente com a interpretação de fotografias aéreas de 2011 (Marinha do Brasil), 2018 (Universidade Federal de Viçosa), 2019 e 2022 (obtidas neste estudo).
- Substrato rochoso: para mapear em campo os atributos do substrato rochoso, como litotipos, grau de intemperismo, área e profundidade, descontinuidades, fraturamento e tipo de contato entre os materiais geológicos, foram utilizadas técnicas de campo e geoprocessamento (ver Nadalin et al., 2018). A identificação das características visuais das rochas, como cor, textura e estrutura, foi realizada, e ferramentas como GPS, martelo, bússola e câmera fotográfica foram empregadas para obter informações adicionais;
- Materiais inconsolidados: para mapear em campo os atributos dos materiais inconsolidados, como tipos, descrição de descontinuidades, heterogeneidade do conjunto, foram utilizadas técnicas de campo e geoprocessamento (Zuquette e Gandolfi, 2004). As observações em campo envolveram características visuais dos materiais, como cor, textura, granulometria e presença de estratificação. Além disso, foram analisados a consistência e a coesão dos materiais. Os dados provenientes dos ensaios de caracterização física e química dos solos da área de estudo, realizados por Pezzi (2018) e Santos (2018), também foram utilizados para complementar o mapeamento.
- Inventário de feições e processos geodinâmicos: mapeamento em campo dos atributos, combinado com fotointerpretação de fotogrametria.

- Modelos digitais do relevo: levantamento geoespacial utilizando o método *Remotely Piloted Aircraft (RPA)* e pontos de controle medidos por *real-time kinematic global navigation satellite systems (RTK-GNSS)*. Foram gerados produtos tais como ortomosaico, modelo digital de elevação, modelo digital de superfície, modelo 3D;
- Condições ambientais: a) vegetação: mapeamento em campo (tipo, porte, distribuição) e análises temporais (fotointerpretação das fotografias aéreas de 2011, 2018, 2019 e 2022) (ANEXO 2, 3, 4 E 5); e b) dados de chuva (pluviosidade, intensidade, regime anual);
- Águas superficiais: mapeamento dos atributos em campo (tipo de drenagem, áreas de acúmulo, densidade de canais) e análises qualitativas (drenagens efêmeras ativas durante episódios de chuvas).
- Ensaio de campo do escoamento superficial em parcela: nesse ensaio de campo, uma parcela experimental foi definida em um segmento da encosta da Ilha da Trindade, com boas condições de acesso e logística na coleta dos solos após eventos de chuva. Foi construída uma área delimitada de 3 m² com chapas de alumínio, incluindo um recipiente coletor de material transportado. Amostras dos solos retidos foram coletadas após cada evento chuvoso, classificados como tempestades e chuvas ocasionais. Até o momento, não foram realizados ensaios de caracterização geotécnica nas amostras coletadas.

A fim de obter dados georreferenciados com resoluções adequadas para estudos detalhados e monitoramento da evolução das feições, foram utilizadas as seguintes geotecnologias:

- Método de posicionamento *real-time kinematic global navigation satellite systems (RTK-GNSS)*: permite registrar a posição de pontos cotados do terreno com precisão de 0,003 m;
- *Remotely Piloted Aircraft (RPA)* com pontos de controle mensurados por *real-time kinematic global navigation satellite systems (RTK-GNSS)*: utilizado para visualizar, monitorar e mapear em alta resolução espacial as feições relacionadas aos processos naturais, além de detalhar os atributos morfométricos e morfológicos.

Com o intuito de compreender os mecanismos dos processos ativos na área de estudo foram realizados os seguintes monitoramentos:

- Monitoramento das feições ativas: foram instalados 13 marcos de monitoramento nos afloramentos das feições lineares, consistindo em estacas de 50 cm com exposição inicial de 20 cm. Anualmente, foram realizadas medições (em cm) da variação da exposição das estacas;
- Análises da precipitação: para correlacionar o índice pluviométrico total com os processos ativos, foi instalado um pluviógrafo digital em 2019, com uma resolução de 0,333 mm/s.
- Inventário fotográfico: consiste em fotografar em campo os processos de interesse em locais pré-determinados. Esses registros foram realizados em 2018, 2019 e 2022. Além disso, foi realizado o levantamento das feições por meio de *RPA* em 2019 e 2022.

5. Resultados

5.1 Características gerais da área de estudo

A seguir, estão resumidos os principais atributos obtidos, que estão detalhados e ilustrados nos itens subsequentes dos resultados. Esses atributos são fundamentais para compreender a dinâmica dos movimentos gravitacionais e erosivos nas bacias hidrográficas analisadas.

5.1.1 Propriedades morfológicas e hidrográficas (águas superficiais)

A área de estudo, com 1,7 km² de extensão, apresenta uma amplitude topográfica de 425 m (ANEXO 6, 7 e 8). A declividade varia de 0% a 75%, com predominância de declividades entre 20% e 45%, caracterizando um relevo fortemente ondulado que abrange 34% da área total (ANEXO 9). As áreas mais acidentadas (declividades de 45% a 75% e acima de 75%) ocupam 35% da área de estudo. As áreas de relevo plano, suavemente ondulado e ondulado (declividades de 0% a 3%, 3% a 8% e 8% a 20%, respectivamente) representam 31% da área, sendo o relevo ondulado o mais predominante, abrangendo 22% da área total. A área foi dividida em 23 bacias hidrográficas, sendo identificadas bacias de até a 4^a ordem. Isso indica que foram considerados apenas os afluentes diretos do rio principal até o quarto nível de ramificação (ANEXO 10). No entanto, é importante mencionar que essa abordagem pode desconsiderar as ramificações dinâmicas dos leques aluviais, resultando em uma representação das bacias hidrográficas predominantemente pouco ramificadas que são predominantes na Ilha da Trindade.

Nesse contexto, foram identificados sistemas de drenagem efêmera e ramificada associados à dinâmica dos leques aluviais. Esses leques aluviais se formam devido à deposição de sedimentos transportados pelas correntes de água, contribuindo para a configuração da rede de drenagem na área de estudo. A presença de bacias de 4^a ordem indica que o terreno está em processo de evolução, com rios principais recebendo contribuições significativas de seus afluentes ao longo do tempo. Isso sugere que a região passou por um processo evolutivo, onde os cursos de água escavaram o terreno, resultando em um sistema de drenagem ramificado. As redes de drenagens são principalmente efêmeras, sendo que a principal drenagem perene que abastece a ocupação possui uma vazão média de 1,2 m³/h ao longo do rio e 0,6 m³/h a montante, em condições de tempo bom.

5.1.2 Unidades de feição de terreno e descrições

Foram mapeadas 19 unidades de feição de terreno agrupadas em sete grupos principais (ANEXO 11), considerando distintas características obtidas por meio de descrições de campo, análises morfométricas e hidrogeológicas. Os modelos e mapas correspondentes podem ser encontrados no artigo do item 6.3. Essas unidades incluem a zona costeira com infraestrutura antropogênica, rios efêmeros e perenes, encostas com erosão linear e formação de leques aluviais, encostas cobertas por depósitos de avalanche de rochas, quedas e tombamentos, encostas íngremes com rochas expostas, e estruturas

vulcânicas, como necks e domos. O substrato rochoso predominante é composto por fonolitos e depósitos piroclásticos do Complexo Trindade (~40%), além de olivina- nefelinitos e depósitos piroclásticos da Formação Morro Vermelho (~60%). Os depósitos quaternários recobrem cerca de 44% da área, enquanto aproximadamente 56% da superfície é composta por rochas aflorantes. No ANEXO 12 encontram-se os detalhes da geologia da área de estudo.

5.1.3 Distribuição das chuvas

A análise dos dados históricos do regime de chuvas fornecidos pela Estação Meteorológica da Ilha da Trindade (EMIT) no período de 1974 a 2010 revelou uma média anual de precipitação de 921 mm. Os meses de abril a junho apresentam a maior média de chuvas, com 111 mm, enquanto os meses de janeiro a março são os menos chuvosos, com uma média de 60 mm. Além disso, o monitoramento realizado em 2018 e 2019 durante o período mais chuvoso registrou a ocorrência de eventos episódicos relevantes relacionados a ciclones e linhas de instabilidade oceânica. Um destaque foi o acumulado total de 919,363 mm em um período de 14 dias (de 2 a 20 de maio de 2019), com uma duração total de 408 minutos (duração contínua mínima de 1 minuto e máxima de 158 minutos). As intensidades de chuva variaram de 1,3 mm/min a 13,32 mm/min. As análises qualitativas indicaram que chuvas com um índice total de 12 mm em um intervalo de 12 horas já são suficientes para gerar escoamentos superficiais nas drenagens efêmeras.

5.1.4 Cobertura vegetal

A área de estudo possui uma cobertura vegetal baixa, com menos de 35% de vegetação. Nas encostas, é predominante a presença de vegetação de pequeno porte, como gramíneas. No entanto, destaca-se a ocorrência da espécie exótica *Guilandina bonduc*, que ocorre de forma isolada e suprime as gramíneas endêmicas da região. Essa espécie está associada a halos de erosão ao seu redor, onde ocorre o desenvolvimento de solo pedregulhoso.

5.1.4 Ocupação

As atividades humanas, como edifícios e infraestrutura, concentram-se nas áreas próximas às praias e nos sopés das encostas. Nessas áreas, os sedimentos transportados pelas águas das chuvas superficiais, especialmente pela ação dos leques aluviais, são depositados. Nas encostas onde existem trilhas de acesso e falta cobertura vegetal, as feições erosivas são mais visíveis e possivelmente aceleradas. Além disso, foi observado o assoreamento do rio, que é um dos poucos rios perenes na Ilha da Trindade. A erosão nessa área está relacionada ao avanço da espécie exótica *Guilandina bonduc*.

5.2 Dados de chuvas

A análise da dinâmica das chuvas é um atributo fundamental para compreender a evolução da paisagem em uma região insular de clima tropical, como a Ilha da Trindade. Com esse objetivo, conduzimos análises qualitativas e quantitativas para investigar a interação entre as chuvas e os processos de escoamento de águas superficiais durante o período de maior pluviosidade na ilha, compreendido entre os meses de abril e junho dos anos 2017, 2018 e 2019. As atividades de campo tiveram duração média de 60 dias cada uma.

Nesse contexto, realizamos o monitoramento da pluviosidade utilizando o pluviógrafo manual da Estação Meteorológica da Ilha da Trindade (EMIT) localizada nas coordenadas 29° 30' 31" de latitude sul e 29° 18' 33" de longitude oeste. Esse equipamento fornece gráficos que registram a quantidade de precipitação em milímetros a cada duas horas (Fig. 43). Além disso, durante as atividades de campo, registramos fotografias e preenchemos planilhas para documentar as chuvas que resultaram na ativação das drenagens efêmeras na área de estudo. Esses registros foram correlacionados com a pluviosidade em milímetros, o período de duração em horas e observações qualitativas da ativação dos processos de fluxos superficiais que transportaram sedimentos finos.

Além disso, com o objetivo de obter dados mais precisos sobre as chuvas⁸, foi instalado em 2019 um pluviógrafo digital (29° 30' 31" de latitude sul, 29° 18' 32" de longitude oeste) com uma resolução de 0,33 mm/s (Fig. 44). Esse dispositivo eletromecânico registra a precipitação líquida e o momento exato em que ocorre (data e hora), permitindo o pós-processamento dos dados. Durante a instalação, foi realizada a verificação do prumo usando um nível, o que é crucial para garantir o correto funcionamento do equipamento. Os canos, cilindros e a balança (sensor de medição de precipitação) são fabricados em alumínio e aço inoxidável. Vale ressaltar que esse equipamento é leve, compacto e de fácil instalação. A energia é fornecida por três pilhas alcalinas "D", com uma duração média de seis meses, sendo necessário substituí-las após esse período. Para garantir o correto funcionamento do equipamento, é importante realizar a manutenção periódica, que inclui a limpeza da estação de captação das chuvas, na qual os resíduos da tela e do funil são removidos com uma escova de náilon, e a limpeza da balança com espuma e água.

Para a análise da pluviosidade, foram compilados os dados de chuva durante o período de estudo, os quais foram extraídos diretamente do pluviógrafo digital. Esses dados foram registrados em planilhas eletrônicas com a data e hora (resolução de segundos) de cada lâmina precipitada de 0,33 mm. Para a leitura dos dados de precipitação, utilizou-se um microcomputador com o software de aquisição do equipamento instalado, com tamanho de 12MB, e um cabo conversor USB-TTL para acessar a memória do equipamento.

⁸ A Ilha da Trindade abriga a Estação Meteorológica da Ilha da Trindade (EMIT), que possui um pluviógrafo manual que registra a precipitação (em mm) a cada duas horas. No entanto, esse equipamento apresenta baixa precisão e lacunas significativas no banco de dados. As lacunas estão relacionadas a períodos em que o equipamento está inoperante devido a problemas de manutenção ou falta de registros. Durante a realização deste trabalho, em 2019 e 2022, o pluviógrafo da Ilha da Trindade estava inativo. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) possui um pluviômetro instalado na estação meteorológica, mas os dados coletados revelam períodos sem registros ou registros não confiáveis devido à falta de manutenção adequada. Diante dessas dificuldades na obtenção de dados diários, detalhados e precisos de chuva, surgiu a necessidade de instalar um equipamento adequado.

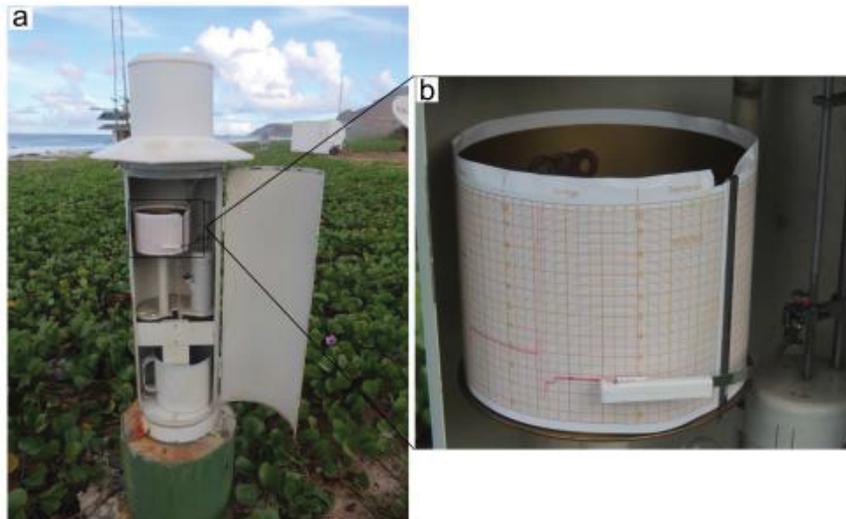


Fig. 43: (a) Pluviômetro de leitura manual da Estação Meteorológica da Ilha da Trindade e (b) detalhe do gráfico que deve ser substituído semanalmente.

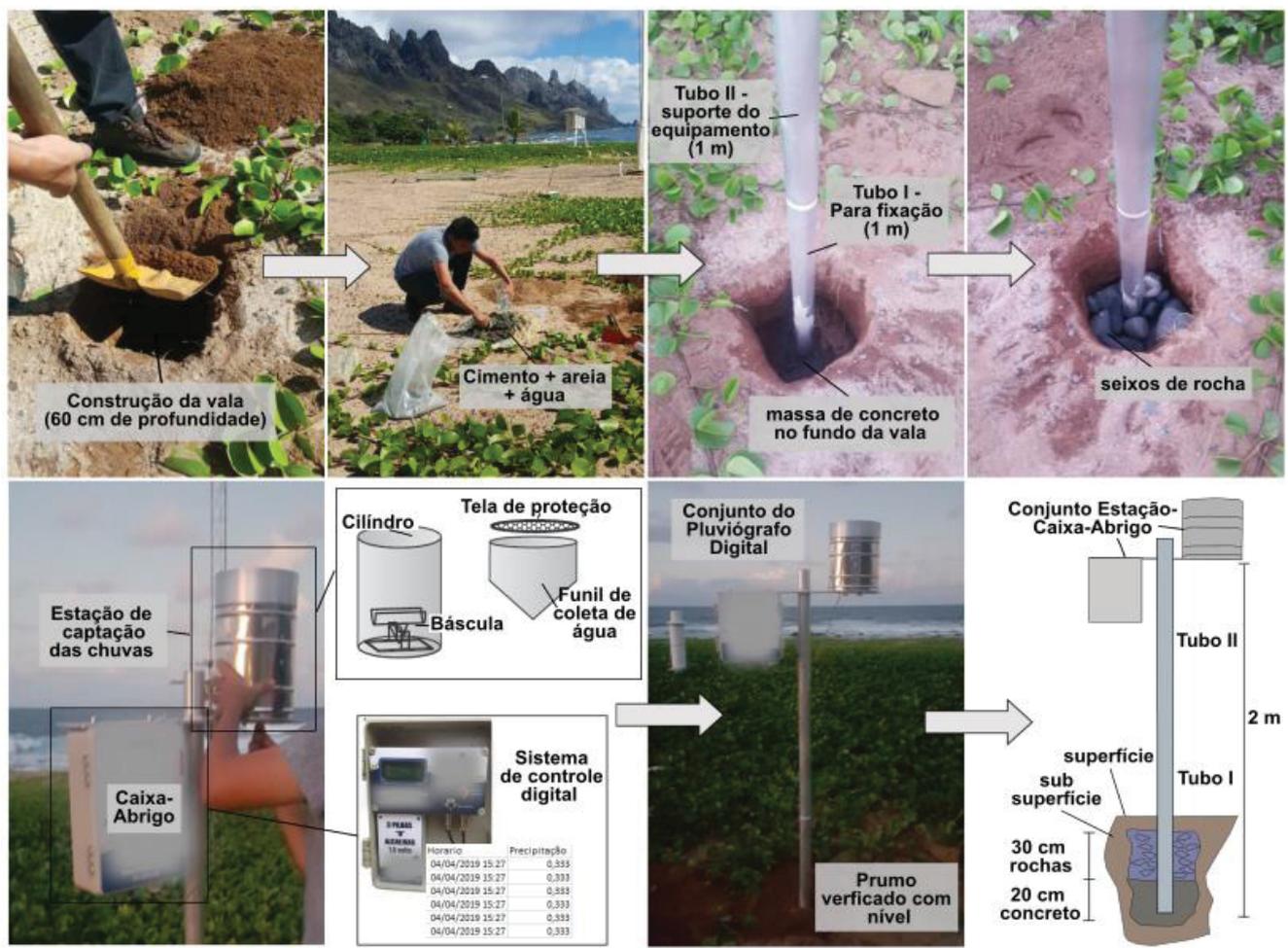


Fig. 44: Procedimentos de instalação do pluviômetro digital (resolução 0,33 mm) na área de estudo.

Com o intuito de correlacionar o transporte de sedimento em relação ao escoamento superficial das águas das chuvas foi realizado ensaio de campo em uma parcela experimental da área de estudo (Fig. 45). A seleção da parcela experimental foi feita com base em critérios que consideraram a proximidade dos alojamentos da ilha, facilitando o acesso e a logística na coleta dos solos após os eventos de chuva. Além disso, a área escolhida representava uma das regiões com maior espessura de solo na encosta investigada, permitindo a instalação dos materiais na superfície do terreno. A posição geográfica da parcela experimental é de 29°30'33" de latitude Sul e 29°18'46" de longitude Oeste.

A construção da parcela experimental foi realizada delimitando uma área de 3 m². Devido às limitações do local, não foi viável construir uma parcela mais extensa. Para isso, foram utilizados segmentos (chapas) de alumínio com 50 cm de altura, que foram introduzidos no solo a uma profundidade de 25 cm. Na parte inferior da parcela, foi criada uma abertura de 40 cm com 20 cm de profundidade. Nessa abertura, um recipiente de madeira foi inserido no solo para reter o material transportado durante os eventos de chuva. O recipiente coletor foi projetado com um material permeável no fundo, permitindo a passagem da água ou de materiais em solução, enquanto retinha apenas os materiais sólidos. A Figura 30 ilustra a construção da parcela experimental.

Após cada evento chuvoso na área de estudo, foram realizadas coletas dos solos transportados. Essas coletas foram feitas nos materiais retidos no recipiente coletor da parcela experimental. Para guiar as coletas, foi utilizado um critério de distinção entre tempestades e chuvas ocasionais. As informações em tempo real sobre alertas de mau tempo, previsões e condições climáticas no Oceano Atlântico Sul, fornecidas pela Marinha do Brasil, foram utilizadas para classificar os eventos de acordo com a sua magnitude. As amostras de solo coletadas em campo foram levadas para o laboratório, onde passaram pelo processo de secagem e pesagem utilizando uma balança analítica com precisão de 0,001 kg. No entanto, até o momento, não foi possível realizar ensaios de caracterização geotécnica nas amostras coletadas em cada episódio de chuva.



Fig. 45: Detalhes da parcela experimental na Ilha da Trindade: (a) e (b) instalação dos segmentos para delimitar a área da coleta na encosta, (c) visão em perfil em campo e desenho esquemático, (d) vista em planta por meio de fotografia aérea obtida pelo método aerofotogramétrico de Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) e desenho esquemático com as dimensões e (e) materiais utilizados em campo.

5.2.1 Análise da relação das chuvas com as drenagens efêmeras

Verificou-se que a área de estudo é caracterizada por drenagens efêmeras que desempenham um papel importante no transporte de sedimentos finos. Após episódios de chuva, é possível observar a deposição de lama nas áreas de descarga dos canais, principalmente nas proximidades das instalações da ocupação (Fig. 46). Os eventos de chuva que ocorrem na região desencadeiam o escoamento superficial de água no vale, resultando no transporte de sedimentos finos. Para classificar a intensidade das chuvas, utilizamos a resolução dos dados em mm/h e adotamos a classificação proposta pela Organização Meteorológica Mundial (Jarraud, 2008): a) chuva fraca, com intensidade inferior a 2,5 mm/h; b) chuva moderada, com intensidade igual ou inferior a 2,5 mm/h e inferior a 10 mm/h; c) chuva forte, com intensidade igual ou superior a 10 mm/h e inferior a 50 mm/h; e d) chuva violenta, com intensidade superior a 50 mm/h.

As análises qualitativas (Tabela 6) demonstraram que tais canais escoam águas superficiais durante as chuvas, nas épocas mais úmidas do ano, como mostraram os registros de precipitação das chuvas entre os meses de abril e junho de 2017 até 2019, cuja média mensal foi de 110 mm. Nos episódios de chuva 16 de abril de 2018, o pluviógrafo

da EMIT registrou um índice de chuva total de 44 mm em um intervalo de 5 horas. A intensidade máxima foi de 16,5 mm/h (chuva forte) e mínima de 2,3 mm/h (chuva fraca). Já o episódio de 27 de maio de 2018, registrou-se um índice de chuva total de 12 mm em um intervalo de 12 horas. A intensidade máxima foi de 8 mm/h (chuva moderada) e mínima de 0,43 mm/h (chuva fraca).

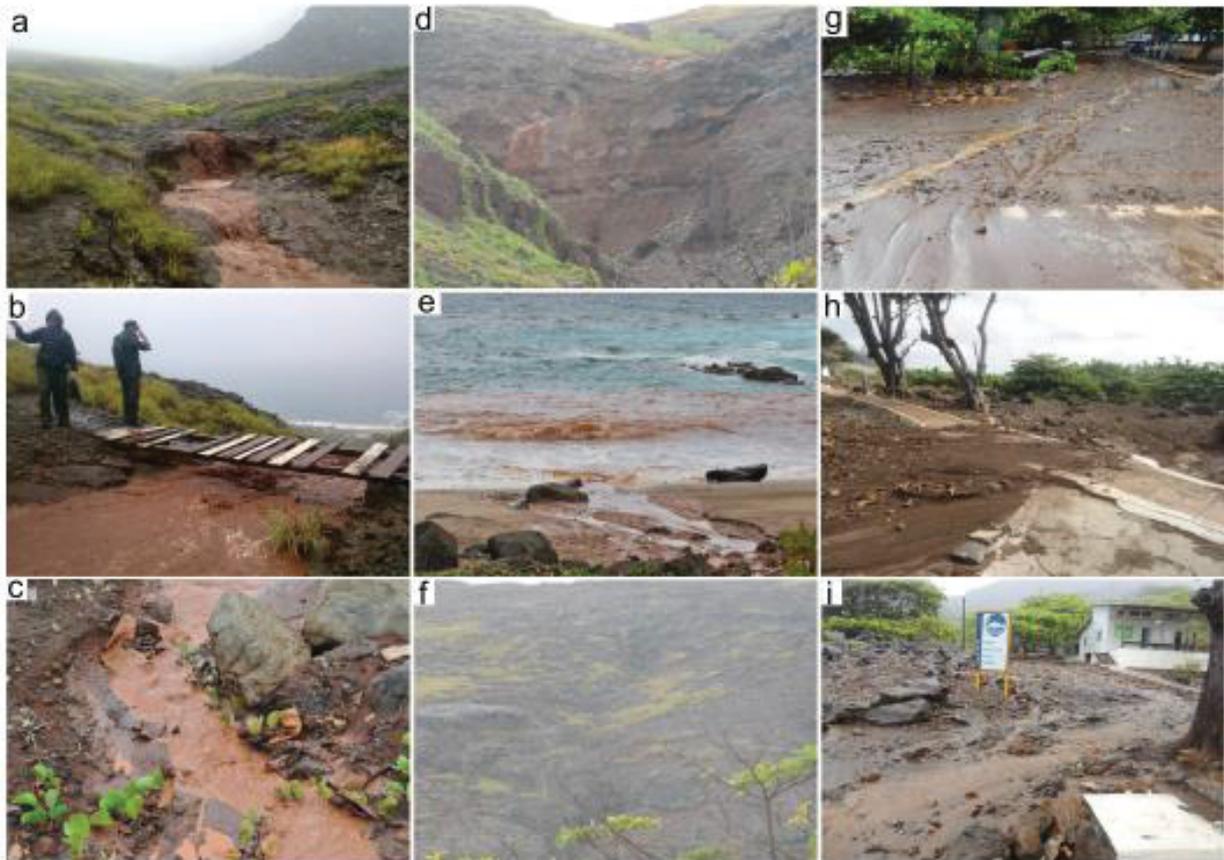


Fig. 46: Registros durante e pós-eventos de chuvas, mostrando drenagens efêmeras ativas nas bacias hidrográficas da ocupação da Ilha da Trindade. Observa-se o transporte de sedimentos finos (lama) pelas chuvas, evidenciado pela coloração vermelha da água, que se desloca das áreas mais altas das encostas até as praias e sopé das encostas, onde estão localizadas a infraestrutura e as atividades da ocupação.

Tabela 6: Dados qualitativos das chuvas que ativaram as drenagens efêmeras entre 6 de abril e 14 de junho de 2018. As intensidades máxima e mínima correspondem a cada episódio de chuva registrado (total de quatro episódios) durante o período de análise.

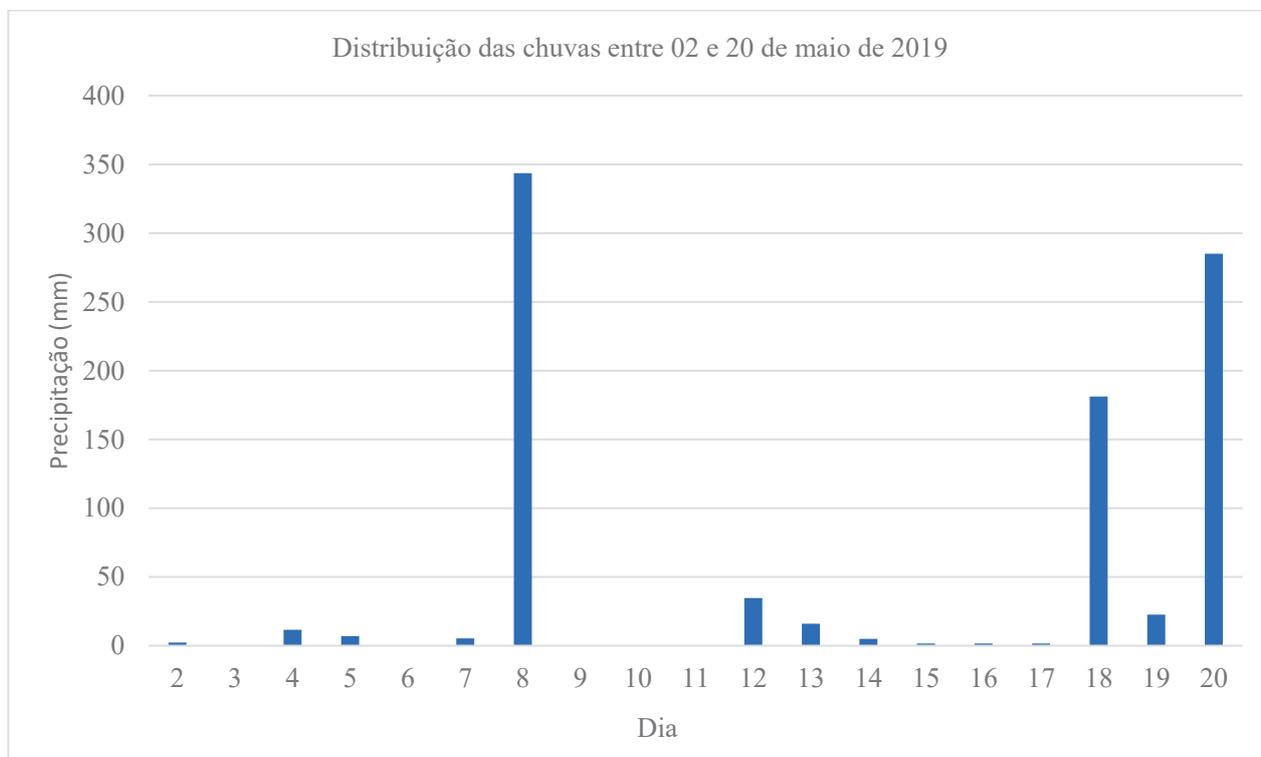
Índice de chuva total (mm)	Intervalo de tempo (h)	Intensidade (mm/h)		Drenagens efêmeras ativas
		Máxima	Mínima	
9	18	5	0,24	Não
18,1	15	1,5	0,33	Não
40	5	16	2,3	Sim
12	12	8	0,43	Sim

5.2.2 Detalhamento das chuvas episódicas

A Ilha da Trindade está localizada no oceano Atlântico Sul e está sujeita a ciclones, frentes frias e linhas de instabilidade, tornando-se importante avaliar e quantificar esses eventos comuns na região. Na Fig. 46, são apresentados alguns registros durante e após episódios de chuvas. Devido à resolução detalhada dos dados de precipitação obtidos pelo pluviógrafo digital, a intensidade das chuvas foi analisada em mm/min. Esse monitoramento detalhado foi realizado ao longo de um período de 50 dias, de 27 de abril a 6 de junho de 2019.

As análises revelaram que ocorreu precipitação em 14 dias consecutivos entre 2 e 20 de maio de 2019, com um total acumulado de 919,363 mm (Tabela 7) e duração total de 408 minutos. A distribuição das chuvas nesse período foi quase diária, com apenas 5 dias sem precipitação, e irregular (Fig. 47), alternando entre episódios de quase nenhuma chuva e episódios com precipitação máxima que excedeu a média mensal para maio (100 mm, de acordo com os dados obtidos na EMIT).

Os registros dos episódios de chuva revelaram uma intensidade mínima de 1,332 mm/min (nos dias 19 e 20) e uma intensidade máxima de 13,32 mm/min (no dia 8), com duração variando entre 1 minuto (nos dias 02, 15, 16, 17) e 158 minutos (no dia 20). As chuvas registradas apresentaram predominantemente uma intensidade constante (mm/min) ao longo do dia, como nos registros dos dias 02, 04, 05, 07, 14, 15, 16 e 17. Houve variação na intensidade (mm/s) nos dias 08, 12, 18, 19 e 20, com registros de precipitação mais expressivos variando de 22,644 mm (no dia 19) a 343,596 mm (no dia 08).



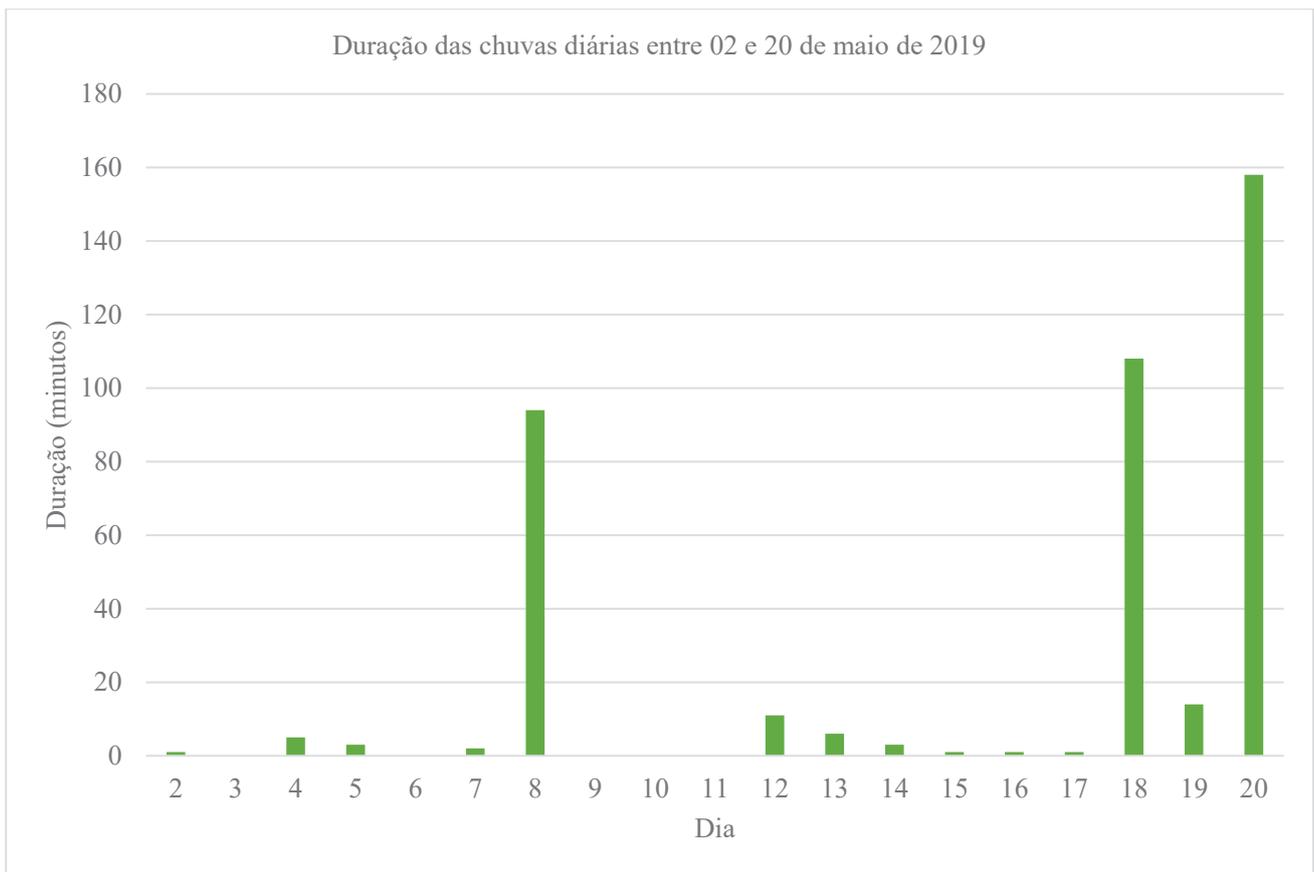
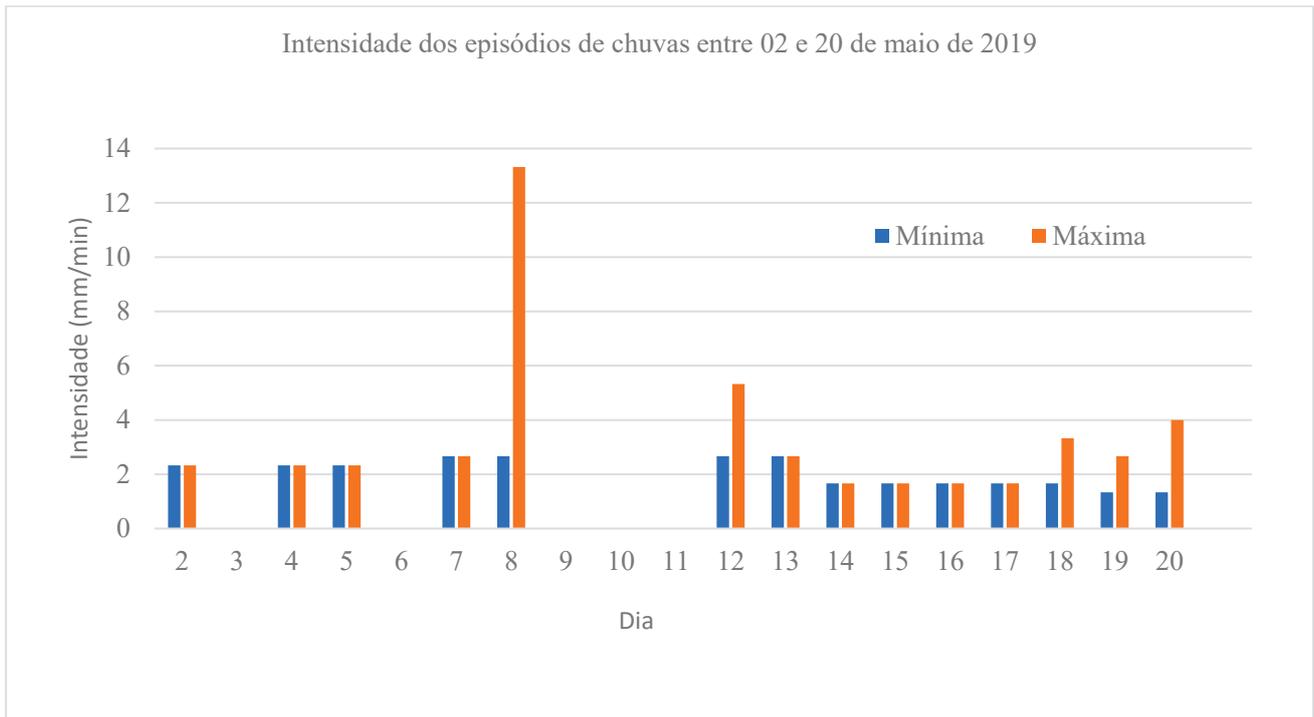


Fig. 47: Análise dos dados de chuva obtidos através do pluviógrafo digital instalado na área de estudo.

Em 8 de maio de 2019, ocorreu uma tempestade oceânica que resultou em um acumulado total de 343,596 mm de chuva, distribuídos de forma irregular ao longo de um período de 15 horas e 37 minutos, com uma duração total de 94 minutos (Fig. 48, Tabela 8). As intensidades mínimas observadas foram de 2,664 mm/min (valor predominante durante o dia) e 5,328 mm/min. Destacaram-se as intensidades máximas de 13,32 mm/min e 10,656 mm/min, correspondendo aos maiores valores de precipitação registrados, de 114,552 mm e 66,6 mm, respectivamente.

O registro de maior variação de intensidade ocorreu com um acumulado de 114,552 mm de chuva, com duração de 26 minutos. Durante 2 minutos, a intensidade atingiu o valor máximo de 13,32 mm/min, em seguida variou para 7,992 mm/min por 1 minuto, 5,328 mm/min por 4 minutos e, nos 19 minutos restantes, manteve-se estável em 2,664 mm/min. Já o registro com um acumulado de 66,6 mm seguiu um padrão semelhante: dos 14 minutos de duração, 1 minuto correspondeu à intensidade máxima de 10,656 mm/min, variou para 7,992 mm/min por 1 minuto, 5,328 mm/min por 1 minuto e nos 11 minutos restantes manteve-se estável na intensidade de 2,664 mm/min.

Entre os dias 18 e 20 de maio, a Ilha da Trindade foi afetada pela tempestade oceânica chamada "Jaguar" pela Marinha do Brasil. A tempestade resultou em um acumulado total de 488,854 mm de chuva, ao longo de um período de 46 horas e 47 minutos, com duração total de 280 minutos. As intensidades variaram de 1,332 a 2,664 mm/min (Fig. 49, Tabela 9). Do total acumulado da tempestade, 181,162 mm concentrou-se no dia 18, durante um intervalo de 9 horas e 5 minutos, com duração total de 108 minutos. Nesse dia, a distribuição das chuvas foi irregular, sem intervalos, com uma intensidade predominante de 1,665 mm/min (correspondente a 111,892 mm e 73 minutos de duração), além de dois picos de intensidade máxima de 3,33 mm/min.

No dia 19 de maio, foi observada uma queda no índice diário de precipitação da tempestade, registrando-se 22,644 mm ao longo de um intervalo de 17 horas e 38 minutos, com duração total de 14 minutos e intensidade variando de 1,332 a 2,664 mm/min. Já o dia 20 de maio foi o segundo dia mais chuvoso, com distribuição irregular das chuvas ao longo do dia, totalizando 285,048 mm de precipitação durante um intervalo de 20 horas e 5 minutos, com duração total de 158 minutos (Fig. 50, Tabela 10). A intensidade predominante foi de 1,332 mm/min, com uma intensidade máxima de 3,996 mm/min.

Os quatro maiores picos de precipitação (30,636 mm, 25,308 mm, 118,548 mm e 45,288 mm) correspondem aos registros de maior intensidade das chuvas (2,664 e 3,996 mm/min). Destaca-se a precipitação de 118,548 mm acumulada ao longo de 53 minutos, com uma intensidade máxima de 3,996 mm/min que perdurou por 10 minutos, variando para 2,664 mm/min durante 16 minutos e mantendo-se constante em 1,332 mm/min pelo restante do tempo total (132 minutos).

É importante ressaltar que os eventos registrados nos dias 8 de junho e 20 de junho de 2019 foram de caráter destrutivo, causando danos à infraestrutura da ocupação devido aos fortes ventos, combinados com o acumulado e intensidade das chuvas (Tabela 7, Fig. 51a,b). Esses episódios também ativaram as drenagens efêmeras, que, conforme observações qualitativas, só apresentaram um fluxo de água expressivo após esses eventos (Fig. 51c,d). Foi observado o transporte de sedimentos finos (lama) e grosseiros (detritos), bem como material orgânico (galhos e folhas) das encostas até as praias ou áreas mais baixas, onde estão localizadas as edificações (Fig. 51d,e,f). Além disso, foram observadas a formação de novas feições, como cones de acúmulo de material, principalmente em áreas de baixa elevação, e o surgimento de novos canais (Fig. 51g).

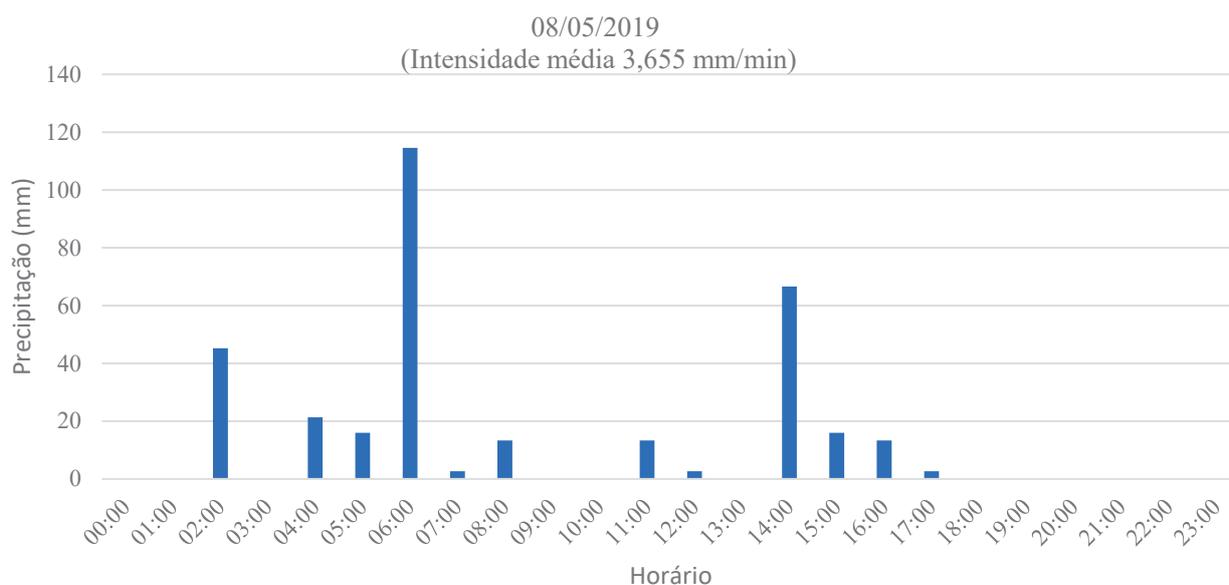


Fig. 48: Registros do pluviômetro digital da distribuição da precipitação ao longo do dia 08 de maio de 2019.

Tabela 7: Dados de detalhe das chuvas registradas no dia 08/05/2019.

Horário	Precipitação (mm)	Duração (min)	Intensidade (mm/min)		
			mínima	máxima	média
02:00	45,228	13	2,664	5,328	3,479
04:00	21,312	8	2,664	2,664	2,664
05:00	15,984	4	2,664	5,328	3,996
06:00	114,552	26	2,664	13,32	4,406
07:00	2,664	1	2,664	2,664	2,664
08:00	13,32	5	2,664	2,664	2,664
11:00	29,304	10	2,664	5,328	2,930
12:00	2,664	1	2,664	2,664	2,664
14:00	66,6	14	2,664	10,656	4,757
15:00	15,984	6	2,664	2,664	2,664
16:00	13,32	5	2,664	2,664	2,664
17:00	2,664	1	2,664	2,664	2,664
	343,596	94	-	-	-

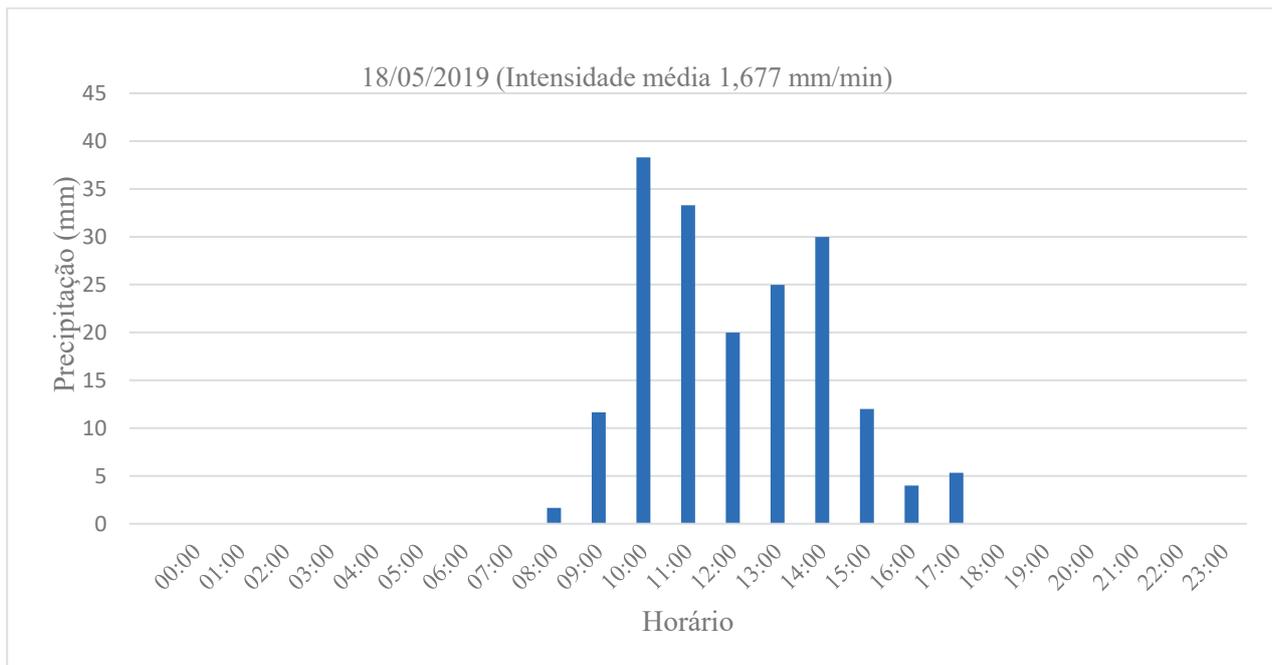


Fig. 49: Registros do pluviógrafo digital da distribuição da precipitação ao longo do dia 18 de maio de 2019.

Tabela 8: Detalhe das chuvas das horas com registro de precipitação do dia 18/05/2020.

Horário	Precipitação (mm)	Duração (min)	Intensidade (mm/min)		
			mínima	máxima	média
08:00	1,665	1	1,665	1,665	1,665
09:00	11,655	7	1,665	1,665	1,665
10:00	38,295	23	1,665	1,665	1,665
11:00	33,3	19	1,665	3,33	1,753
12:00	19,98	12	1,665	1,665	1,665
13:00	24,975	15	1,665	1,665	1,665
14:00	29,97	16	1,665	3,33	1,873
15:00	11,998	8	1,665	1,665	1,665
16:00	3,996	3	1,665	1,665	1,665
17:00	5,328	4	1,665	1,665	1,665
	181,162	108	—	—	—

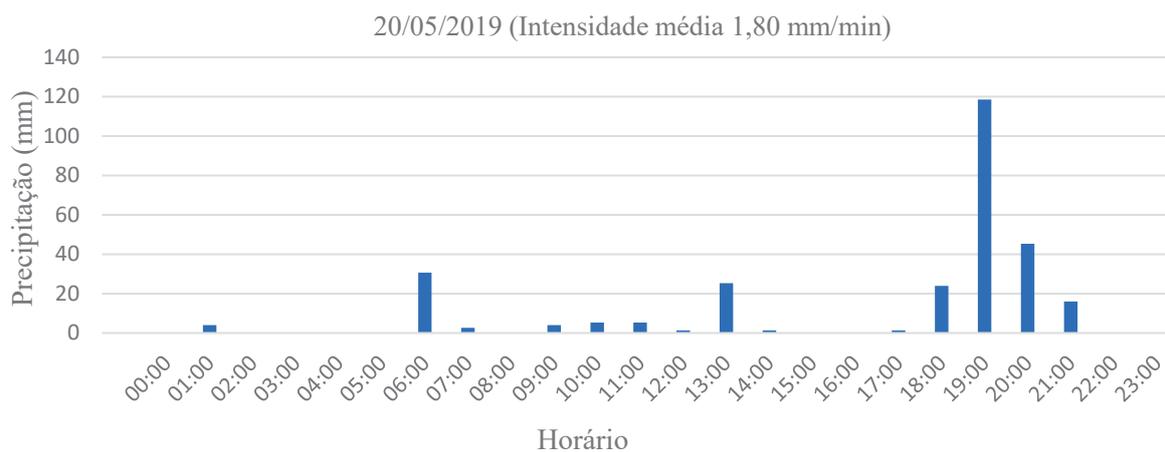


Fig. 50: Registros do pluviógrafo digital da distribuição da precipitação ao longo do dia 20 de maio de 2019.

Tabela 9: Detalhe das chuvas das horas com registro de precipitação do dia 20/05/2020.

Horário	Precipitação (mm)	Duração (min)	Intensidade (mm/min)		
			mínima	máxima	média
01:00	3,996	3	1,332	1,332	1,332
06:00	30,636	18	1,332	3,996	1,702
07:00	2,664	2	1,332	1,332	1,332
09:00	3,996	3	1,332	1,332	1,332
10:00	5,328	4	1,332	1,332	1,332
11:00	5,328	4	1,332	1,332	1,332
12:00	1,332	1	1,332	1,332	1,332
13:00	25,308	16	1,332	2,664	1,581
14:00	1,332	1	1,332	1,332	1,332
17:00	1,332	1	1,332	1,332	1,332
18:00	23,976	15	1,332	2,664	1,598
19:00	118,548	53	1,332	3,996	2,236
20:00	45,288	28	1,332	2,664	1,617
21:00	15,984	9	1,332	2,664	1,776
	285,048	158			



Fig. 51: Após os eventos de chuvas destrutivas nos dias 8 e 20 de maio de 2019, foram observados os seguintes processos e feições: a) e b) danos na infraestrutura da ocupação, evidenciando a força dos ventos e das chuvas; c) e d) ativação das drenagens efêmeras, com escoamento de água após os eventos; e) deposição de sedimentos e materiais orgânicos através do escoamento superficial das águas das chuvas; f) formação de feições de deposição, como cones de sedimentos, e geração de novos canais após os eventos; g) desembocadura de voçoroca na praia da Calheta, com deposição de sedimentos finos e detritos transportados e depositados pelas chuvas.

Foi observado que 3,055 g (3.05 kg) de sedimentos foram transportados pelas chuvas na área estudada, durante o período de 2 a 20 de maio de 2019. Após uma análise detalhada das chuvas nesse período, os resultados da coleta dos sedimentos transportados foram divididos em três grupos principais (Tabela 10). O primeiro grupo refere-se à tempestade oceânica do dia 8, que gerou um acúmulo de 1,181 g de sedimentos. O segundo grupo corresponde à tempestade "Jaguar", que resultou em um total de 1,527 g de sedimentos transportados. O terceiro grupo representa a soma dos sedimentos transportados entre as tempestades, totalizando um acúmulo de 347 g.

O monitoramento realizado na Ilha da Trindade permitiu identificar a relação entre a perda de solo exposto e as curvas de distribuição das precipitações e intensidades dos episódios de chuvas ocorridos na área experimental. Esse período do ano foi escolhido de forma ideal para o experimento, pois possibilitou mensurar o impacto das chuvas das tempestades oceânicas em áreas já degradadas e expostas aos processos erosivos, além de avaliar a importância das chuvas episódicas como desencadeadoras da erosão hidrodinâmica na região. A análise detalhada da distribuição de chuvas, com uma resolução de 0,33 mm/s, revelou padrões que relacionam chuvas de baixa intensidade com picos máximos de precipitação, informações que provavelmente estariam ocultas nas medições de totais mensais e anuais de chuva. Conclui-se, portanto, que é necessário realizar o monitoramento diário das chuvas na Ilha da Trindade, de forma detalhada, e não apenas registrar o total acumulado diário, como é feito atualmente. Esse monitoramento detalhado é fundamental para a manutenção e estudos de previsão da evolução dos processos perigosos, como as erosões.

Tabela 1: Resultados do ensaio in situ realizado para estimar a perda de solos sob chuvas naturais na Ilha da Trindade.

Evento	Períodos	Precipitação (mm)	Duração (minuto)	Intensidade (mm/min)		Solo acumulado no recipiente coletor (g)
				Mínima	Máxima	
Tempestade oceânica	08/05	343,596	94	2,664	13,32	1181
Tempestade oceânica ('Jaguar')	18 - 20/05	488,854	280	1,332	3,996	1527
Chuvas	02 - 07/05 12 - 17/05	86,913	34	1,665	5,328	347
		919,363	408	-	-	3055

O próximo tópico (item 5.3) aborda o artigo sobre o mapeamento dos processos exógenos na Ilha da Trindade, o qual foi redigido em outro idioma com o objetivo de ser submetido a um periódico internacional.

5.3 Mapping and assessment of erosion and gravitational mass movements on the volcanic island in Southern Atlantic Ocean: Trindade Island, Brazil

5.3.1 Introduction

We presented the first mapping that evaluates exogenous geological processes on Trindade Island. In a broader scenario, Brazilian's oceanic islands have experienced severe destructive phenomena, such as erosion and landslides, due to its landscape evolution conditioned by geological, geomorphological, meteorological, and anthropic settings (p. ex., Darwin, C. 1839; Almeida, 2006). The emerging area of the volcanic edifice of the Trindade Island has been marked by intense differential erosion and gravitational mass movements, thus configuring an extremely heterogeneous landscape with a predominantly high slope compared to the other islands.

Trindade Island, formed by alkaline magmatism such as the Fernando de Noronha archipelago (see Almeida, 2002), experienced a history of intense volcanic activity that lasted from the Middle Pliocene to the end of the Pleistocene (Pires et al., 2016a) and characterized by lava flows, pyroclastic rocks, intrusions (Almeida, 1961) and tectonics events (Barão et al., 2020). In such circumstances, the occupation of Trindade Island is vulnerable to erosive processes resulting from surface water action and the transport of geological materials conditioned by gravity. While dangerous non-volcanic processes have been evident in occupied watershed basins (Angulo et al., 2017; Santos et al., 2022), geological analyses and assessments are still lacking. Also, the geographical remoteness (Fig. 52) and the lack of maps with geoenvironmental databases hinder a multi-risk approach (e.g., Lópes-Saavedra and Martí, 2023) on Trindade Island.

To address this knowledge gap - starting from the hypothesis that occupation has been in a danger zone that presents a high risk to human safety- this research aims to map and analyze predisposing factors for erosion and mass movement occurrence. Thereby, in a global context for hazards policies, we contribute to the United Nations goals of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030 (UN-ISDR, 2015) and The Ocean Decade (2010-2030) (Ryabinin et al., 2019).



Fig. 52: Background of the study site: a) Trindade Island is an offshore Brazilian territory, ca. 1.140 kilometers east from the southeast coast, constitutes the easternmost portion of the Vitória-Trindade Submarine Ridge, and is located in the Amazônia Azul (Blue Amazon)⁹ area (blue color); b) the island has been ca. 13 km² of emergent area and the study area is located on the east of the island that comprises c) the occupation area, beaches (Andradas, Calheta, and Portuguesees) and volcanic peaks (Grazinas, Pontudo and Preto).

⁹ Trindade Island is included within the Amazônia Azul (Blue Amazon) zone (Fig. 52a), a political-strategical area covering 15.7 million km² based on parameters defined by the United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS) ratified in 1994 (Marinha, 2021). Also, Trindade Island is a Brazilian Natural Monument Unit (Brasil, 2018) and an important marine reserve in the South Atlantic Ocean.

5.3.2 Trindade Island

5.3.2.1 Geology

Trindade Island (20.5°S, 29.3°W) in conjunction with archipelago of Martin Vaz (20.47°S, 28.51°W), constitutes the easternmost portion of the Vitória-Trindade Submarine Ridge, with orientation E-W (Guazelli and Carvalho, 1978; Ferrari and Riccomini, 1999) (Fig. 52a). Martin Vaz last is located 48 km of the east of Trindade Island and due to its hilly morphology existence of occupation is unviable. Other volcanic mountains of this Ridge situated among Trindade-Martin Vaz and the Brazilian coast are submerged because have been destroyed by the erosion and today constituting guyots (Almeida, 2002). The islands are emerged, according to Almeida (2002), probably as its volcanic activity persisted for longer.

Trindade Island has formed by alkaline volcanic episodes, aged ca. 3.7 to 0.17 Ma (Cordani, 1970, Hansen et al., 1998; Pires et al., 2016a). Therefore, the island is formed by lava flows and intrusions with alkaline, sub-saturated composition, in addition to heterogeneous set of pyroclastic deposits (Almeida, 2006). It is essentially constituted by volcanic and sub-volcanic rocks, but also presents algae reefs, beaches of different compositions, dunes and numerous talus and alluvial-fan deposits (Almeida, 2006; Angulo et al., 2018).

Almeida (1961) recognized five magmatic events (Fig. 53a) designated from oldest to youngest: (1) Trindade Complex, (2) Desejado Sequence, (3) Valado Formation, (4) Morro Vermelho Formation and (5) Paredão Volcano Formation. Similarly, Almeida (1961) has differentiated eight sedimentary Quaternary units (Fig. 53b): (1) talus, (2) alluvial-fan deposits, (3) ancient sand and (4) gravel beaches, (5) present sand and (6) gravel beaches, (7) aeolian sands and (8) reefs. The island comprises some eroded remnant intrusive bodies preserved, of photolytic dykes, plugs and volcanic necks, with maximum elevation ca. 400 m on Monument peak and maximum diameter ca. 450 m on Morro Branco (Almeida, 2002).

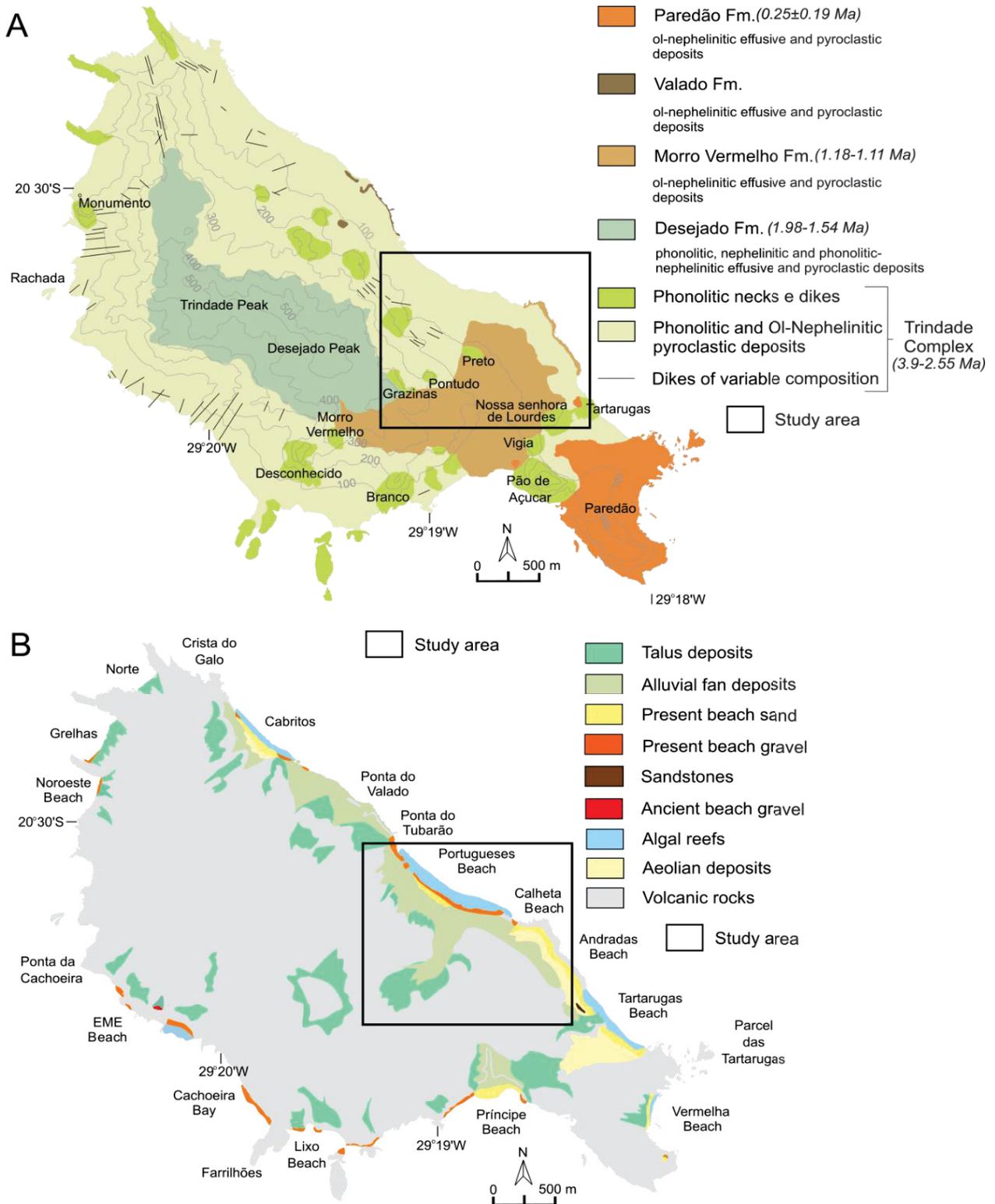


Fig. 53: Geology of Trindade Island on scale 1:10.000: a) volcanic units (modified from Figueiredo et al., 2022 after Pires and Bongioiolo, 2016b and Almeida, 1961) and the main peaks location; b) quaternary geological units (modified from Angulo et al., 2018) after Almeida (1961) and beaches location.

6.3.2.2 Geomorphology

Trindade Island terrain presents steeply sloping hills (Fig. 54), with prominent volcanic structures (e.g., dikes, lugs, necks, domes) surrounded by talus slope deposits, alluvial fans/cones (Almeida, 1961; Almeida, 2002; Angulo et al., 2018), avalanche and debris flow deposits. The island presents areas of arid constitute by badlands similar to desert environment, other regions at higher altitudes show an exuberant forest of giant fern, in addition to the inaccessible peaks located on slopes with large boulders, as well as slopes flatter to rugged and beaches of diverse configuration.

The current topography has been resulting of the severe erosion of the volcanic edifice due to its marine erosion, strong winds regime, episodic weather events, earthquakes contemporary to volcanic activity, geological structures and lithological types highly susceptible to erosion. Surface water runoff is an important agent in the evolution of the landscape, which is favored by the scarce vegetation, that results in various types of slope failures and linear erosion such as ravines and gullies. The coast is predominantly erosional as sea cliffs and beaches.

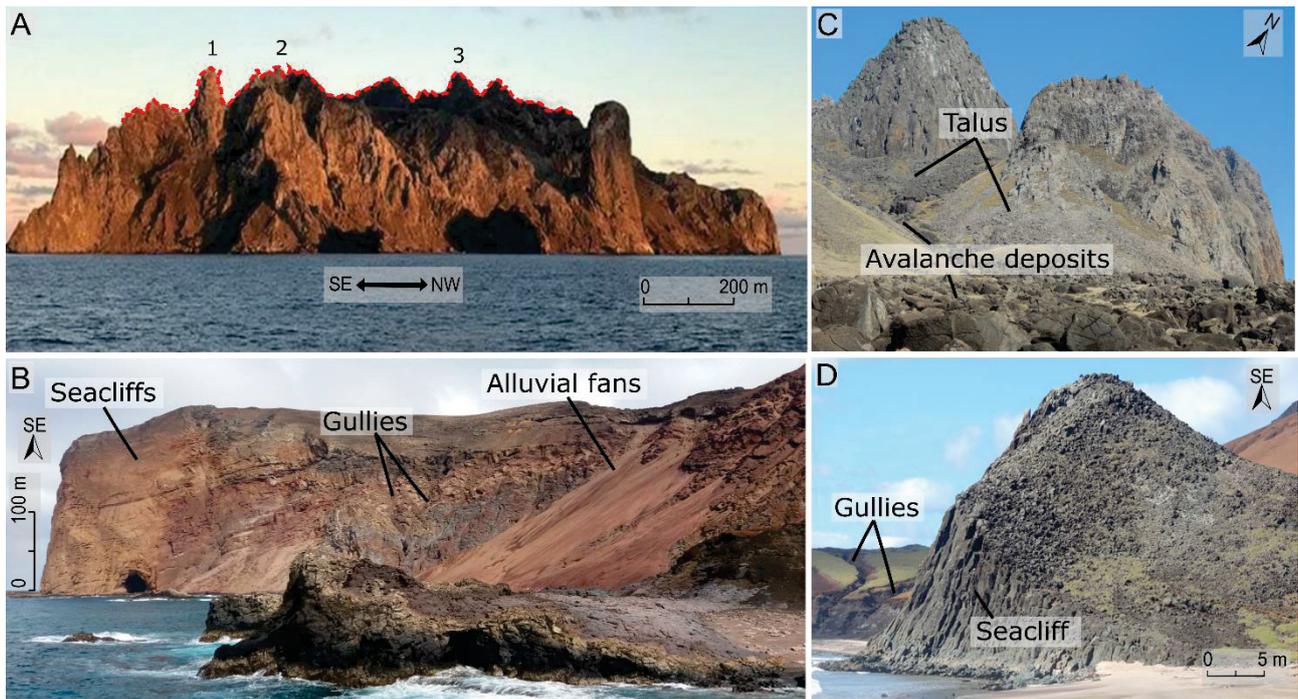


Fig. 54: Trindade Island landscape: (a) panoramic view of the relief with a highlight of the crest with NW-SE axis (indicated by red dotted) and Trindade (1), Desejado (2) and São Bonifácio (3) peaks; (b) Paredão Volcano's scoria cone, which is partially preserved and shows intense erosion in the large alluvial fans; (c and d) steeply sloping hills, volcanic necks, talus slope and debris flow deposits, which cover a large part of island's terrain and extend to the coast.

6.3.2.3 Environmental settings

Trindade Island is under the Tropical Oceanic climate that occurs in the South Atlantic Subtropical Anticyclone region (Cavalcanti et al., 2009). It consists of elevated temperatures that range between 22.9 °C and 27.7 °C, high humidity levels due to ocean evaporation, an annual average rainfall of 921 mm, and monthly averages with a minimum of 64 mm and that reach a maximum of 215 mm (Pedroso et al., 2017) (Fig. 55). According to these authors such weather conditions make the island vulnerable to extratropical cyclones, instability lines, and cold fronts. Santos (2018) reported that episodic rainfalls have been frequent which activates non-perennial that predominates in the Trindade Island (Fig. 56). Moreover, shrub vegetation predominates on the island, except for the high-altitude central region that presents giant endemic ferns (e.g. da Silva and Alves, 2017), and the surroundings of the occupation that are characterized by large exotic trees that exceed 3 m in height.

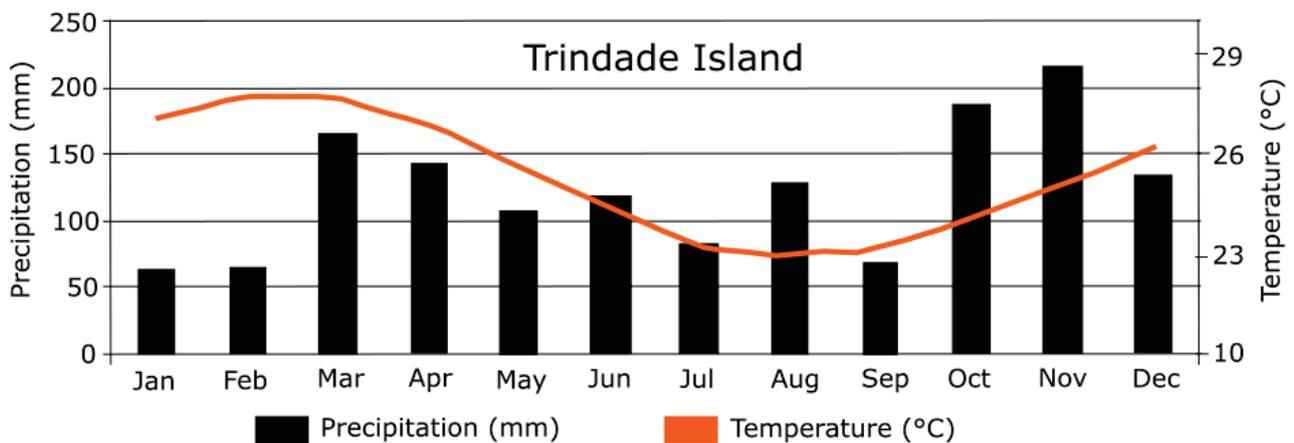


Fig. 55: Climatic settings of Trindade Island according to Pedroso et al. 2017.

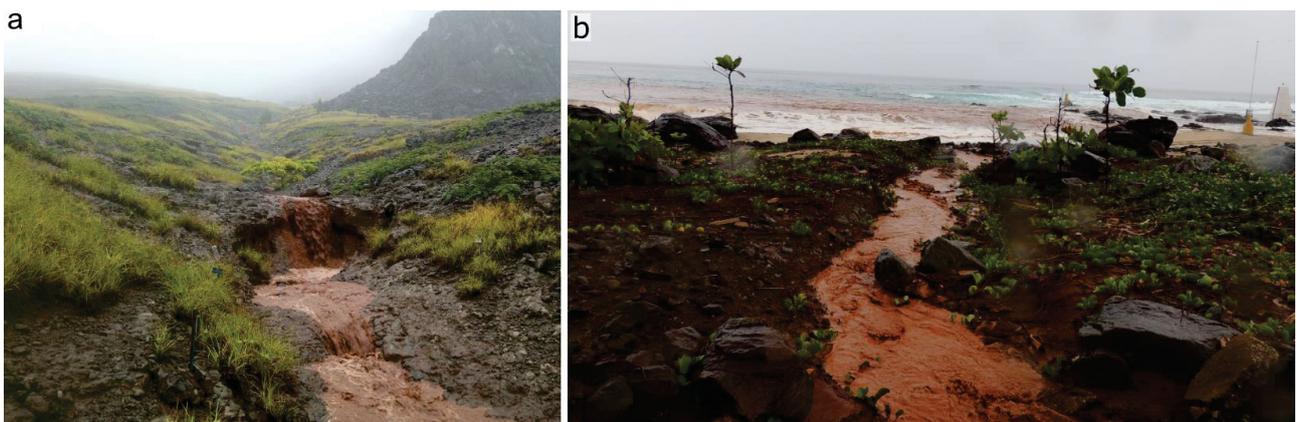


Fig. 56: Non-perennial drainages upstream of anthropogenic infrastructure: (a) and (b) drainages actives by rainfall intensities between 2.3 to 16.5 mm/h over a 12-hour interval (Santos, 2018).

6.3.2.4 Occupation history

Since its discovery in the early 16th century, Trindade Island has been sporadically and discontinuously occupied, and only since 1957, it has been permanently inhabited by the Brazilian Navy (Lobo, 1919; Mayer, 1957; Almeida, 2002) and nowadays the island is also an important marine reserve of the southern Atlantic, tumbled in Brazil as a Natural Monument Unit (Brasil, 2018).

A highlight historical point was the introduction of animals, such as pigs, goats and sheep by the English and Portuguese colonizers, as well as during the First World War, by the garrison that occupied the island (Almeida, 2002, Martins et al., 2021). These animals caused severe devastation of the vegetation cover, with the consequent development of stony soils (Alves, 1998). The account from Barth and Alvarez (2002) shows that in the 50's the vegetation was still in strong regression. This combined with indiscriminate logging has caused an imbalance in flora and fauna local, contributed to the accelerated erosion of the island's slopes, which resulted in the loss of 1 to 2 m of fertile soil thickness, and also altered the outflow of the streams and caused disappearance of several springs (Barth and Alvarez 2002; Marinha, 2014). The animals were extinct in 2004 and the recovery of ground vegetation has been observed in some regions of the island (Marinha, 2014).

5.3.3 Study area

The study area (latitude 20°30'40" S and longitude 29°18'40" W) is located at the eastern portion of Trindade Island, bounded by watersheds that encompass the occupation and infrastructure (Fig. 52b,c). The site was chosen due to the presence of the most varied erosive processes and landslides with the potential to affect the occupation, mapped on a scale of 1:1,500, upstream to the anthropogenic activities and constructions.

In the study area occur deposits from the Trindade Complex and Morro Vermelho Formation. In general, the Trindade Complex is the oldest volcanic manifestation above to sea level, aged ca. 3,9 to 1,1 Ma (Cordani, 1970; Pires et al., 2016), is distributed all along the island. This unit is formed by pyroclastic deposits (lapilli tuft, breccia, tuft breccia) and subvolcanic intrusive bodies, which varies from nepheline to phonolite (Almeida, 1961). The Trindade Complex is highly fractured and cut by diachases, mainly oriented among NW-NNW trends in the northern and NNE trend on the southern slopes (Almeida, 2006). These rocks constitute the basement, but also occur as cover most of the slopes of the northwest (NE) portion of the island. The source area these unconsolidated materials are the outcrops such as phonolitic domes, plugs, necks and dykes of large dimensions, which can reach up to 400 m diameter (Almeida, 2002). These volcanic structures are the most pronounced in the landscape and are exposed due to extensive erosion of Trindade Complex has experienced (Almeida, 1961).

In the region of the data collection there are still preserved phonolite necks, named Preto Peak, Pontudo Peak and Grazinas Peak. The Morro Vermelho Formation with age disparate in the literature, has last dated by Pires et al. (2016), ca. 1.18 to 1.11 Ma, and emerge from the occupied eastern to the central portion of Trindade Island. This unit as the result of an explosive eruption that manifested in the paleo valley of the central region of island, which culminated in the intersperse of ankaratritic (nephelinitic) lava flows, pyroclastic (Almeida, 1961; Cordani, 1970, Marques et al., 1999) and epiclastic deposits.

5.3.4 Methodology for site mapping

To properly map the study area and assess the erosion and mass movement in terms of mechanisms, different methods are used, as presented in Fig. 57. Detailed environmental geological mapping (scale: 1:1500) – using several techniques from engineering geology – was performed. Also, extensive field observations (fieldwork took place in 2018, 2019, and 2022) were collected to obtain the lithological characteristics, types of unconsolidated materials, geomorphological settings, types of exogenous processes, structure, and joint geometries, and weathering and rock strength profiles. In the landform units delimitation step we used spatial analysis (using Geographic Information System) and fieldwork.

We performed a detailed topographic survey to increase the credibility and accuracy of this study by providing a correct and accurate background in conjunction with valuable data for engineering/geological zonation of the area and process analysis. We used a global navigation satellite system, remotely piloted aircraft photogrammetry (see Santos et al., 2022), and pre-existent photogrammetry (DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2011) with 30 cm resolution, in conjunction with field recognition. In the present study, we used the classification for mass movements defined by Hungr et al. (2013) after Varnes (1978) and Cruden e Varnes (1996). From an erosion perspective, classical approaches were applied, as exemplified by studies in many parts of the world (e.g., Ayres, 1936; Morgan, 1995; Tragsa et al., 1998; Desta and Adugna, 2012, Rotta e Zuquette, 2015). The digital models were performed by ArcGis 10.6.1 software using the raster analysis functions. We subsequently performed the slope classification according to the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA, 2013). We have determined the fluvial hierarchy from the drainage network obtained by the hydrological analysis tool from ArcGis using Strahler’s method (Strahler, 1957).

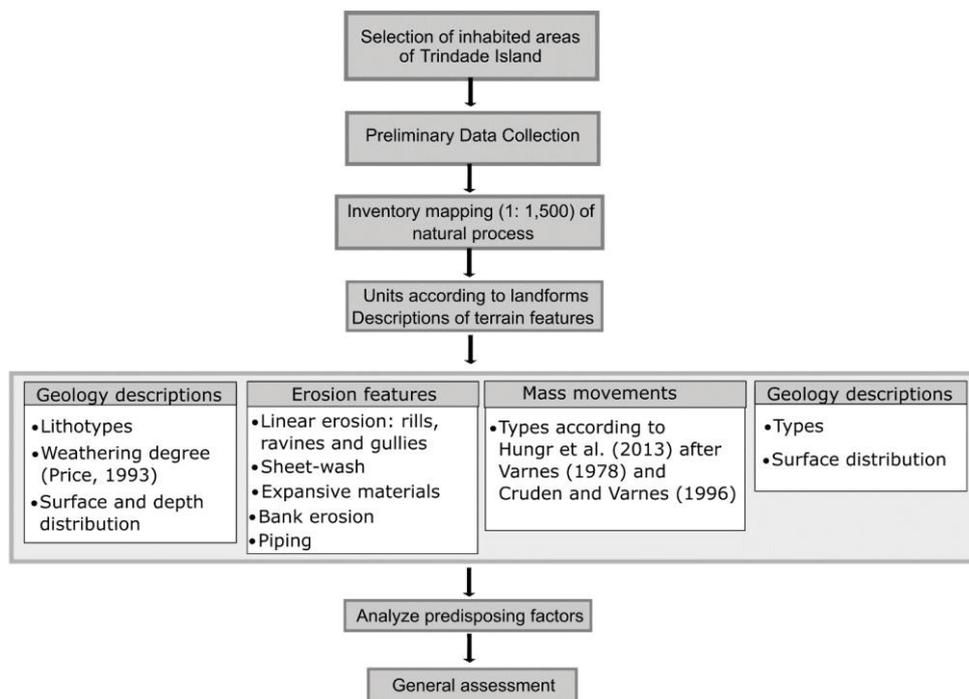


Fig. 57: General workflow of the primary steps of the research.

5.3.5 Results

5.3.5.1 Morphological and hydrogeological properties

The study area was classified into 23 micro-basins up to 4th order, with a total area of 1.4 km², in which ephemeral rivers have been predominant - only two have been perennial (Fig. 58), and the altimetry amplitude has been between 0 and 490 m (distance of 900 m) (Fig. 58b). In the micro-basins, the most predominant slope has been relief strongly waved (slope between 20 and 45%), occupying an area of 35% of the study area. Notably, in 22% of the total area the relief has been waved (slope between 8 and 20%), 21% has been mountainous (slope between 45 and 75%), 14% has been steep sloped (> 75%), 7.7 % has been smoothly waved (slope between 3 and 8%), and 0.3% has been plane (slope between 0 and 3%) (Fig. 58c).

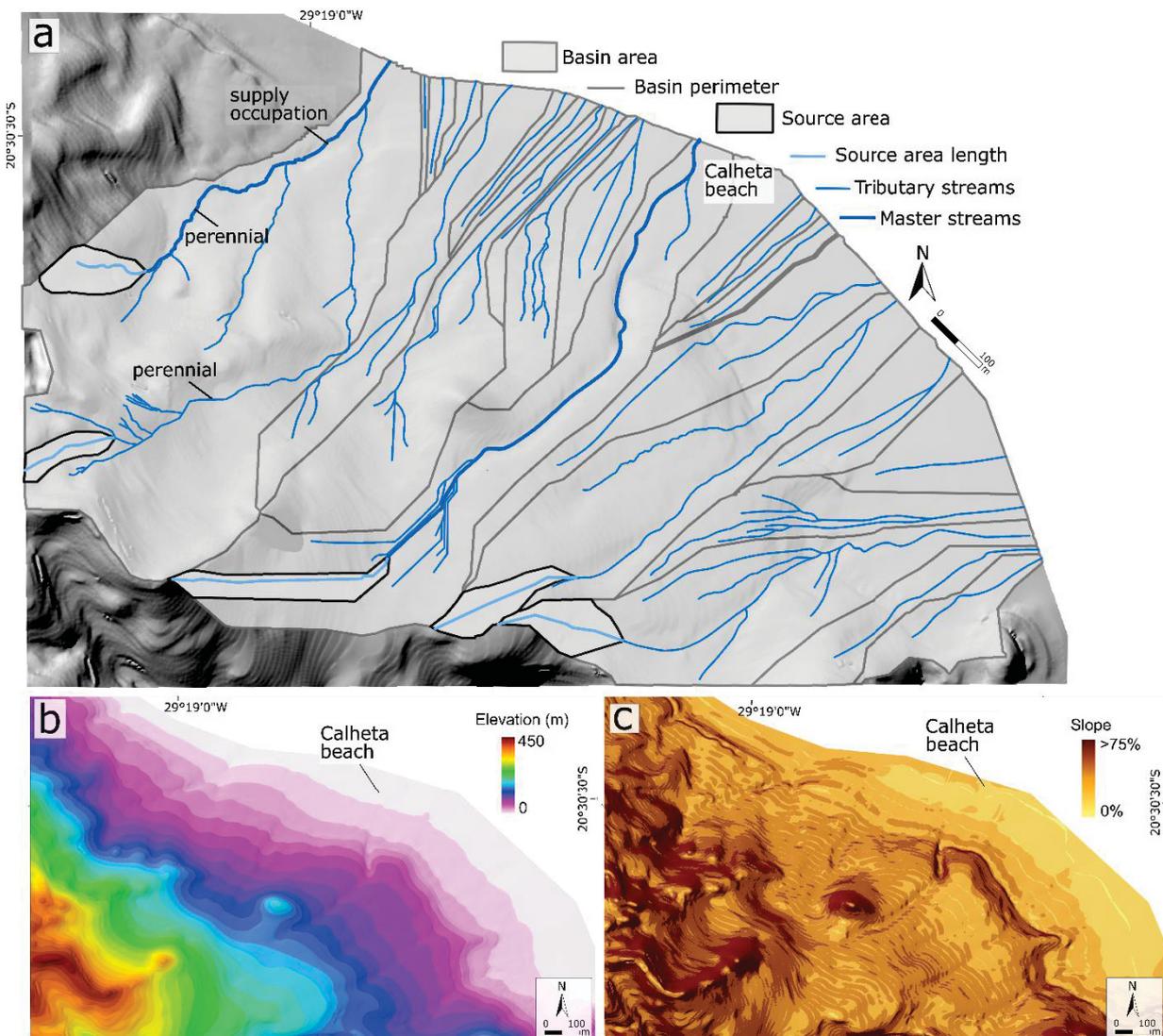


Fig. 58: Morphometric parameters of study area: a) spatial distribution of drainage network obtained by the hydrological analysis tool and its watershed basin and digital model of a) elevation and b) slope.

5.3.5.2 Inventory: units and descriptions

We recognized units based on distinct landforms, descriptions of outcrops, and morphometric analyses. Such mapping included coastal zone with anthropogenic infrastructure, ephemeral and perennial streams, hillslopes with gully erosion, hillslopes covered by avalanche deposits, steeply sloping hills, and volcanic peaks encircled by the accumulation of talus slopes (Fig. 59 and 60). Some units with similar lithology sequences were grouped to facilitate the exposition of the results (Table 10).

The rock substrate that supports the landscape differences was composed of phonolites and pyroclastic deposits from the Trindade Complex (ca. 40 %) and nephelinites and pyroclastic deposits from the Morro Vermelho Formation (ca. 60%). In addition, quaternary deposits from erosional and gravitational processes covered ca. 44% of the ground surface, while 56% of total area represents bare surfaces.



Fig. 59: Study area settings a) panoramic view (A-B) of the study area and (b) main landforms units facing the occupation.

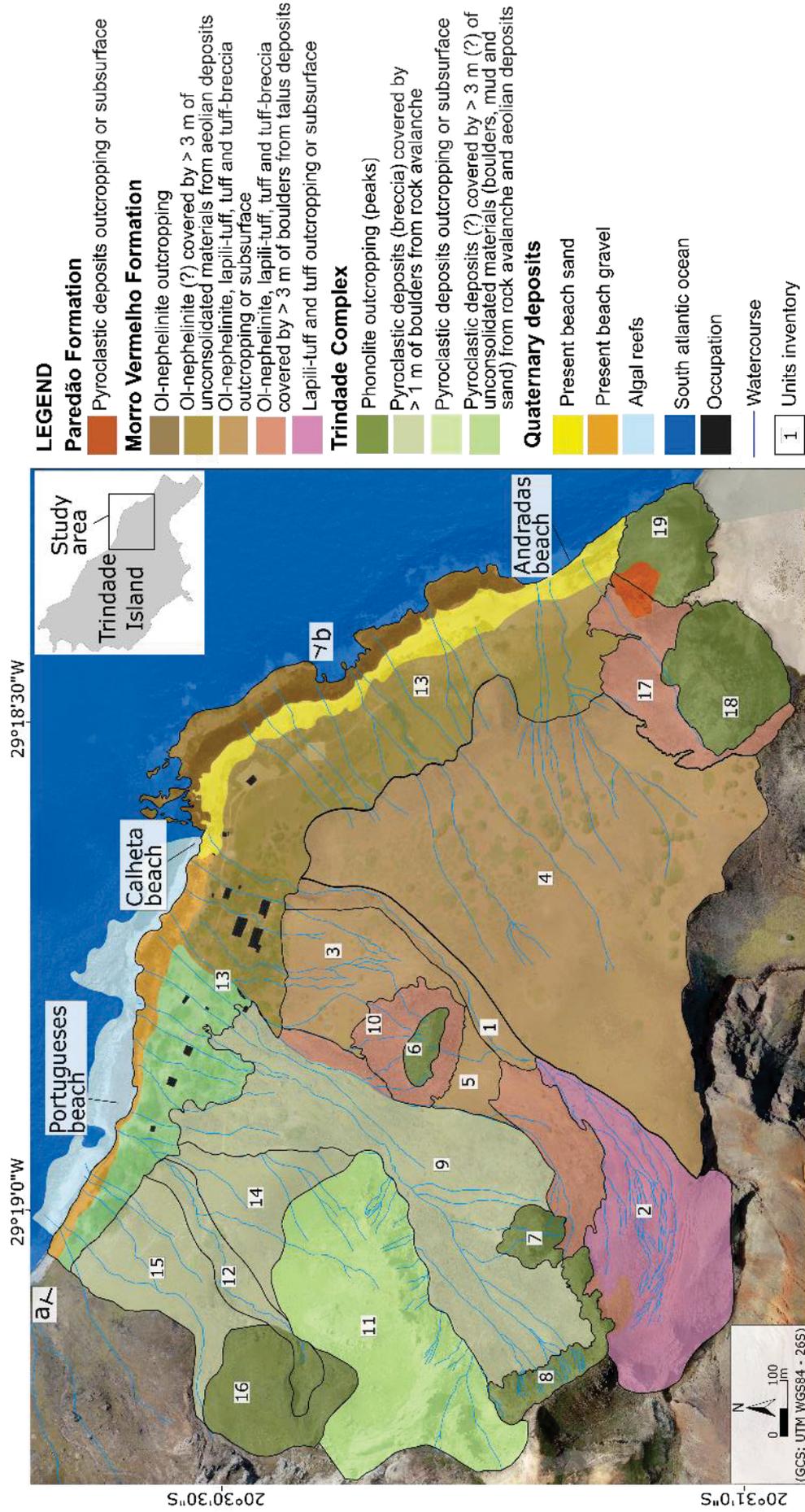


Fig. 60: Landforms mapping of the occupied watershed basins of Trindade Island: units delimited according to landforms of the study area where the descriptions of the erosion and gravitational mass movements.

Table 10: Summary of the inventory of earth surface features. These features were grouped into 19 units according to different landforms. (MVF: Morro Vermelho Formation and TC: Trindade Complex).

Unit	Landform type	Geology description	Feature Types	
			Mass movements	Erosion
1	Erosive valley (geological fault system) facing Calheta beach	MVF: Olivine nephelinite lava flows (high fracturing degree, locally friable and variable vesicle density) interlayered with fragmented pyroclastic deposits sequences (tuff-breccia, tuff and lapilli-tuff)	Sliding mass (predominantly mud, and secondary debris and boulders) following valley course; large mass movements (rock compound slide); subsidence (sinking and collapsing features on the slopes)	Bank erosion, piping, expansive-rocks area with transversal and longitudinal cracks on surface and depth; gully feature downstream
2	Remnant scoria cone	MVF: friable pyroclastic deposits (tuff and lapilli-tuff)	Sliding mass (predominantly mud, and secondary debris and boulders)	High linear erosion density (rills, ravines and gullies)
3	Hillside facing anthropogenic infrastructure	MVF: Olivine nephelinite lava flows (high fracturing degree, locally friable and variable vesicle density) interlayered with fragmented pyroclastic deposits sequences (tuff-breccia, tuff and lapilli-tuff)	Evidence of spreading, creeping and rock compound slide; sliding mass (mud, debris and boulders)	Bank erosion, piping, expansive-rocks area with transversal and longitudinal cracks on surface and depth; High linear erosion density (rills, ravines and gullies); sheet-wash;
4	Hillside facing Andradas beach	MVF: Olivine nephelinite lava flows (high fracturing degree, locally friable and variable vesicle density) interlayered with fragmented pyroclastic deposits sequences (tuff-breccia, tuff and lapilli-tuff)	Sliding mass (predominantly mud, and secondary debris and boulders)	High linear erosion density (rills, ravines and gullies), sheet-wash, evidence of expansive geological materials (cracks on surface and depth)
5	Slope facing Preto peak	MVF: weathered and saprolitic lapilli-tuff and tuff of MVF	Sliding mass (predominantly mud, and secondary debris and boulders)	Evidence of expansive geological materials (cracks on surface and depth)
6, 7 and 8	Steeply sloping hills facing anthropogenic infrastructure	TC: remaining volcanic structures composed of phonolitic	Rock fall, rock block topple, rock flexural topple, rock planar slide, rock wedge slide, and rock irregular slide (or rock collapse)	Erosion predominant at discontinuities
9	Steeply hillside facing anthropogenic infrastructure	TC: surface is covered by boulders of phonolite and locally of weathered phonolitic breccias; bedrock (hillside substrate) are characterized by pyroclastic phonolitic breccias	Rock avalanche; rock fall, rock block topple, rock compound slide, rock irregular slide and debris flow	Erosion predominant at bedrock
10	Talus slope facing anthropogenic infrastructure	TC: unconsolidated boulders of phonolites; MFV: bedrock (slope substrate) are sequences describe in unit 3	Talus deposits; rock fall, rock block topple; rock avalanche	Erosion predominant at discontinuities of boulders and at bedrock
11	Hillside facing occupation and Portuguesees beach	TC: composed by pyroclastic phonolitic breccias	Rock fall, rock block topple, rock compound slide, rock irregular slide and debris flow	Erosion predominant at discontinuities and at pyroclastic layers

12	Perennial river that supply the occupation	TC: Pyroclastic deposits	Unconsolidated materials (boulders, debris and mud) following the water-flow course; mud suspension at river water-flow	Accelerated streambank erosion; evidence of expansive rock zones (transversal and longitudinal cracks), subsidence (sinking and collapsing features)
13	Coastal area	Unconsolidated and transported materials deposits, composed of mud, debris and boulder accumulation derived from MVF and TC	Sliding mass (predominantly mud, and secondary debris and boulders)	Coastal erosion
14, 15	Slope facing Portuguese beach	TC: surface is covered by boulders of phonolite and locally of weathered phonolitic breccias; bedrock (hillside substrate) are characterized by pyroclastic phonolitic breccias	Rock avalanche; rock fall, rock block topple, rock compound slide, rock irregular slide and debris flow	Erosion predominant at bedrock
16	Steeply sloping hills facing Portuguese beach	TC: remaining volcanic structures composed of phonolitic	Rock fall, rock block topple, rock flexural topple, rock planar slide, rock wedge slide, and rock irregular slide (or rock collapse)	Erosion predominant at discontinuities
17	Talus slope facing Andradas beach	TC: unconsolidated boulders of phonolites; MFV: bedrock (slope substrate) are sequences describe in unit 3	Talus deposits; rock fall, rock block topple; rock avalanche	Erosion predominant at discontinuities of boulders and at bedrock
18, 19	Steeply sloping hills facing Portuguese beach	TC: remaining volcanic structures composed of phonolitic (dykes)	Rock fall, rock block topple, rock flexural topple, rock planar slide, rock wedge slide, and rock irregular slide (or rock collapse)	Erosion predominant at discontinuities

5.3.5.2.1 Unit 1, 2, 3, 4 and 5

These units where Morro Vermelho Formation rocks outcrop (Fig. 61) characterized by olivine nephelinite described as irregular and discontinuous beds, with high fracturing degree, locally friable and variable vesicle density. Olivine nephelinite lava flows are interlayered with fragmented pyroclastic deposits. These pyroclastic sequences are predominantly tuff-breccia at the base with a maximum thickness of 45 m. The beds are irregular and discontinuous, predominantly friable, highly weathered and contain a high cavity density up to 2 m in diameter. At the top of tuff-breccia occurs lapilli-tuff interlayered with tuff, maximum thickness of 1 meter, irregular and discontinuous beds, completely weathered, friable and partially preserved texture.

In addition, we identified evidence of expansive rock zones where pyroclastic deposits occur (transversal and longitudinal cracks on surface and depth), besides evidence of natural subsidence (sinking and collapsing features on the slopes). In these units soils are characterized by centimetric thickness, low degree of pedogenetic evolution, and are predominantly transported. Residual soil occurs locally in low slope regions, however, the rock exposure on the relief surface is predominant. The access tracks match areas that present accelerated erosion.

These units presented only ephemeral streams. Also, these units present in general low vegetation cover (sparse, small to medium sized, eventually sloping) with shrub predominantly. The exotic species *Guilandina bonduc* (medium size) stands out, characterized by isolation, without other species, such as grasses that are common and endemic to the region, creating erosion halos and surface with coarser soil texture on the surrounds.

5.3.5.2.2 Unit 6, 7 and 8

Steeply sloping hills from Trindade Complex, respectively named: Preto Peak (Unit 6), Pontudo Peak (Unit 7), and Grazinas Peak (Unit 8) (Fig. 62). These units are remaining volcanic structures composed of phonolitic with a high degree of fracturing, slightly to moderately weathered, which weathering is predominant at discontinuities. Five main discontinuity families were identified in field, which present preferred direction NS and N30W. These units presented evidence of rock fall, rock block topple, rock flexural topple, rock planar slide, rock wedge slide, and rock irregular slide (or rock collapse).

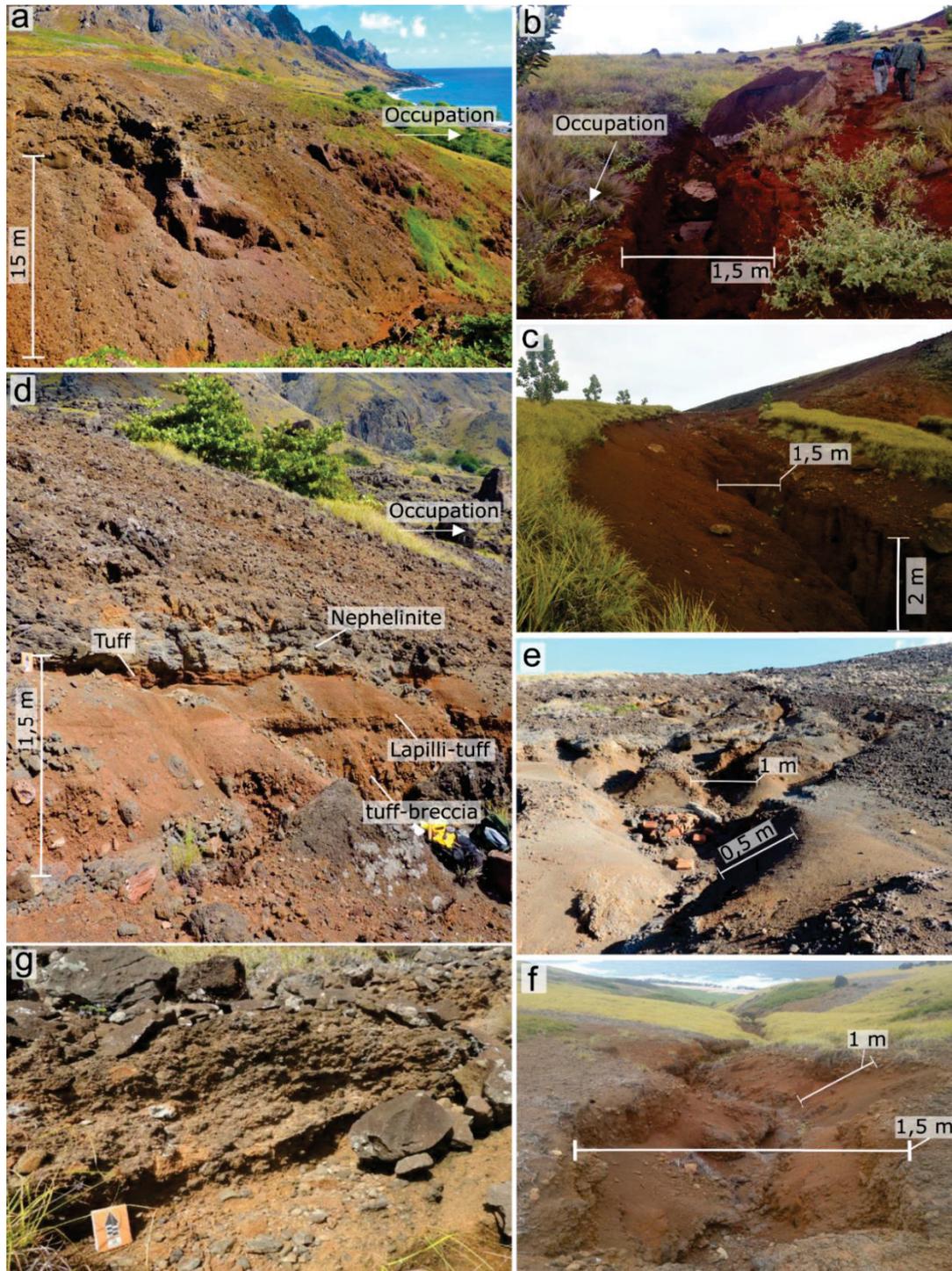


Fig. 61: Main features of inventory that occur at Morro Vermelho Formation: (a) Unit 1: large mass movements that top of features are coincident with contact of distinct geotechnical materials: nephelinite (top) and tuff breccia (base); (b) Unit 1: boulders following the course of the tributary stream; (c) Unit 2: Remnant scoria cone of Morro Vermelho Formation with incised gullies formed by the erosion of the weathered pyroclasts; (d) Unit 2: profile typical of Morro Vermelho Formation characterized by tuff-breccia at base of the outcrop, overlaid by a layer of lapilli-tuff, tuff and nephelinite, respectively; (e) and (f) Unit 4: rills and features upstream of the slope, and ravine that reach the altered and saprolitic pyroclastic deposits, respectively; (g) Unit 5: tuff-breccia at base of the outcrop, overlaid by layers of lapilli-tuff interleaved with centimetric layers of tuff, in which are exposed on the surface or overlaid by boulders and debris from remaining volcanic structures (hills) of the Trindade Complex.

5.3.5.2.3 Unit 9

Steeply hillside (Fig. 62) is characterized by approximately 0,3 km², 375 m of topographic amplitude, 850 m long in dip direction, and a maximum of 380 m thick, whose geological materials belong to the Trindade Complex. Unit 9 surface is covered by transported unconsolidated materials composed of phonolite (slightly to moderately altered) and locally of weathered phonolitic breccias. These unconsolidated materials are predominantly large boulders with 1 to 30 m in diameter forming metric to decametric layers overlapping complex mass movement deposits. Were identified features of rock avalanches in most of the unit area. Were identified deposits of rock fall, rock flexural topple, and rock block topple. Also, were identified features of rock compound slide, rock irregular slide, and debris flow.

These movements and deposits have main directions N30W, N-S, and N30E, which are coincident with the location of the building. The slope hills of units 6, 7, and 8 represent the main source of the unconsolidated materials. The path of unconsolidated materials (substrate) that supports these large deposits, and occasionally outcrop, are characterized by pyroclastic phonolitic breccias from Trindade Complex, described as poorly sorted, extremely altered, predominantly friable on the surface, and present completely altered portions, in which occur residual soil formation. The erosion process and debris flow were identified as an associate with phonolitic breccias outcropping zones, and on the eastern boundary (in-depth and surface) where contact between Morro Vermelho Formation units and Trindade Complex occurs. Unit 9 is characterized by ephemeral streams and is limited to the west by one of the only perennial streams in the study area. Also, small to medium-sized shrubs cover 55% of the surface. However, was observed the advance of the accelerated erosion at areas where *Guilandina bonduc* occur.

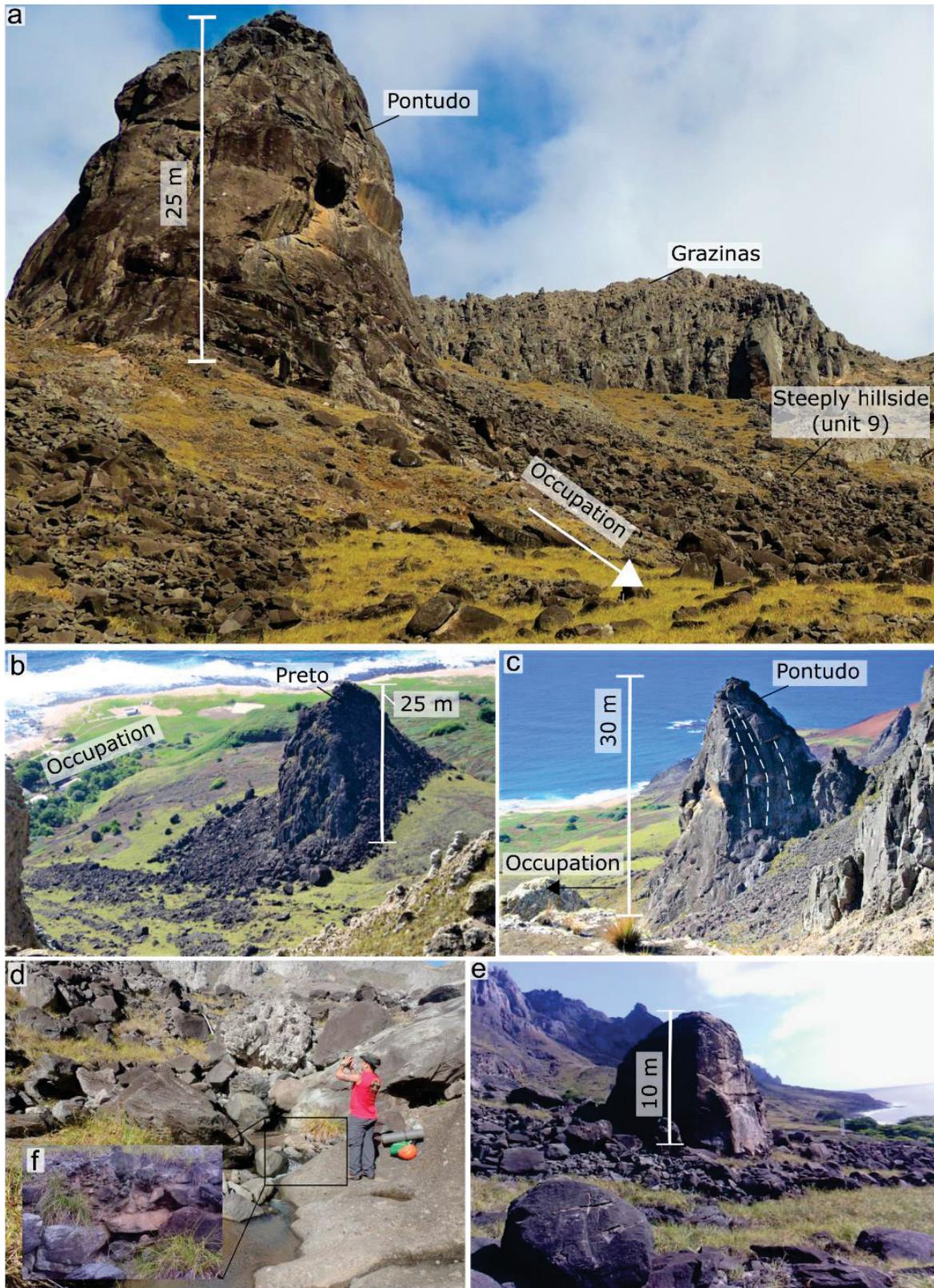


Fig. 62: Remaining isolated volcanic hills and associated deposits of Trindade Complex: (a) Unit 7 and 8: Pontudo and Grazinas peak facing anthropogenic infrastructure; (b) Unit 6: Preto Peak whose movement mass direction is coincident with occupation; (c) Unit 7: detail of rock flexural topple of Pontudo Peak; Unit 9: (d) ephemeral stream at the western boundary; (e) surface covered by large boulder deposits and (f) detail of substrate that supporting unconsolidated deposits composed of pyroclastic phonolitic breccias.

5.3.5.2.4 Unit 10

Talus slope composed of large boulder deposits which surround the Preto Peak of unit 6, this identified as the source of the deposits covering the unit 10 surface (Fig. 63). The talus deposits are phonolites from Trindade Complex characterized by slightly to moderately weathered with dimensions varying from metric to decametric size, and with a maximum thickness of 14 m. These deposits have main directions coincident with the buildings location, between N30W and N30E. The substrate, that supporting these large deposits, is characterized by sequences of the Morro Vermelho Formation (described in the unit 3) with an advanced condition of erosion and weathering.

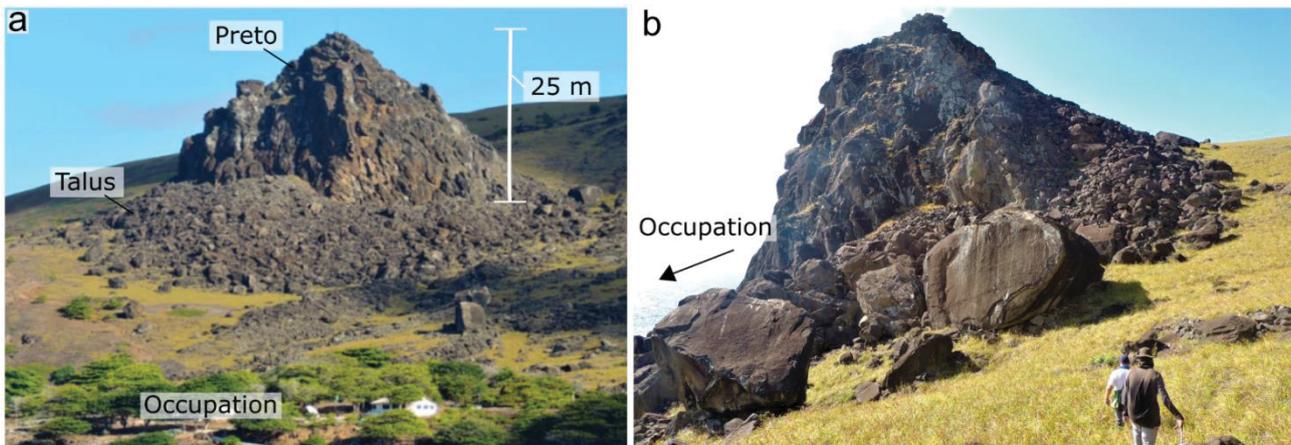


Fig. 63: Talus slope facing anthropogenic infrastructure (inventory's unit 10): (a) unconsolidated materials surrounding Preto Peak, whose preferred directions match with the buildings location of Trindade Island; (b) detail of large deposits's boulders.

5.3.5.2.5 Unit 11

The hillsides from unit 11 (located upstream of units 9, 14 and 12) facing the occupation and Portugueses beach (Fig. 64). This unit is composed by pyroclastic rocks of the Trindade Complex with advanced weathering. We identified rock fall, rock block topple, rock compound slide, rock irregular slide and debris flow. Erosion processes were described at discontinuities and along pyroclastic layers. Unit 11 presented low density of vegetation characterized by small to medium-sized shrub.

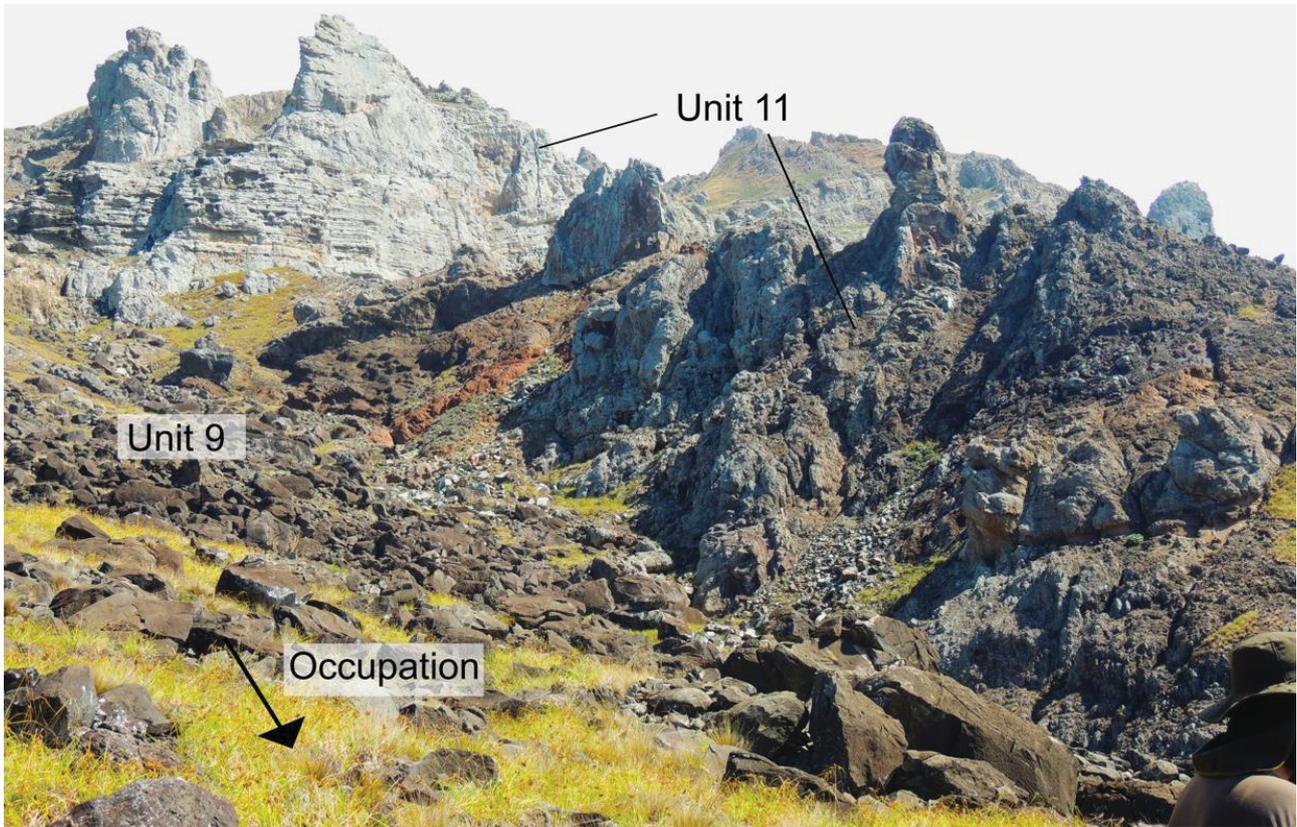


Fig. 64: Hillsides facing occupation and Portugueses beach of inventory's unit 11.

5.3.5.2.6 Unit 12

This unit corresponds to the only perennial river (Fig. 65) with sufficient capacity to supply the occupation (about 30 people) in which a water catchment infrastructure was built (300 m distance of occupation). It has approximately, 0,03 km², is 450 m long in dip direction and is 0.5–1.5 m thick. In good weather conditions, the flow rate is about 1.2 m³/h along the river and 0,6 m³/h at the river upstream. Pyroclastic layers of Trindade Complex were identified along river margins, whose horizons are discontinuous, unstable, highly altered, and predominantly friable with a high density of cavities (up to 2 m in diameter), and 3 m maximum thick at the downstream river.

Unit 12 is characterized by accelerated streambank erosion and presents unconsolidated materials (boulders, debris, and mud) following the water-flow course. It was observed an intense mud suspension at river water flow when heavy rainfall events occur, which prevents the consumption of water from occupation during these episodes. Also, were identified in riverbank outcrops evidence of expansive rock zones (transversal and longitudinal cracks), and subsidence (sinking and collapsing features). The shrub vegetation and medium to large vegetation occur scattered in the marginal areas. However, in the areas where *Guilandina bonduc* occurs, it was observed the advance of accelerated erosion, which is coincident with water catchment infrastructure.



Fig. 65: Perennial river which supplies the Trindade Island's occupation: (a) region near the river's source characterized by boulders deposits; (b) upstream region characterized by boulders, debris, and mud following the water-flow course; (c) streambank erosion near water catchment infrastructure; and (d) Saprolite of Trindade Complex at base of the outcrop, overlaid by unconsolidated boulders deposit.

5.3.5.2.7 Unit 13

The coast unit represents the flattest study area region, where the occupation infrastructure has been located. Unit 13 characterized by unconsolidated and transported materials deposits, composed of mud, debris, and boulder accumulation derived from MVF and TC. The occupation region has been large exotic trees that exceed 3 m in height, and residual soil formation. Also, this unit is composed of modern sand at Calheta beach (used as access to the Trindade Island) and gravel beaches at Portugueses beach.

5.3.5.2.8 Unit 14, and 15

Hillsides with relief strongly waved and waved (Fig. 66) and the surface of these units are covered by transported unconsolidated materials composed of phonolite (slightly to moderately altered) and locally of weathered phonolitic breccias. These unconsolidated materials are predominantly large boulders with 1 to 30 m in diameter forming metric to decametric layers overlapping complex mass movement deposits. Were identified features of rock avalanches in most of the unit area. Also, were identified features of rock compound slide, rock irregular slide, and debris flow.

These deposits have main directions coincident with Portugueses beach. The path of unconsolidated materials (substrate) that supports these large deposits, and occasionally outcrop, are characterized by pyroclastic phonolitic breccias from Trindade Complex, described as poorly sorted, extremely altered, predominantly friable on the surface, and present completely altered portions, in which occur residual soil formation. The substrate, that supports these large deposits, is characterized by pyroclastic rocks of the Trindade Complex with moderate to advanced weathering (Fig. 66b). Units 14 and 15 presented only ephemeral streams, and small to medium-sized shrubs cover most of the surface.

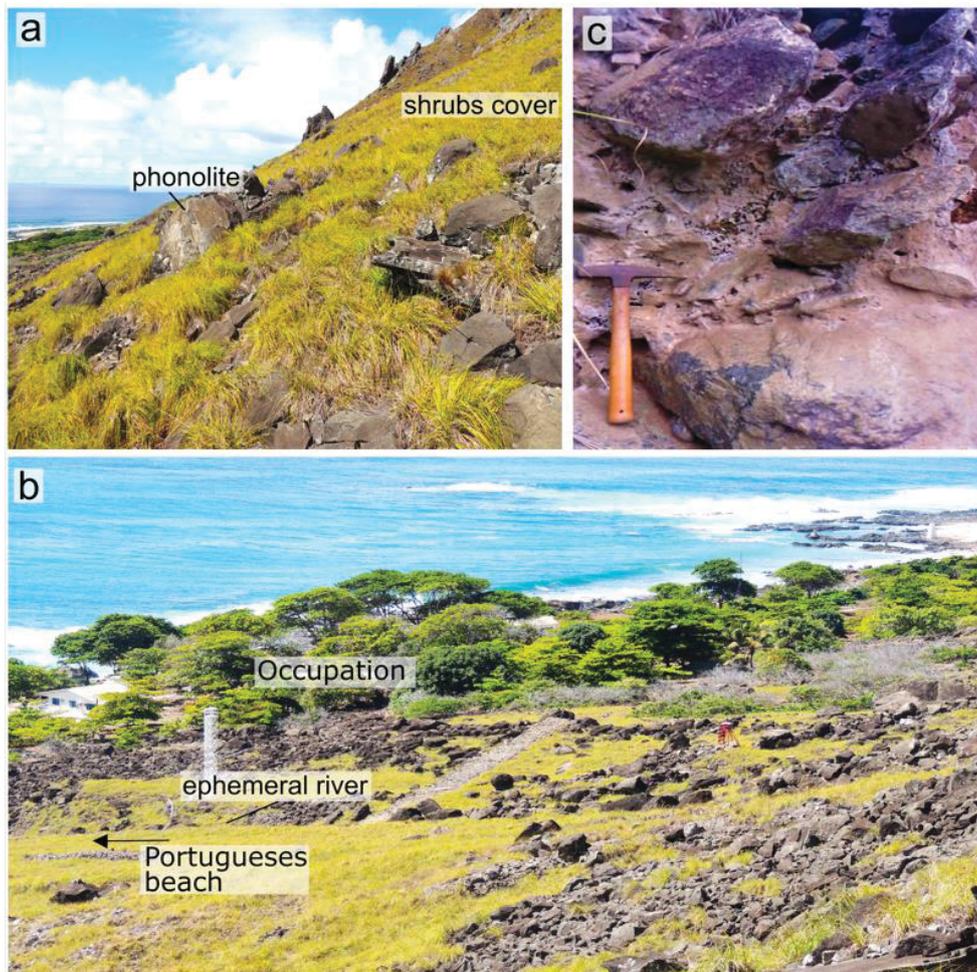


Fig. 66: Slopes facing Portugueses beach of inventory's (a) unit 14 and (b) unit 15, with general view with shrub vegetation covering the large boulders deposits and (c) substrate that supports these large deposits characterized by pyroclastic rocks from Trindade Complex.

5.3.5.2.9 Unit 16

Remaining volcanic structure composed of phonolitic from Trindade Complex. We identified a high degree of fracturing, slightly to moderately weathered, which weathering is predominant at discontinuities. Unit 16 presented (similar to units 6,7, 8, 18 and 19) evidence of rock avalanche, fall, rock block topple, rock planar slide, rock wedge slide, and rock irregular slide (or rock collapse) (Fig. 67).

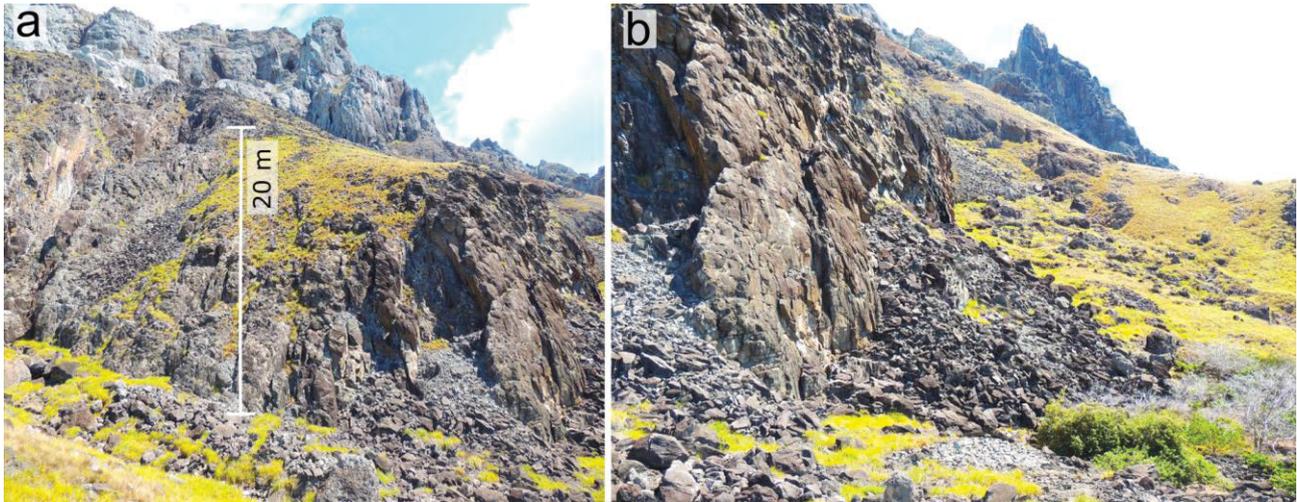


Fig. 67: Steeply Hillside, from Complex Trindade, facing Portugueses beach: (a) and (b) Unit 16 is characterized by gravitational processes, such as rock avalanche, fall, and topple.

5.3.5.2.10 Unit 17, 18, and 19

These units are located at the eastern boundary of the study area. Unit 17 is similar to unit 10, where it is composed of large boulder deposits which surround the dyke of unit 18 (Fig. 68). These talus deposits are phonolites from Trindade Complex characterized by slightly to moderately weathered with dimensions varying from metric to decametric size and facing Andradas beach. The substrate, that supports these large deposits, is characterized by sequences of the Morro Vermelho Formation (described in unit 4) with an advanced condition of erosion and weathering.

Units 18 (Nossa Senhora de Lourdes Peak) and 19 (Tartarugas peak) are dykes from Trindade Complex (Fig. 68), composed of phonolites from Complex Trindade, with a high degree of fracturing, slightly to moderately weathered, which weathering is predominant at discontinuities. These units presented evidence of rock fall, rock block topples, rock flexural topple, rock planar slide, rock wedge slide, and rock irregular slide (or rock collapse).

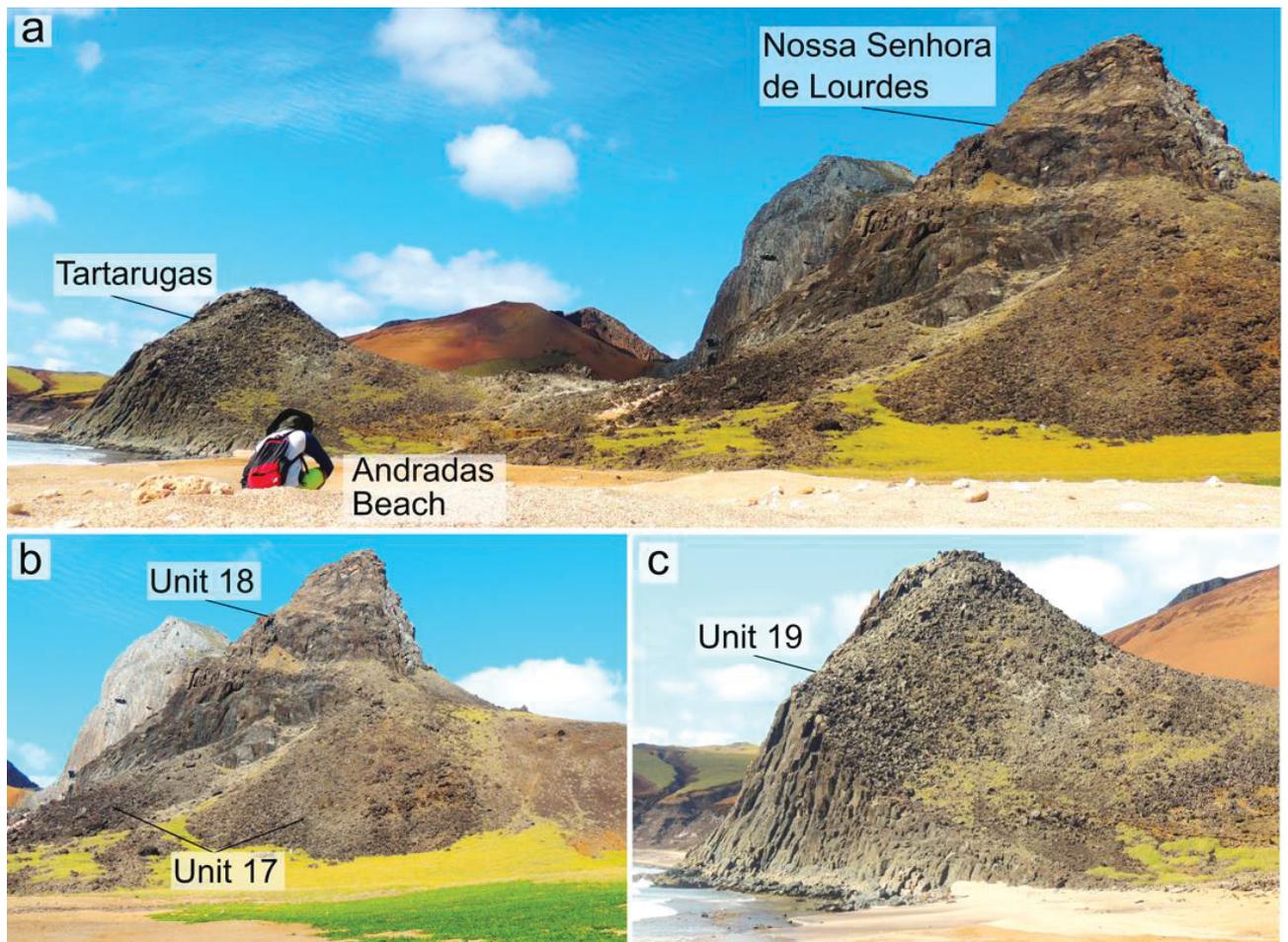


Fig. 68: Units located at the (a) eastern boundary of the study: (b) remaining dyke from Trindade Complex (unit 19 from Nossa Senhora de Lourdes peak) and associated deposits (unit 18) and (c) remaining dyke from Trindade Complex facing the ocean (unit 19, Tartarugas beach).

5.3.6 Discussion

6.2.6.1 Surface process and mechanisms interpretation

The following summarizes the main insights regarding erosive processes and mass movements in the surveyed area.

- Erosional process

Hillsides within the Morro Vermelho Formation (inventory units 1, 2, 3, 4, 5) are the most problematic areas in terms of erosion due to the high density of linear features, significant rainfall runoff, and low vegetation density. The substrate of units 9 and 12, where pyroclastic rocks of Trindade Complex occur, presents an advanced erosion degree. The dynamic evolution of erosive forces has been linked with the following factors.

Trindade Island is characterized by intense and episodic rainfall enabling the action of water as a crucial erosive agent: higher water runoff at the slopes surface, resulting in stream bank erosion and linear erosion features. This background has intensified by the

absence of vegetation cover that causes raindrops to act directly on the rocky substrate. Another issue has been intense differential erosion. We interpreted that differential erosion has triggered by rocks with distinct geotechnical properties in depth: takes place on successive weathered and fractured nephelinites separated by weak degraded pyroclastic rocks of Morro Vermelho Formation; and the friable nature of the Trindade Complex pyroclastic rocks (inventory's units 1, 2 and 12), resulting in volcanic bombs (up to metric dimension) that are overhanging without support. These layers are associated with unconsolidated materials (ranging from mud to decametric boulders) in steep slope areas, whose preferred directions match anthropogenic infrastructure.

Furthermore, the steep inclination of the slopes has been an environmental element that triggered erosive processes, it is due to erosion induced by water running and gravity action, and the low tensile strength of the volcanic rocks collectively results in the deconfinement of the rock masses and the formation of tension cracks. The study area is constituted by badlands similar to desert environments, in which wind erosion is likely considering the average strong coastal winds in the oceanic environment.

Regarding to current human behavior, the human-access tracks, along the slopes, have acted as preferential flow paths intercepting running water on the loose embankment materials resulting in deep gullies. In addition, the exotic species *Guilandina bonduc* is hindering the regeneration of native scrub and contributing to accelerate erosion at slopes (inventory's units 3 and 4) and streambank erosion in the most important drainage of Trindade Island which supplies the occupation (inventory's unit 12).

- Gravitational mass movements

The Morro Vermelho Formation slopes have been composed of sequences characterized by highly weathered and friable rocks that create favorable conditions for mass movement when surface water seeps into these layers. The volcanic rocks of the Morro Vermelho Formation take place frequently as a saprolitic material, which combines soil-like physical properties with the relict structure of joints and is highly porous due to the volcanic genesis (e.g., air bubbles). Horst-and-graben features (eg., Barão et al., 2020) and many secondary shear surfaces are typical at outcrops and slope surfaces identified in photo-interpretation, such conditions favoring rock compound slides.

This is clear downstream of the deep valley (inventory's unit 1), where decametric rockslides occur triggered by gully erosion, in which the shape of the rupture surface usually departs to a certain degree from constant curvature, tending towards compound sliding (e.g., Marinos et al., 2017). These compound slides are controlled by a weak bedding plane of the contact between nephelinites and tuff-breccias, and this contact surface is abrupt and characterized by piping features.

Boulder, debris, and silt falls are common along the valley banks (unit 1) and steep natural slopes (units 3 and 4). Furthermore, mud and debris flows are associated with loose alluvial-colluvial deposits and transported soil along the deeply incised gully of the non-perennial valley (unit 1) and steep natural slopes (units 3 and 4). In this sense, the study area alluvial fan sectors were partially re-activated, and secondary stream channels were newly originated or rejuvenated. On the hillside of inventory's unit 3, where identified evidence of rock slope spread, involving displacement and rotation of rigid blocks of nephelinites, due to severe plastic deformation of an underlying layer of weak pyroclastic sequences (tuff-breccia, tuff, and lapilli tuff) at quasi-horizontally bedded.

At the volcanic hills of the study area (Units 6, 7, 8, 16, 18, and 19) the mass movements due to vertical tensile and volcanic joints represent the main mechanism of failure along these rock cliffs. In this sense, rock fall is the main mass movement type, in which boulder deposits identified in unit 9 indicate that events that occurred exhibit the character of avalanches and rock falls. The material released by a medium-sized nephelinite, wedge slide and deposited partly as a dry frictional flow of a mass of rock fragments, covering the surface of a talus cone. However, the features described indicate that several large fragments decoupled from the peaks and bounced and rolled for additional meters in the manner of a fragmental rock fall. Rock block toppling is also an important mechanism along the old volcanic bodies, where strong rock blocks, which are separated by joints resulting from the cooling of lava and vertical stress relief joints, are overhanging.

5.3.6.2 *Mapping survey*

Field recognition of the Morro Vermelho Formation volcanic rocks is challenging due to the advanced weathering of these layers. Researchers that study the genesis of the Morro Vermelho Formation (e.g., Almeida, 1961; Pires and Bongiolo, 2016; Luz, 2019) describe it as complex, which includes layers deposited by gravitational and erosional processes concomitant to the volcanic activity of the formation. The type of material is one of the most important factors influencing the behavior of mass movements such as landslides (Hungu et al., 2013), and it is crucial to have detailed descriptions, especially when dealing with complex volcanic materials.

The challenge for studying and determining a feasible engineering geological solution in this volcanic environmental type of landforms (e.g. scoria cones composed of friable rocks) is shown by Marinos et al. (2017) in Santorini Island, geologically analogous to Trindade Island. The authors suggest that baseline studies of characterization and mapping in areas that lack data, such as Trindade Island, are essential in order to assess the geohazards of the local population. Herein, the nature of the mapping approach in regard to analyzing predisposing factors for erosion and mass movement occurrence is in order to bring up a conceptual-observational model (p.ex., Fookes et al., 2007; Parry et al., 2013). However, Trindade Island did not have geological-geotechnical data, so we had to start surveying in the present research. Our work was developed mainly from observations and specific data in field investigations. “Baseline” studies, such as those presented here, are crucial for future analyses, including numerical ones.

However, Mateus et al. (2020) described pyroclastic alterations in the same area as the present study, in which describes nephelinite samples as pyroclastic, and erroneously assigns rocks from the MVF as PVF. These errors in studies of alteration of geological materials reveal the complexity of Trindade Island, and if inaccurate data such as Mateus et al. (2020) are used as a baseline for geotechnical studies will probably cause problems in anthropogenic terms.

5.3.6.3 *Trindade island context*

The study area presents numerous erosive processes; however, linear erosion stands out due to its high occurrence density. Erosion processes are responsible for the environmental degradation of coastal and are commonly associated with human occupation problems (Rota and Zuquette, 2013, Zuquette et al., 1994, Zuquette et al., 2003). In this sense, Trindade Island has been undergoing a process of environmental degradation in urgent need of remediation. However, the most critical possibility of geological events to the local occupations is linked to mass movements such as rock fall that include avalanches and debris flow. Debris flow triggered by episodic and intense rainfalls in a short time interval is commonly associated with damage to the infrastructure and life loss, as reported by Turconi et al. (2013) in Sardinia Island (Italy).

Hungr et al. (2013) also reported the danger of large individual debris avalanches, such as a debris avalanche at a small community in Johnson Landing (Canada), in which accumulation of deposits for many years was subject to shallow rotational and translational sliding, and during an intense rainy period, the material failed and flowed down, resulting in lives and several houses lost. These exceptional circumstances can be extended to Trindade Island, similarly, there are slopes covered by large boulders from previous avalanche episodes, which may be undergoing slow sliding – throughout the geological contacts at depth – as described by Hungr et al. (2013). Considering the frequent storms and episodic rainfall on Trindade Island that seeps into the substrate which supports the large deposits, a disaster is bound to happen, especially since the flow direction coincides with the occupation. The present study intended to build a database on Trindade Island. In this sense, compiling and evaluating earth science data (Yesiloglu-Gultekin et al., 2012) is essential to avoid losses, such as human lives or infrastructural, associated with hazards.

5.4 Inventory of natural processes with nautical charts, real-time kinematic global navigation satellite systems (RTK-GNSS), and Remotely Piloted Aircraft (RPA), Trindade Island, Brazil

5.4.1 Introduction

Geotechnology is a scientific approach that comprises technologies linked to survey, database archiving, processing, and development of applications using geo-referenced data (Souza Filho and Crósta 2003). The geotechnologies applied in the earth surface data survey are efficient tools for monitoring and mapping erosive and gravitational processes in geohazards assessments (Hashemi-Beni et al. 2018, Guenzi et al. 2019, Hu et al. 2019, Tan et al. 2021). These depend on the ability to accurately measure changes in the landscape according to specific rock or soil processes (Wernette et al. 2020). The geohazards can be evaluated in detail using a digital terrain model (DTM) generated from topographic maps, real-time kinematic global navigation satellite systems (RTK-GNSS), and an remotely piloted aircraft (RPA) (e.g., Evans and Lindsay 2010, Muço et al. 2012, Tannant 2015, Mohamad et al. 2019, Mohammadi et al. 2020, Chaudhry et al. 2021).

Oceanic volcanic islands (e.g., Santos et al. 2019), like Trindade Island, present adversities in field acquisition not only due to their geographical remoteness but also on account of numerous landforms (e.g., plugs, necks, dikes, and scoria cones), rocks with distinct erodibility (e.g., basaltic lava flows interspersed by pyroclastic deposits), climate

(e.g., strong winds, storms), and vegetation, which condition a rugged relief and heterogeneous landscape. These natural settings represent challenges for the survey and affect the accuracy of digital surface models through unrealistic altitudes and significant gaps. Deng et al. (2019) reported that these limitations result in the lack of a global high-resolution DTM of the volcanic environment, thus limiting the accuracy of a detailed hazard assessment in these regions (Global Volcanism Program 2013). Another difficulty for geohazards studies on Trindade Island is the lack of temporal data since the small-scale resolution of the available remote sensing images hinders the visualization of terrain features in detail.

In this sense, our goal is to produce a comparative analysis of the quality and accuracy of digital models generated from pre-existing data, RTK-GNSS, and RPA for relief characterization and inventory of natural processes on a fine scale. Thereby, we enable the first multi-temporal database for assessing and monitoring the evolution of erosional and depositional features for future geohazards prediction analyses on Trindade Island. Furthermore, we contribute to the attainment of relief data in remote and difficult-to-access regions with rugged terrain with minimal human resources and field materials, and relatively low cost to perform.

5.4.2 Study area settings

The study area, approximately 2 km², 20°30'40" S latitude and 29°18'40" W longitude, is located upstream of the Trindade Island's anthropogenic activities and constructions (Fig. 69). Such area comprises active erosive processes and slopes with the talus and debris flow deposits, with the possibility of instability processes (Fig. 70), classified as geohazards according to the definition by UNESCO (2019). The crucial issues to be considered before applying field techniques for geological hazards studies are summarized below. Such issues refer to geology (relief and the study object), geomorphology (essential for planning the field walk), and environmental settings (vegetation size and climatic conditions that are essential for the use of technologies in the field).

Almeida (1961) delimited the island into five units composed of lava flows, dikes and necks, and pyroclastic deposits. However, quaternary deposits (e.g., debris flow, talus, alluvial fans) cover most of the terrain surface in the study area (Fig. 69d). The Trindade Complex (TC), the basement of the island, occurs at Preto Peak and is covered by debris flow deposits in the western portion of the study area. Also, the Morro Vermelho Formation (MVF) occurs in the eastern portion, composed of lava flows and pyroclastic deposits.

Most of the Trindade Island terrain presents steeply sloping hills surrounded by talus slope deposits, alluvial fans/cones (Almeida 1961, 2002, Angulo et al. 2018), and debris flow deposits. Gully erosion occurs in the eastern part of the study area, with a maximum depth of 17 m near the anthropogenic infrastructure (Fig. 70). The western portion consists of deposits of large debris flow, with boulders up to 30 m in diameter, derived from volcanic necks and dome from the TC, named: Preto Peak, Pontudo Peak, and Grazinas Peak, respectively (Fig. 70).

Trindade Island is under the Tropical Oceanic climate that occurs in the South Atlantic Subtropical Anticyclone region (Cavalcanti et al. 2009). It consists of elevated temperatures between 22.9 and 27.7°C, high humidity levels due to ocean evaporation, annual average rainfall of 921 mm, and monthly averages with a minimum of 64 mm and a maximum of 215 mm (Pedroso et al. 2017). According to Pedroso et al. (2017), such weather

conditions make the island vulnerable to extratropical cyclones, instability lines, and cold fronts. Moreover, the study area has shrub vegetation (e.g., Silva and Alves 2017) and large exotic trees that exceed 3 m in height (Fig. 70).

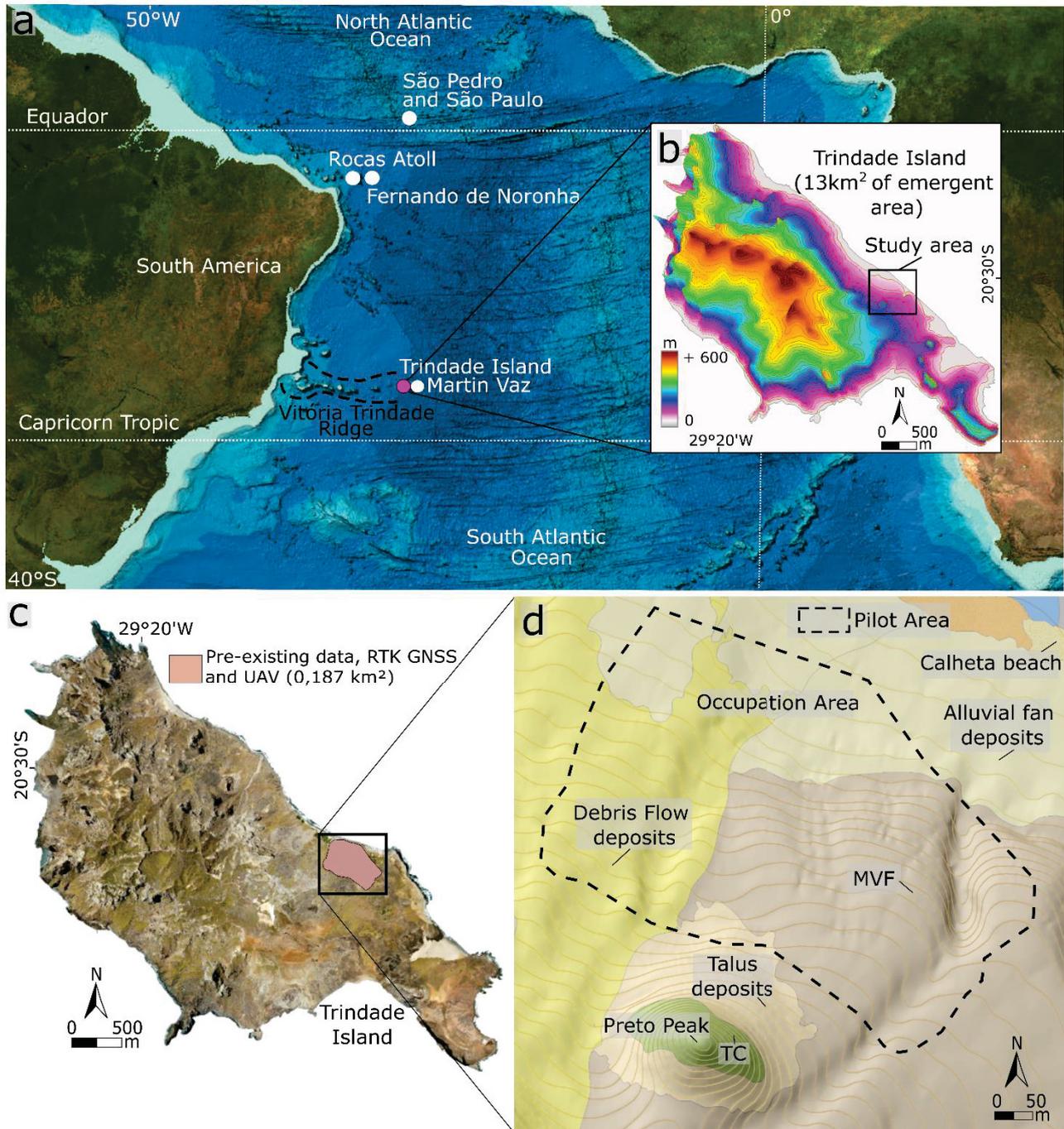


Fig. 69: Location of the study site: (A) South Atlantic Brazilian oceanic islands between 0.9°N and 20.47°S, the location of Trindade Island (latitude 20.5°S, longitude 29.3°W) at the easternmost of the Vitória-Trindade Ridge (GEBCO Image); (B) the topography model of Trindade Island (vertical exaggeration: 2) produced from contour lines of the nautical chart (Marinha do Brasil 2011); (C) aerial image by the Brazilian Navy (Marinha do Brasil 2011) with the areas covered through different acquisition methods; (D) local geological map of the study area. TC: Trindade Complex; MVF: Morro Vermelho Formation.

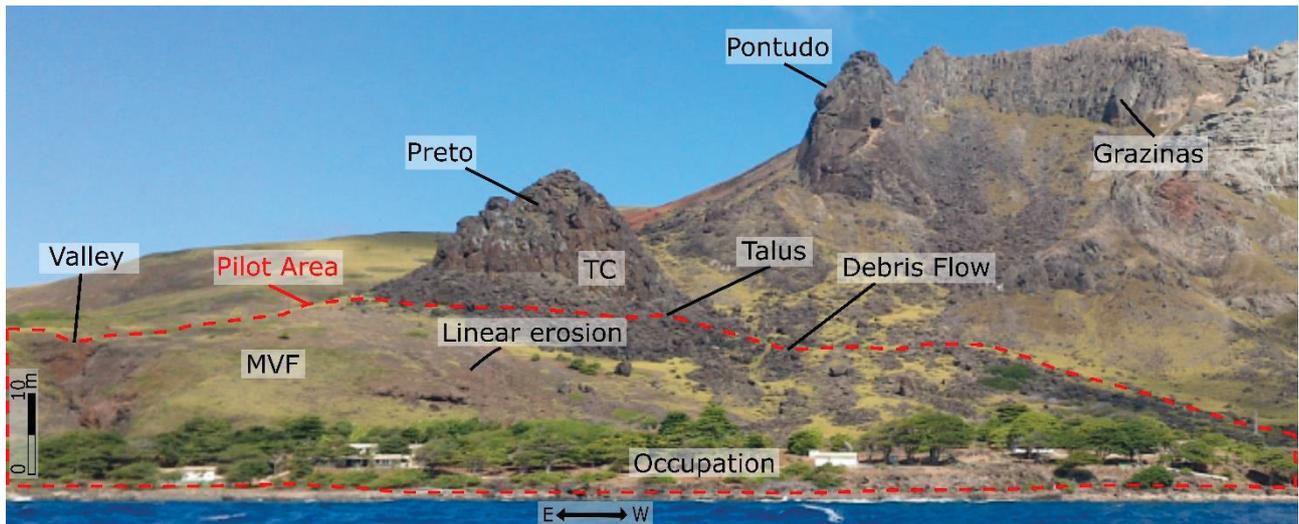


Fig. 70: The study area (delimited by the red dashed line) indicating occupation downstream, MVF outcropping with the prevalence of linear erosive features, and outflow of the erosive valley. Also, the important volcanic landforms from the Trindade Complex (Preto, Pontudo, and Grazinas peaks) that supply the large boulder to debris flow and talus deposits are indicated.

5.4.3 Material and methods

As Trindade Island is a restricted and remote area, the activities performed in the study area present difficulties. Transportation, for example, is pre-defined a few times a year by the Brazilian government with programmed residence time. Therefore, the research strategy employed is crucial, especially regarding fieldwork planning. In this sense, the fieldwork took place in 2018 and 2019. We used the pieces of equipment according to the availability of the Coastal Studies Laboratory of the Universidade Federal do Paraná. In the next section, the methodology steps followed in the present study were summarized.

5.4.3.1 Data acquisition and processing

- Pre-existent data

The topographic base available on Trindade Island refers to the nautical chart, data collected by the Brazilian Navy until 1968 on a 1:15,000 scale (contour lines: 20 m equidistance) (Fig. 71a). However, the Suppl. Mat. (also from the Brazilian Navy) that illustrates access to the occupation area and topography (contour lines: 2 m equidistance) has a 1:5,000 scale (Fig. 71b). Therefore, both cartographic bases display an altimetric data gap (see Fig. 71). In the present study, such contours were digitized and merged to generate the elevation model. We used the ArcGIS 10.6.1 software to interpolate contour lines with Topo to Raster method (with 3 m input cell size, determined from the software's algorithm). The photogrammetric data (30 cm resolution) from 2011 was provided by the Brazilian Navy (see Ramos et al. 2008); however, altimetric data is lacking.

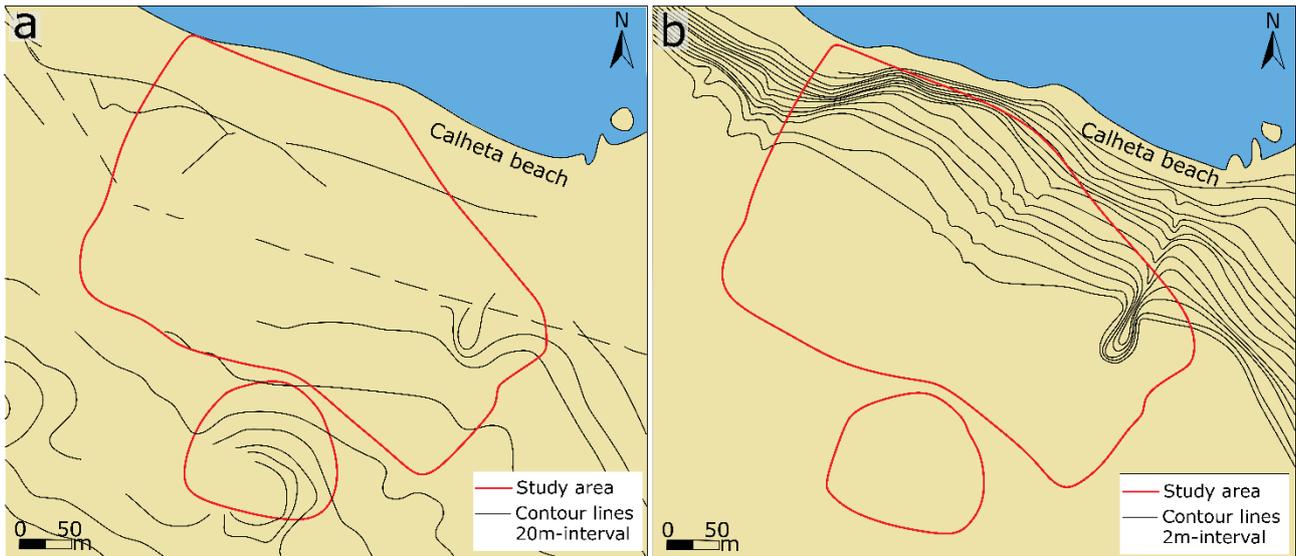


Fig. 71: Pre-existing topographic data (modified from DHN, 1971) of the study area (delimited by the red line) on Trindade Island: (A) nautical chart (1:15,000 scale) and (B) supplementary nautical chart in the occupation area (1:5,000 scale). Note the lack of topographic data in both data sources.

- Global navigation satellite system

We used the single-base method for RTK-GNSS positioning, which consists of one master station (with well-known coordinates), and a rover device for measuring the points (with unknown coordinates) in real-time (Dabove et al. 2019) (Fig. 72). It is an attractive technique since signals are available in all-weather conditions and are continuous. Therefore, the method represents a near-real-time sensing tool (Jin et al. 2014, Mendez-Astudillo et al. 2021), which plays a crucial role in far-off sites such as Trindade Island.

The equipment model used was Stonex Plus 8, and the acquisition software was SurvCe. The horizontal and vertical accuracies were specified at 0.014 m and 0.039 m, respectively. The base transmits observation corrections to a rover receiver via UHF radio in the field, with a distance of 470 m to the farthest point. No level reference was defined, so we determined the base coordinates in a static survey of 600 readings. Next, we surveyed the rover points using the static-kinematic method (stop and go) along the surface on which trekking was viable. The post-processing step consisted in converting geometric (or ellipsoidal) altitudes into orthometric ones. The ellipsoidal height (h) corresponds to the RTK-GNSS surveying, and we calculated the orthometric height through the mean sea level (e.g., Mohamad et al. 2019, Abdalla and Mustafa 2021).

We performed the conversion from waterline measurements in which the tidal level determined the orthometric altitude to fill the gap of a high-resolution geoidal model for Trindade Island. The value measured was 0.6 m (June 20, 2019, at 3:30 p.m.). The tide level was based on the 2019 tide table of the Brazilian Navy for Trindade Island (Coordinated Universal Time - UTC: +02). We used the Equation 1:

$H = h - N$ at all points acquired

Where:

N = the geoid height.

We used ArcGis 10.6.1 software to interpolate the acquired and corrected points and create a surface model. The sample data around the study area boundary were extrapolated at the interpolation step, totaling 11,270 points. Due to the density and high resolution of the data acquired in the field, the cell size chosen for the digital models of the terrain surface was 2 m, a value determined by the software's algorithm. We produced DTMs with nine elevation classes according to six spatial interpolation methods. We compared the vertical accuracy of DTMs with checkpoints and spatial accuracy with field observations, and evaluated the most appropriate model to represent the terrain (e.g., Aguilar et al. 2005).

We used and compared the following techniques described by Childs (2004): a) triangulated Irregular Network (TIN): a set of irregularly spaced data points that are connected by edges that form contiguous, nonoverlapping triangles and create a continuous surface to produce terrain models; b) inverse Distance Weighted (IDW): the cell values are determined using a linear-weighted combination set of sample points, in which the weight assigned is a function of the distance of an input point from the output cell location; c) kriging: it fits a function of points within a specified radius to determine the output value for each location and assumes that the distance or direction between the sample points reflects a spatial correlation; d) topo to Raster: designed to work with contour inputs, it uses an interactive finite difference interpolation technique that optimizes the computational efficiency of local interpolation; e) natural Neighbor: linear-weighted method (IDW-like interpolation), but the local coordinates define the amount of influence any scatter point will have on output cells; f) spline: through a mathematical function, the values are estimated and enable a smooth surface that passes exactly on input points, and there are two variations (regularized and tension).

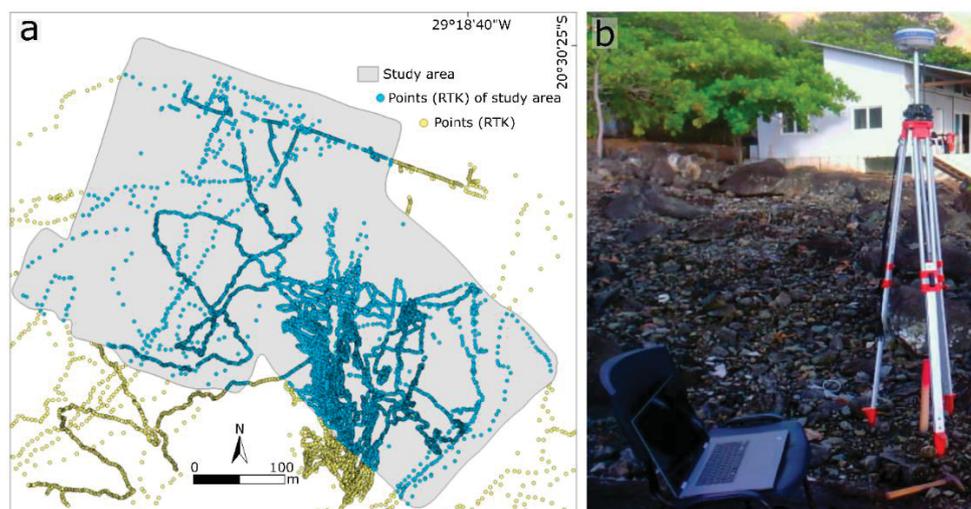


Fig. 72: RTK-GNSS surveying: (A) density of points acquired in the study area; (B) master station of single-base RTK-GNSS positioning to determine coordinates in a static survey.

- Remotely piloted aircraft photogrammetry

An RPA is a standard platform for photogrammetric data capture (e.g., Haala et al. 2011, Uysal et al. 2015). We utilized Phantom 3 Advanced – DJI RPA equipped with an FC300S camera with a focal length of 3.61 mm, pixel size $1.56 \times 1.56 \mu\text{m}$, and image size (pixels) $4,000 \times 3,000$, and used the PIX4D Capture software for flight surveys (Fig. 73).

However, the GPS of the RPA onboard navigation system (resolution: 10 m) is inappropriate for detailed studies. In this sense, RTK-GNSS data are crucial for the georeferencing step (Mohamad et al. 2019). Before image acquisition, we scattered 14 coded targets on the studied surface and selected two anthropogenic structures, measured with RTK-GNSS, to improve the precision and accuracy of RPA photogrammetry. Autonomous flight data acquisition recorded an area of 0.2 km^2 within six flight stripes. Each flight had approximately five control points. However, winds above 16 knots made the flight survey to the Calheta beach area impossible on the last day of acquisition. Figure 5 shows the details of field acquisition.

A 3D flight planning provided a constant flight altitude of about 20 m above the ground level from the take-off position. The survey orientation followed areas with similar altimetry to maintain a relative flight height. We programmed a coverage of 80% along the flight lines and 60% between flights. The length of each flight was 20 minutes according to the battery autonomy. However, the natural conditions of Trindade Island led to variations in altitude and in the flight directions previously determined. We summarized information regarding survey data and camera calibration in Fig. 74 and 75 and Table 11, 12 and 13.

The images were processed using the Agisoft Photoscan software with Structure from Motion-SfM algorithm and GCP procedure (Fig. 76). We chose setting options according to the computational resources (16 Gb of Random-Access Memory- RAM) and the particularities of the Trindade Island landscape. The workflow required about 50 hours and 40 minutes to process 2,328 photos (12,3 GB), and the steps that required the longest processing time were building dense clouds (30 h) and texturing (11 h).

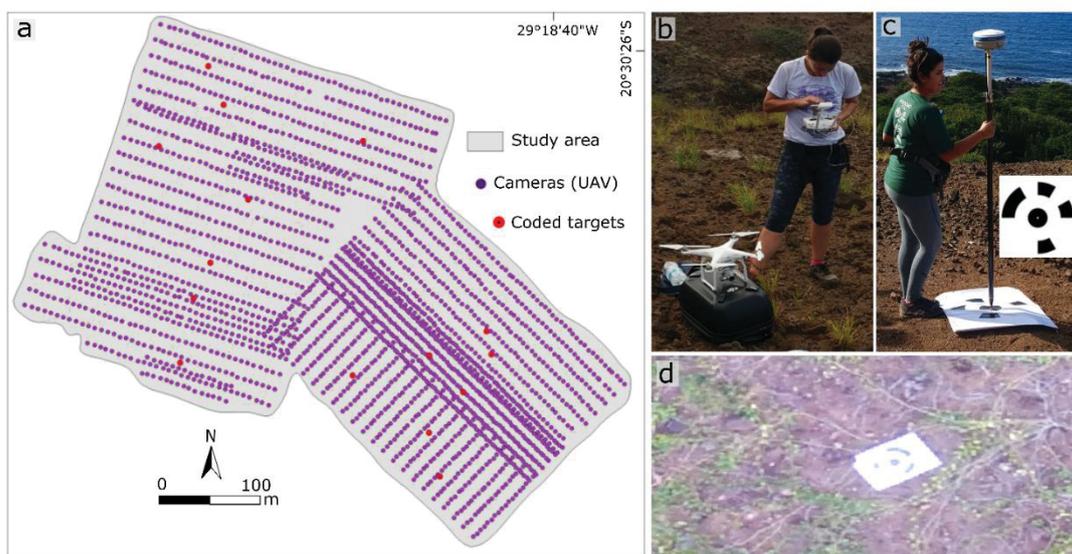


Fig. 73: RPA and GNSS vertical data surveying: (A) density of points acquired; (B) the quadcopter RPA equipped with an autonomous control system ready for launch; (C) control points (encoded target) measured using RTK-GNSS (total: 14 targets); (D) aerial view of the encoded target.

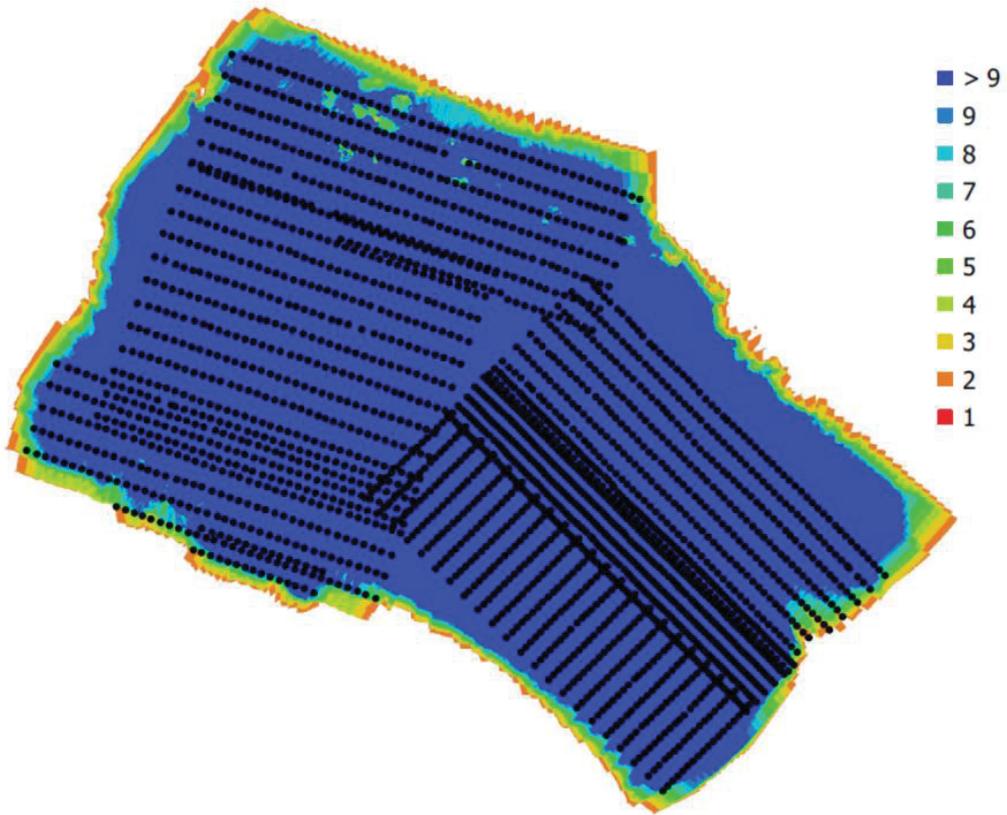


Fig. 74: Survey data: camera locations and image overlap.

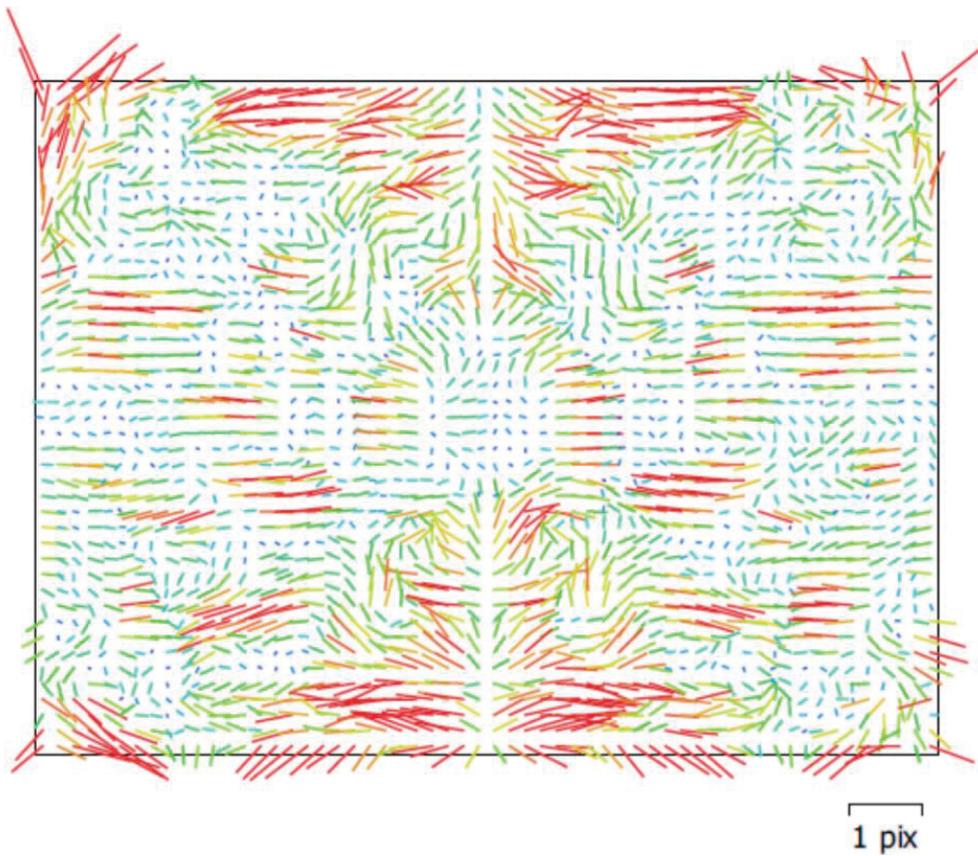


Fig. 75: Camera calibration: image residuals for FC300S (3.61 mm).

Table 11: Details of RPA survey.

Number of images	2.328
Flying altitude (x m)	45.3
Ground resolution (x cm/pix)	1.79
Coverage area (km ²)	0.195
Camera stations	2.328
Tie points	1,297,378
Projections	9,908,314
Reprojection error (x pix)	1.19

Table 12 Cameras of RPA survey.

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC300S (3.61 mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μ m	No

Table 13: Calibration coefficients and correlation matrix.

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	P1	P2
K3	0.0633677										
K4	-0.0262106										
F	2326.65	0.14	1	-0.09	-0.9	0.33	0.11	-0.3	0.72	0.02	-0.03
Cx	5.3555	0.012		1	0.1	0	0.36	0.03	-0.06	0.51	0.01
Cy	-7.66326	0.028			1	-0.4	-0.1	0.23	-0.65	0	0.14
B1	-2.22677	0.0029				1	0.06	-0.2	0.25	-0.02	-0.19
B2	0.543851	0.0027					1	-0	0.08	0.28	0.02
K1	0.00411679	6.20E-06						1	-0.6	0.05	-0.23
K2	-0.0357335	5.90E-06							1	0.02	-0.08
P1	0.00015061	1.30E-06								1	-0.02
P2	7.74E-06	1.10E-06									1

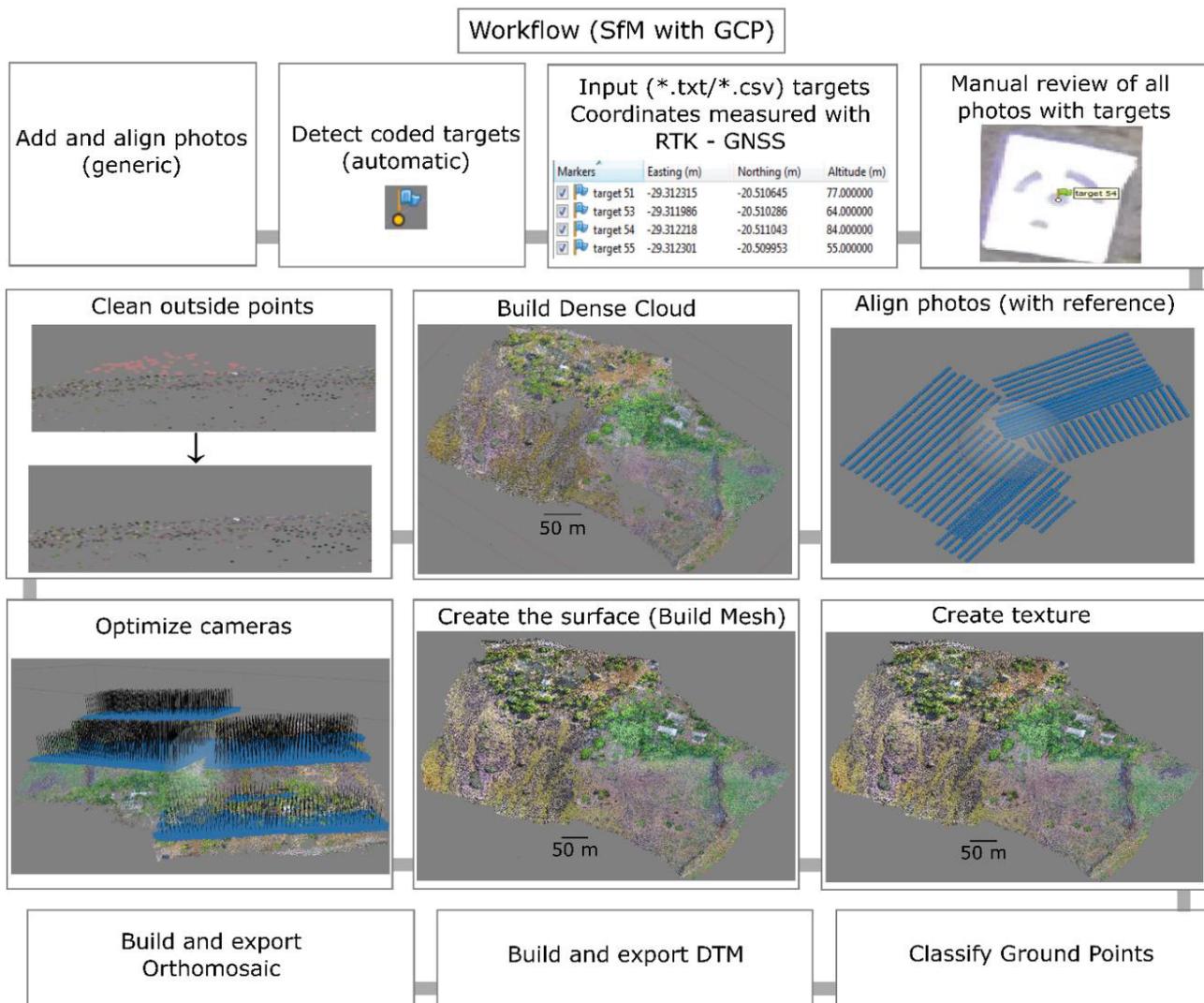


Fig. 76: The workflow presents a multi-step process to generate orthophoto images and models through RPA survey. SfM: Structure from Motion; GCP: Ground Control Points; DTM: Digital Terrain Model.

5.4.3.2 Accuracy assessment

We carried out a vertical and spatial variability accuracy assessment of the DTMs using the techniques described above to compare the quality of the data generated. First, we validated the vertical accuracy of the DTMs via field-based measurements on bare surfaces. For this purpose, 20 checkpoints measured by RTK-GNSS were selected (Table 14). We generated the following standard accuracy statistics: mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and RMSE/MAE ratio as a complementary result (e.g., Karunasingha 2022). The second approach analyzed spatial variability according to the erosional and gravitational features observed on-field and in 3D models.

Table 14: Checkpoints (CP) in altitude (m) and differences between respective DTMs and checkpoints in meters (m) are listed by different spatial interpolation algorithms enable in the ArcGis software. MAE = Mean Absolute Error; RMSE = Root Mean Square Error.

CP	Altitude	TIN	IDW	Kriging	Spline	Topo to Raster	Natural Neighbor
P1	53.72	-0.98	-0.38	-0.62	-0.18	-0.77	-0.3
P2	10.82	-2.82	-3.19	-2.5	-0.14	-2.47	-2.44
P3	28.53	-0.53	0.08	0.01	0	0.09	-0.02
P4	24.87	-0.85	0.08	0.1	0	-0.1	0.1
P5	13.71	2.57	3.79	3.81	0.11	2.17	1.11
P6	38.84	-0.66	0.09	0.08	0.11	0.13	0.07
P7	63.31	-1.09	-0.55	-0.41	-0.31	-0.88	-0.51
P8	77.97	0.03	0.68	0.63	0.37	0.7	0.65
P9	10.26	-5.86	-3.99	-7.16	0.02	-5.55	2.99
P10	12.29	-0.26	6.04	4.65	0.12	0.29	0.49
P11	42.93	-0.13	-0.06	0.12	0.02	0.15	0.15
P12	22.72	0.98	1.78	1.47	2.07	0.64	1.61
P13	20.82	-0.82	0.02	0.01	0.01	-0.01	0.01
P14	74.50	-0.5	-0.03	-0.01	0	-0.03	0.06
P15	51.40	-0.87	-0.09	-0.1	-0.02	0.07	-0.15
P16	60.92	-0.32	0.04	0.03	0.02	-0.12	0.05
P17	3.30	-0.3	-0.06	-0.03	0	0.05	0.04
P18	40.77	-0.37	0.1	0.01	0	-0.04	0.05
P19	14.95	-0.95	-0.05	-0.1	-0.05	-6.83	-6.24
P20	47.93	-0.4	-0.1	0.05	0.02	-0.12	0.04
	MAE	1.06	1.06	1.1	0.18	1.06	0.85
	RMSE	1.68	2.01	2.2	0.48	2.13	1.71
	RMSE/MAE	1.58	1.89	2	2.66	2.00	2.01

5.4.4 Results

5.4.4.1 RTK-GNSS: spatial interpolation algorithm

Although the RTK-GNSS equipment had a high collection accuracy, it is expected that the DTM presents lower accuracy due to irregular sampling distribution resulting from the complex landscape. Therefore, it was helpful to analyze which interpolation method provided the finest DTM for surface representation. We compared six interpolation algorithms (Fig. 77) enabled in the ArcGis software from this irregular data. In addition, we compared the vertical accuracy of the DTMs generated with checkpoints and spatial accuracy with field observations, such as terrain roughness in the eastern portion, three main drainages, and lower slope in the area near the coastal region (between altitudes of approximately 0 and 20 m).

The spline method presented the highest vertical accuracy with an RMSE of 0.48 m. The TIN showed the second-highest accuracy with an RMSE of 1.68. The natural neighbor, IDW, and topo to raster methods provided an RMSE of 1.71, 2.01, and 2.13 m, respectively. The kriging method showed the lowest accuracy with an RMSE of 2.2 m. Regarding the spatial variability of terrain features, all interpolation methods presented the main linear features and had a similar range of altitudes in each class. However, the DTM of the spline method presented a smoothly varying surface, minimizing overall surface

curvatures, and predicting ridges and valleys. Therefore, we selected the MDT from the spline method for comparative analyses between different data sources.

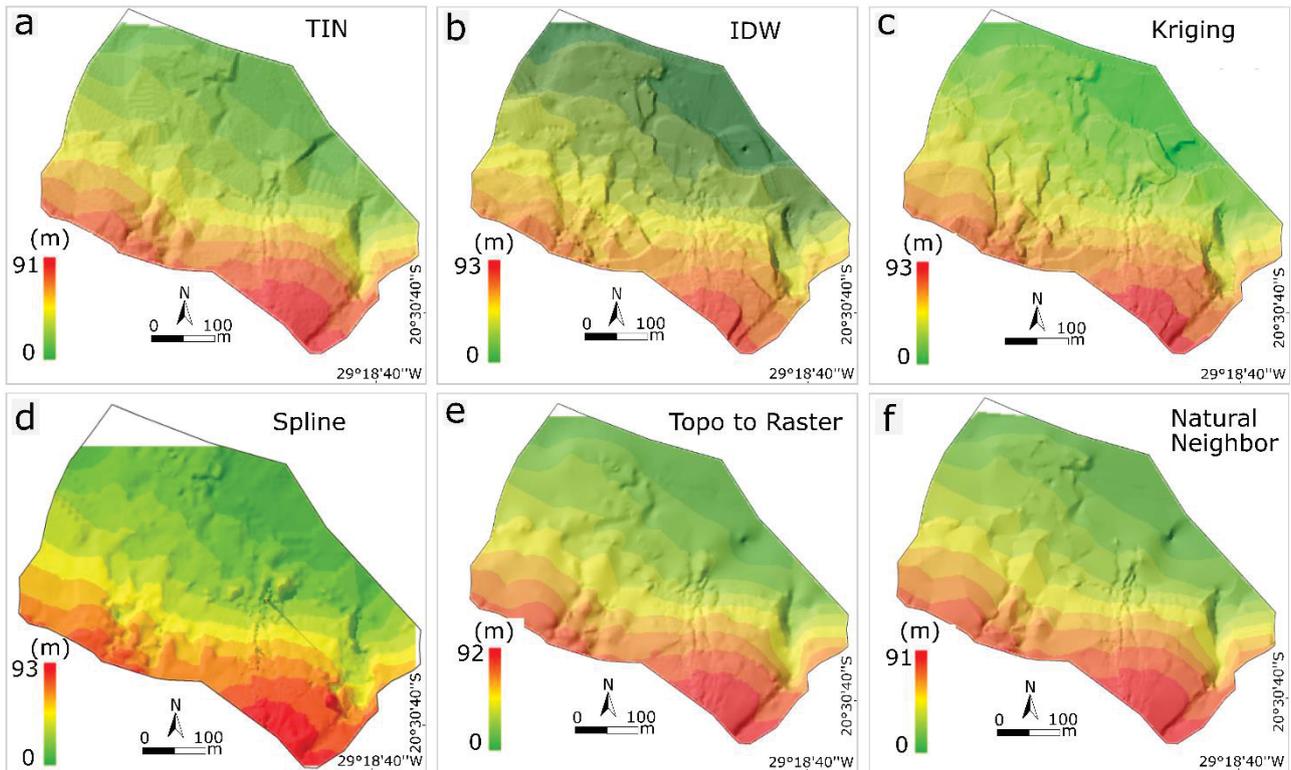


Fig. 77: Spatial interpolation algorithm employed with the ArcGis software to evaluate the most appropriate model to portray the study area compared to field-based measurements: (A) Triangulated Irregular Network (TIN); (B) Inverse Distance Weighted (IDW); (C) Kriging; (D) Spline; (E) Topo to Raster; (F) Natural Neighbor interpolation.

5.4.4.2 Digital terrain models

DTMs were processed from different databases applied to relief characterization and inventory of natural processes (Fig. 78, Table 15). The attributes considered in the description were erosion (e.g., rill, gully) and gravitational features (e.g., landslides, deposits of debris, and boulders), drainages, geological contacts, anthropogenic infrastructure, and vegetation. The DTM based on pre-existing data from 1967 had a raster resolution of 3 m (Fig. 78A) and enabled the visualization of the most prominent linear features of the terrain. It consisted of three erosive drainages in the central and eastern portions of the area, with width variation between 5 m (watercourse) and 20 m (deep erosive valley), and presented a minimum length of 310 m.

The DTM based on RTK-GNSS data processing had a raster resolution of 2 m (Fig. 78B). The altitude ranged from 0 to 93 m. The DTM highlighted the mean erosive and gravitational ground features, such as prominent linear erosive features (length: 8 to 228 m) in the southeast portion of the study area, the boundaries of the large debris flow deposits in the western portion (the measured volume ranged between 78,349-154,461 m³), and the boundary of outflow of the deep valley on the eastern portion (volume below 118,137 m³). The DTM obtained through RPA photogrammetry had a raster resolution of 7.15 cm (Fig. 78C). The difference between the highest and lowest point was 92 m. Landform analysis

detected significant erosion on the southeast portion, and dynamic slope mass movements occurred with well-defined scars in the eastern boundary. The RPA-DTM also presented large debris flow deposits in the western portion (measured volume between 693 to 9,089 m³), a significant number of linear erosions (0.2 to 320 m length) in the southeast part, and a precise outflow boundary of a deep valley on the eastern area (volume below 27,292 m³).

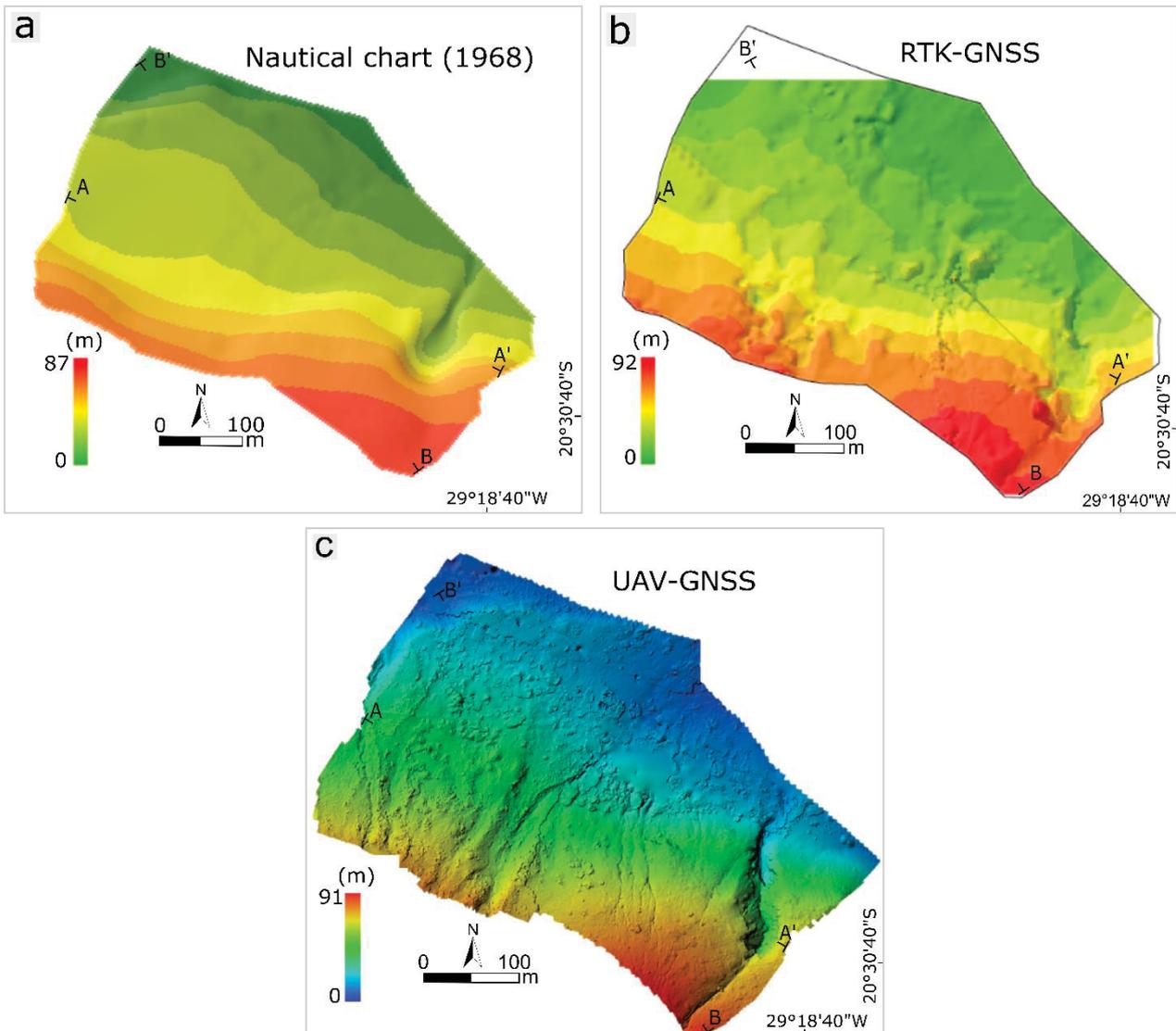


Fig. 78: DTMs from different metadata: (A) contour lines data extracted from nautical charts (1968): model, performed by GIS software, overgeneralized the ground surface; (B) RTK-GNSS: model, performed by GIS software through spline-based interpolation method, highlighted the most prominent terrain roughness; (C) RPA photogrammetry with GNSS vertical data: model, performed by the Agisoft software, showed rich detail of the terrain surface, such as linear erosion and rock deposits. We eliminated the vegetation cover and buildings in the processing step.

Table 15: Summary of Inventory of spatial variability of terrain features (types and size) according to each source data and time spent on processing data.

Data type	Time spent (h)		Visualized features	
	Field survey*	Processing data**	Types	Size (m)
Topographic charts (1968)	–	Few minutes	Main drainages, large geologic contacts	Decametric or larger
RTK-GNSS	Days - weeks	Minutes	Gravitational deposits (landslides), erosion (rill, gully), geologic contacts	Metric or larger
RPA -GNSS	Few hours - days	Hours (50h 40min)	Gravitational deposits (landslides), erosion (sheet, rill, gully), anthropogenic infrastructure, vegetation	Centimetric metric or larger

*depends on the size and accessibility of the site, work scale, daily time for field acquisition, equipment autonomy, and weather conditions.

** depends on the computer power, resolution settings, and point cloud density

5.4.4.3 Comparative analyses of pre-existing data, RTK GNSS, and RPA DTMs

- Vertical accuracy

We measured the discrepancy between the DTMs via 20 independent reference points scattered in the pilot area. According to the comparison results, the DTM produced from RTK-GNSS had the highest vertical accuracy in bare terrain conditions, with an RMSE of 0.48 m. On the other hand, the RPA-GNSS also provided acceptable accuracy, with an RMSE of 2.37 m. The DTM from pre-existing data provided the lowest accuracy with an RMSE of 12.3 m. In the DTM based on pre-existing data, the highest discrepancies compared with checkpoints occurred where a topographic data gap was observed in the nautical charts (see Fig. 71). The discrepancies in the DTM based on RTK-GNSS were generally low (< 1 m). However, the highest (> 2 m) discrepancies were located in the slopes downstream, with high vegetation density and buildings. In the DTM from RPA-GNSS, the highest disparities referred to the boundaries of the area surveyed and the northeast region (slope downstream), where a lack of image overlapping occurred (see Fig. 73A) that coincided with the tallest trees zone.

Like the RTK-GNSS, the RPA-GNSS also presented the lowest discrepancies in bare terrain, referring to upstream portions of the slopes. Also, for the vertical accuracy assessment, two profiles — 600 m and 550 m in length — were evaluated on the same portions for each technique (Fig. 79). A topographic data gap in the DTM from the nautical charts was evident in profile A-A' (Fig. 79), in which the software randomly performed the topographic profile between the distance of 0–450 m due to the lack of altitude data. However, despite the pre-existing data error being higher than RTK and RPA (Table 16), the three techniques provided similar results in profiles B-B'.

The RTK-GNSS profiles revealed the main abrupt relief changes in these lands compared to field-based measurements. These allowed us to correlate the significant relief breaks with differential erosion of the MVF, especially in the outflow of the valley (east area) where large-scale landslides occurred. The elevation profiles of the RPA-DTM elucidated the rugged terrain in detail, relief breaks (valley, linear erosions, streams), and landform prominences caused by debris flow deposition. Moreover, the profiles also incorporated

obstacles — besides boulder deposits — located on the ground surface, such as vegetation cover and anthropogenic infrastructure (buildings), which were eliminated for the comparative analyses of the profiles.

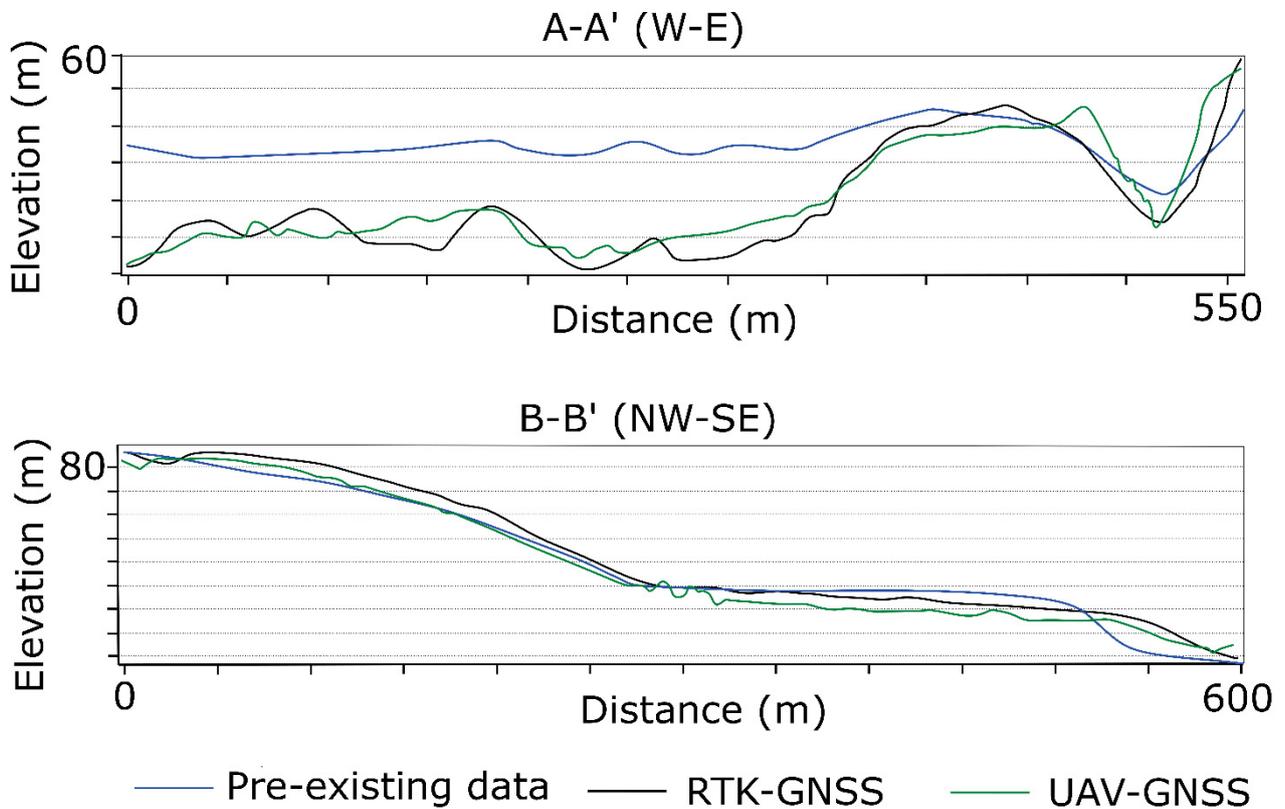


Fig. 79: Comparative assessment of the topographic profiles A-A' and B-B' (see location in Fig. 78) from pre-existing data (blue), RTK-GNSS (black), and RPA-GNSS (green).

Table 16: Checkpoints (CP), altitude (m) of each checkpoint, and differences between respective DTMs and checkpoints in meters (m) were listed by pre-existing data from nautical charts (1968), RTK-GNSS, and RPA (phantom 3). MAE = Mean Absolute Error; RMSE = Root Mean Square Error.

CP	Altitude	Pre-existing data	RTK-GNSS	RPA with checkpoints
P1	53.72	-2.65	-0.18	-0.41
P2	10.82	14.66	-0.14	-0.82
P3	28.53	5.27	0	-0.49
P4	24.87	8.05	0	-0.85
P5	13.71	14.56	0.11	1.95
P6	38.84	6.45	0.11	-0.69
P7	63.31	7.01	-0.31	-0.27
P8	77.97	2.43	0.37	-0.63
P9	10.26	17.95	0.02	1.36
P10	12.29	19.62	0.12	-0.98
P11	42.93	8	0.02	0.9
P12	22.72	17.59	2.07	1.05
P13	20.82	10.87	0.01	-2.6
P14	74.50	8.97	0	0.03

P15	51.40	-1.95	-0.02	-4.92
P16	60.92	10.57	0.02	-1.85
P17	3.30	17.12	0	1.02
P18	40.77	5.75	0	-7.36
P19	14.95	10.31	-0.05	-0.93
P20	47.93	23.92	0.02	-3.27
	MAE	10.7	0.18	1.61
	RMSE	12.3	0.48	2.37
	RMSE/MAE	1.15	2.6	1.47

- Spatial variability accuracy

The DTMs based on pre-existing data, RTK-GNSS, and RPA photogrammetry presented distinct spatial distribution patterns of ground features in fine-scale analysis. In the comparative assessment of 3D models with field observations, some discrepancies were detected, mainly concerning the slope curvature and the linear erosion density (see Figs. 42 and 50). The slope curvature based on pre-existing data (Fig. 80A) was divergent from the convex curvature classified in the field and hid linear erosion features. The 3D model of RTK-GNSS (Fig. 80B) elucidated a similar slope curvature but presented low linear erosion density as gullies (< 10) compared to field observations (> 20). The RPA-GNSS 3D model (Fig. 80C) represented the slope curvature of the study area more accurately. As observed in the field, the model showed a similar density of gullies (> 15).

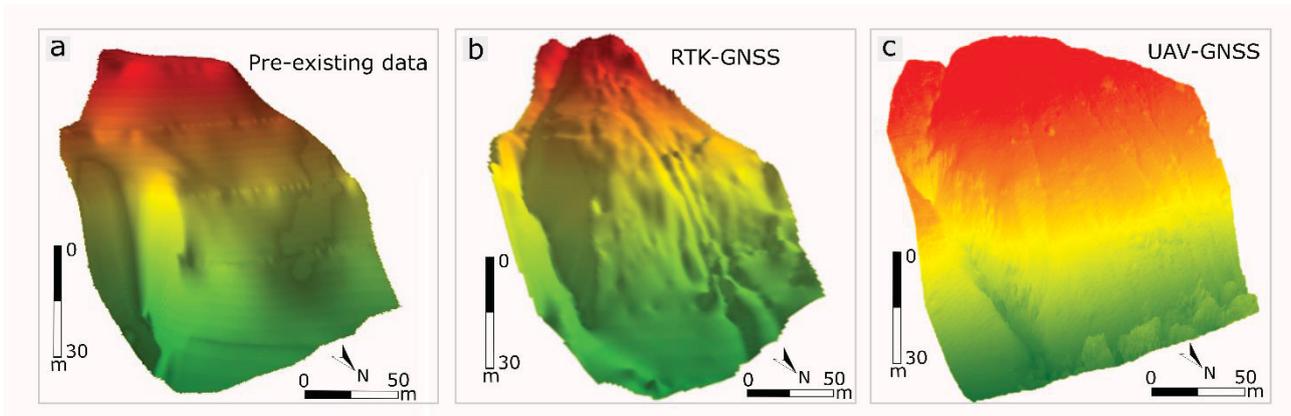


Fig. 80: The selected site area to compare the 3D models generated in the GIS environment according to different techniques: (A) preexisting topographic data of Trindade Island; (B) RTK GNSS survey; (C) RPA photogrammetry survey. The main differences are terrain curvature and terrain roughness.

5.3.4.4 Orthophotos: pre-existing data and RPA

The pre-existing orthophoto (2011) had a 30 cm sampling distance. It showed the landscape change processes, such as linear erosion, rock deposits, main streams, vegetation density, and occupation infrastructure (Fig. 81A). Despite the photogrammetry's centimetric accuracy, the orthophoto was limited to the spatial distribution of surface data. This gap in vertical data hinders the morphometric assessment of the landscape (e.g., elevation and slope gradient) and leads to less accurate digital models (Figs. 81B and 81C).

On the other hand, the RPA orthomosaic, with a ground sampling distance of 0,0179m (1,79 cm per px), presented consistency in the cell-by-cell continuity, satisfactorily smoothing the ground (Fig. 82). Thus, the DTM was more realistic when compared to checkpoints and field observations.

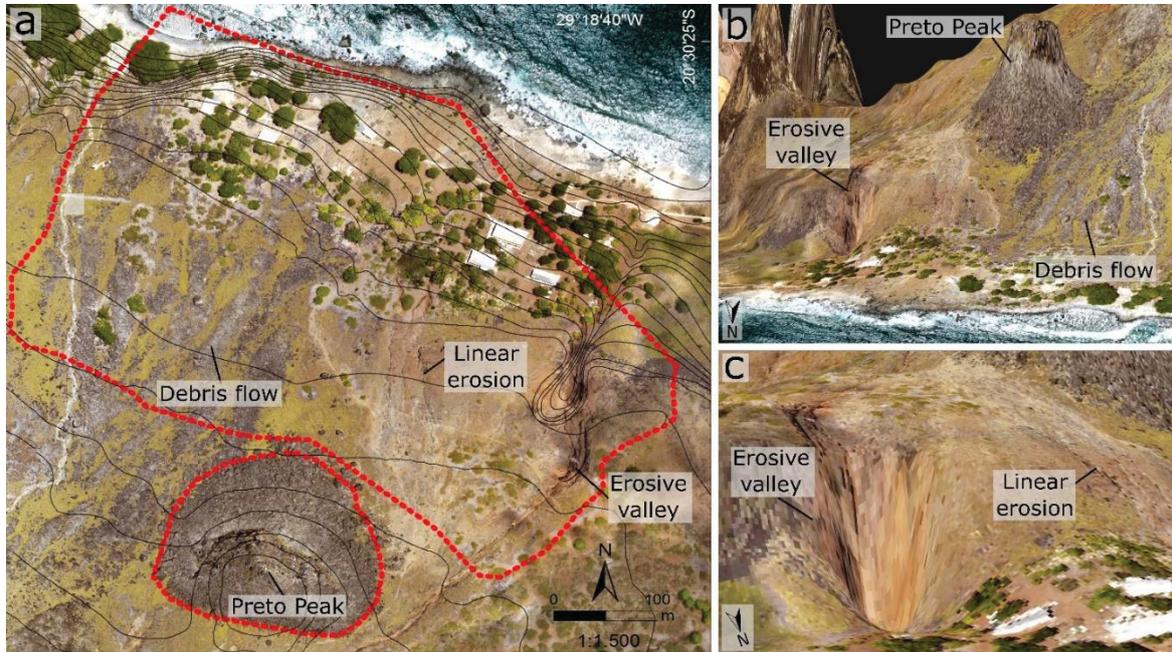


Fig. 81: Geo-referenced orthophotos: (A) generated in 2011 from the pre-existing data (topographic map with contour lines 20 m-interval and orthophoto with 30cm-resolution), and the red outline refers to the study area; (B) and (C) detail of the 3D model performed from preexisting data of Trindade Island (2x vertical exaggeration).

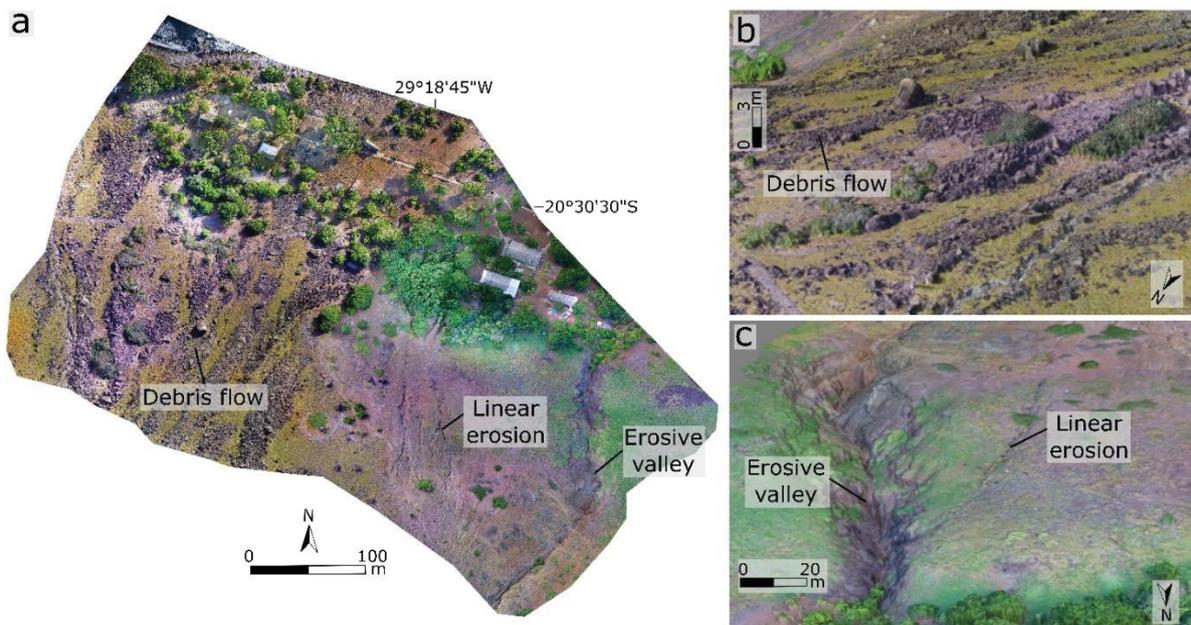


Fig. 82: Geo-referenced orthophotos: (A) generated in 2019 from RPA photogrammetry (Sfm) with 1,79cm-resolution; (B and C) detail of a 3D model performed from RPA photogrammetry (Sfm) (1x vertical exaggeration).

5.4.5 Discussion

Trindade Island is part of Brazil's territory that has natural hazardous environments with human occupation (requiring geohazards assessments) and unique geology that comprises a recent volcanic landscape. So far, surface temporal data are unavailable and prevent predictive geohazard analyses. Also, reaching the island is difficult and has limited the fieldwork for most researchers. We selected a pilot area on watersheds with anthropogenic infrastructure and carried out a practical assessment of three different geospatial data sources. The main points of this study, that require discussion, are summarized below, including the accuracy issues and limitations of each technique, besides the challenges and complexities of conducting a spatial (aerial and terrestrial) survey on the Trindade Island landscape.

- Pre-existent data: nautical charts and orthophoto

The pre-existing surveys included a nautical chart of DHN (1968) with 20 and 5 m interval contour lines and a 2011 photogrammetry survey with a 30 cm sampling distance. Therefore, the photogrammetry survey regarded the spatial distribution of ground features, which avoided visualizing morphometric variations, such as elevation and slope gradient. Thus, the 3D model of Trindade Island based on pre-existing data is inadequate for detailed analyses; after all, the model overgeneralizes fine-scale changes in the landscape. Such inadequacy highlights the importance of surveying data with high vertical accuracy on Trindade Island to study the terrain surface in detail.

Whereas the topographic data of nautical charts (from 1968) are frequently used for geomorphology and geology studies on Trindade Island (e.g., Angulo et al. 2018, Barão et al. 2020, Nogueira et al. 2020), our results evaluate the accuracy of such data and allow discussion about the work scales that should be used. Despite the overall mean error of the DTM from pre-existing data being significantly higher than the overall mean error of the RTK-GNSS and RPA data, the profiles produced demonstrated that the vertical data were compatible with accurate methods, especially where it presents contour lines. Therefore, considering the precision of the data source and the DTM error, it is recommended to use nautical charts for regional studies on an analysis scale $> 1:10,000$.

- RTK-GNSS: irregular data from rugged terrain

RTK-GNSS is a current technique used in different approaches due to high-accuracy positioning, such as surface mapping, relief modeling, monitoring the dynamic displacements while roving, monitoring of structures, and cadastral surveys (e.g., Gili et al. 2000, Sun et al. 2010, Im et al. 2013, Jin et al. 2014, Dabove et al. 2019, Mohamed et al. 2020).

In the present study, the DTM from RTK-GNSS data presents centimetric vertical accuracy. This accuracy is significantly higher than that of the RPA (meter) or the pre-existing data (decameter). In this regard, our comparative analyses of the interpolation procedure — in the ArcGis software — elucidate that the interpolation method of choice is crucial. For instance, the spline method provided the DTM with the highest vertical accuracy on a centimeter scale, differently from kriging, TIN, IDW, and topo to raster. Therefore, the

spline is an adequate tool for modeling irregular sampling (e.g., Lee et al. 1997) regarding vertical analysis — presumably due to the mathematical functions of the method (see Childs 2004, Paramasivam and Venkatramanan 2019).

Although the DTM has centimetric vertical accuracy, the spatial variability of the surface features was underestimated and limited to sizes in meters. However, we expected this result from the sampling theory point of view (e.g., Stehman 1999, De Gruijter et al. 2006, Gregoire and Valentine 2007, Stehman and Foody 2009, Brus et al. 2011), as the sampling spatial density, distribution, and frequency of our survey did not enable a spatial object with centimetric detail.

This scenario regarding the RTK-GNSS application as a terrestrial method presents limitations when used on rugged terrains. In this sense, the main challenges that influenced field surveying and, consequently, post-processing, already reported by previous researchers (e.g., Roosevelt 2014, Tokura and Kubo 2017, Deng et al. 2019), are summarized below: a) rugged relief and heterogeneous landscape, which limited access in the study area, resulted in an irregular grid of points cloud (Fig. 72A); b) the stony ground (roughened land surface) and higher slope led to dangerous walking (high probability of operator injury and equipment damage) (Fig. 83A); c) large rock deposits (Fig. 83B) hindered or even impaired data acquisition resulting in a discontinuous point grid, besides the dangerous trek and the operator being required to be physically trained; d) a deep valley with large landslides (Fig. 83C) resulted in gaps in the density of points due to the impossibility of walking with the rover; e) the high density of vegetation on foot slopes (Fig. 83D) affected trekking and interfered with the satellite signal, thus reducing the accuracy of the survey.

The DTM from RTK-GNSS data is excellent for analyses requiring vertical scale accuracy, such as morphometrics studies (e.g., Brasington et al. 2013, Rodrigues et al. 2019). In the present study, considering the precision of the data source and the error of the DTM, it is recommended to use RTK-GNSS on slope surface analyses on a scale $> 1:1,500$. On the other hand, such data have proven to be inadequate for fine-scale investigation of spatial ground variability on landscapes with a high density of linear erosion.

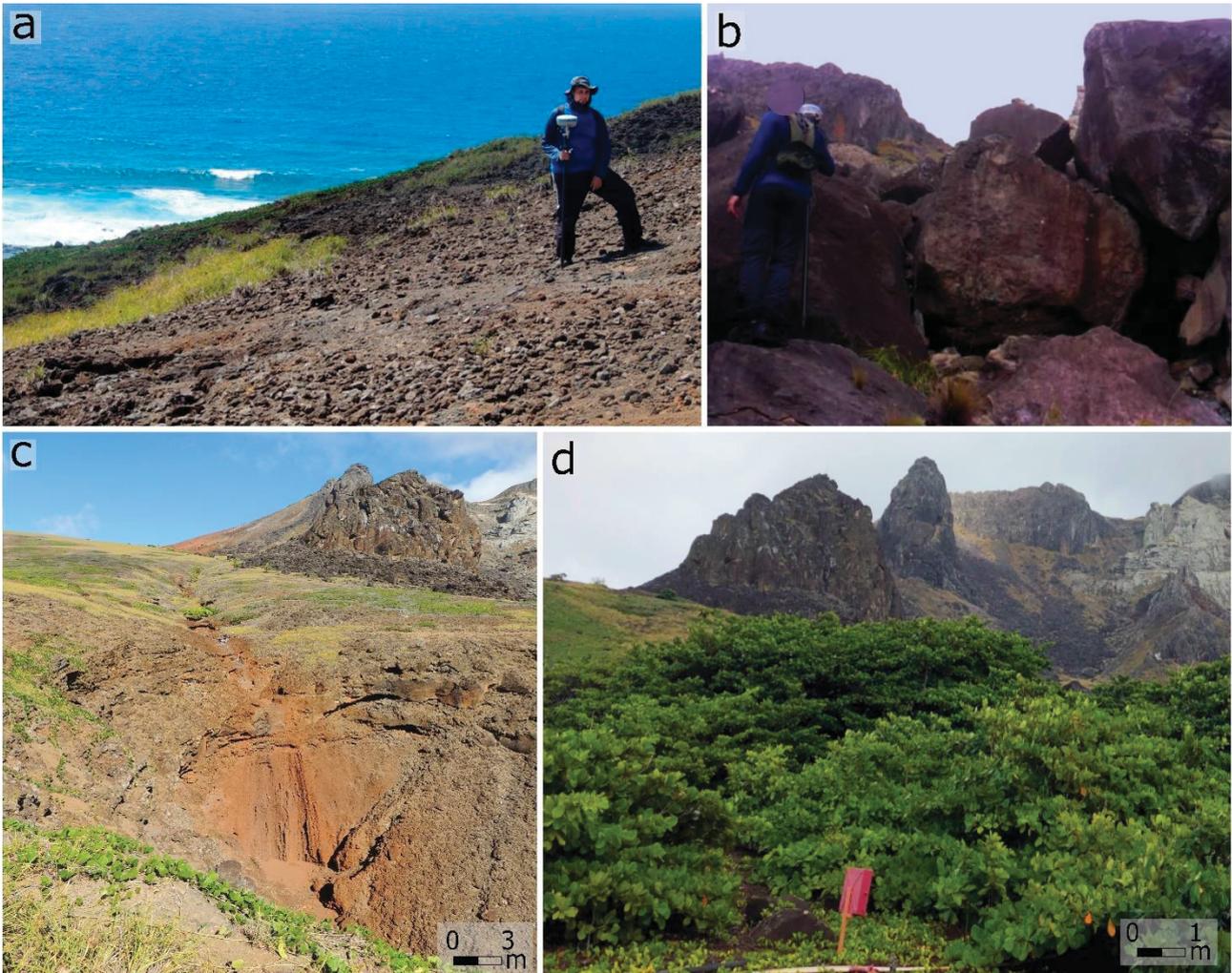


Fig. 83: Challenges faced during the RTK-GNSS surveying: (A) data acquisition with rover within the static-kinematic method (stop and go) on accessible terrain and the stony ground and high slope led to dangerous walking; (B) obstacles from metric and decametric boulders, (C) deep erosive valley, and (D) vegetation density on foot slopes.

- RPA with high-accuracy positioning using RTK-GNSS

The RPA has an advantage over traditional data capture in mapping or monitoring applications due to high spatial and temporal resolution, besides representing a low-cost alternative to the classical crewed aircraft (Colomina et al. 2008, Remondino et al. 2011, Gonçalves and Henriques 2015). Herein, the data quality from RPA with GCP measured by RTK-GNSS (e.g., Stempfhuber and Buchholz 2011, Mohamad et al. 2019) is appropriate for a detailed terrain surface inventory. In the models, the microtopography is visible, such as individual boulders, erosion, anthropogenic infrastructure, and vegetation (Fig. 78). In this sense, the high density (196 points/m²) and homogenous survey sampling led to high spatial accuracy (Fig. 80A) (e.g., Roosevelt 2014).

On the other hand, vertical accuracy was probably affected by the distribution and density of the GCPs (e.g., Martínez-Carricondo et al. 2018, Oniga et al. 2020), which was low (five per flight) and heterogeneous. Like in the RTK-GNSS survey, the data collected from the RPA also presented challenges that influenced field acquisition time, such as: a) scarce places on the terrain to attach the coded target, since surfaces were usually covered

by large debris flow deposits or mainly formed by rock outcrops (Figs. 84A and 84B), which is complex even with natural targets; b) sunlight reflected on the target, making it impossible for the program to recognize the code (Fig. 84C); c) natural obstacles, such as steeply sloping hills (Fig. 84D) and large trees (Fig. 84E) in the survey area, obstructed the RPA's flight. As a result, the gap in image overlapping in the northeast of the pilot area coincided with the tallest trees zone; d) numerous curious birds flying near the RPA created a severe risk of accidentally striking the equipment, which interfered with the survey (Fig. 84F); e) orthomosaic gaps linked to the survey's boundaries (Figs. 84G, 84H and 84I) indicated that the survey area should be slightly larger than the actual area of interest.

From all of the above, the DTM from RPA data is excellent for analysis requiring a centimetric spatial scale, in which a detailed description of terrain features is crucial. Considering the precision of the data source and the error of the DTM, the RPA data can be used in analyses with a scale $< 1:1,500$.



Fig. 84: Issues during the RPA survey and post-processing results: (a) and (b) problems in finding viable places to attach the target (due to the outcropping of the rocky substrate), enabling the strong winds to flip the targets and preventing the visualization of the codes; (c) intense sun exposure may reflect on the target, making it impossible to identify the targets in the post-processing stage; (d), (e) and (f) problems during the flight, obstacles concerning high relief, large trees, and curious birds flying close to the RPA, respectively; (g), (h), and (i) gaps limited to the boundaries of the survey and in regions of higher trees.

5.4.6 Conclusions

This work presented a practical assessment of three geospatial data sources: nautical charts, RTK-GNSS, and RPA-GNSS collected on Trindade Island. In addition, we performed extensive data acquisition with corresponding processing to produce DTMs and an orthomosaic for relief modeling. We also demonstrated the challenges and complexity of the spatial (aerial and terrestrial) survey in remote hazardous environments with a recent volcanic landscape.

For geohazards assessment on Trindade Island, models that allow detailed visualization of specific geological data are needed, such as density and types of linear erosion, the boundary of landslides, gravitational deposits dimension, lithology differences on the surface, anthropogenic infrastructure, vegetation distribution, and morphometric parameters. In this sense, there is a need to sample data with distance, distribution, and density that enable models with high vertical and spatial accuracy.

Herein, the RPA with vertical data measured by the RTK-GNSS survey has proven to address such needs due to its sampling distance (centimetric and homogenous) and density (196 points/m²). Additionally, the DTM with high accuracy provided a more detailed inventory than the other techniques. In summary, the RPA with the GCP technique proved to be the most viable option in isolated and difficult sites (with low vegetation cover) when compared to the RTK-GNSS, especially in terms of acquisition time and accessibility. Despite the advantages of the RPA-GNSS application, we demonstrated that other techniques are worthwhile depending on the purpose and scale of the analysis. For instance, cartographic products, such as the nautical chart of Trindade Island, are adequate for regional studies, even more so on the island where access to conduct a field analysis is limited. Furthermore, RTK-GNSS, although not practical when used on slopes, provides a DTM with centimeter vertical accuracy, which is excellent for morphometric analysis. Finally, we encourage the authorities to conduct monitoring based on the RPA-GNSS method presented herein. Thereby, it will enable a temporal inventory and future geohazards prediction studies on Trindade Island.

5.5 Dinâmica dos processos erosivos, movimentos de massa gravitacionais e depósitos de sedimentos

Os processos erosivos predominantes na área de estudo são do tipo linear, variando desde sulcos até voçorocas (com profundidade máxima de 18 m). Também foram descritas erosões intersulcos, erosões marginais nos canais, erosão interna e rochas expansivas com fissuras na superfície e em profundidade. Esses fenômenos estão principalmente relacionados aos litotipos da Formação Morro Vermelho. Por outro lado, os movimentos de massa gravitacionais, como quedas, tombamentos, deslizamentos e avalanches, estão associados ao Complexo Trindade. A Fig. 85 exemplifica o contexto geológico na região ocupada.



Fig. 85: Principais feições descritas na área de estudo: a) imagem panorâmica das bacias hidrográficas mapeadas (1 – voçoroca com 18 m de profundidade, 2 – encosta com erosões lineares, 3 – depósitos de tálus, 4 – encostas com depósitos de avalanche de rochas, 5, 6 e 7 – montes fonolíticos, 8 – vertente com declive $> 75\%$ e 9 – região costeira com a ocupação e os depósitos de materiais via leques aluviais); b) afloramento típico da Formação Morro Vermelho; e c) depósitos de rochas típicos do Complexo Trindade.

Considerando a complexidade geológica e as condições de degradação da superfície do terreno, que se destaca pela alta densidade de feições erosivas lineares e baixa cobertura vegetal, realizou-se uma avaliação detalhada na unidade geológica Formação Morro Vermelho. O foco das análises a seguir refere-se à caracterização dos maciços rochosos, uma vez que a área é predominante em afloramentos rochosos, com solos transportados em espessuras centimétricas.

Considerando a origem vulcânica da Ilha da Trindade, tornou-se necessário utilizar classificações específicas para os litotipos relacionados, como as classificações de Streckeisen (1967) e Pettijohn (1975), esta última focada em produtos piroclásticos. Para obter uma diferenciação mais detalhada, foram realizadas descrições da coloração, textura (uniformidade, forma dos grãos, arranjo espacial e porosidade) e cimentação. A resistência às intempéries foi descrita de acordo com os critérios de Bieniawski (1989) e Price (1993). Além disso, foram feitas descrições das descontinuidades (atitude, espaçamento, abertura, preenchimento, fluxo de água e número de famílias). Para caracterizar os processos

geológicos de superfície, foram considerados os critérios descritos na fundamentação teórica desta tese (itens 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3).

Além disso, foi realizado o monitoramento das feições por meio de estacas, um método amplamente utilizado em diferentes situações de monitoramento de processos erosivos devido à sua simplicidade e baixo custo, embora não seja padronizado. O método envolve a inserção de estacas niveladas vertical ou horizontalmente no local escolhido, com uma porção inicial exposta conhecida. Em intervalos de tempo pré-definidos, leituras são feitas para avaliar o aumento ou redução do comprimento exposto da estaca, a fim de verificar a ocorrência de erosão hidrodinâmica ou deposição de material no local. Neste estudo, optou-se pelo uso do método horizontal, pois na encosta investigada seria inviável instalar estacas verticalmente nas proximidades das bordas das feições, devido à falta de solos espessos e desenvolvidos, predominando rochas rígidas expostas na superfície do terreno. Além disso, a coleta de dados provenientes desse monitoramento foi realizada anualmente, devido às restrições de acesso à Ilha da Trindade, o que impossibilitou uma frequência maior de coleta.

Foram instaladas 12 estacas de monitoramento em junho de 2017 na parede dos afloramentos expostos pela erosão linear. Essas estacas foram distribuídas de forma a cobrir toda a encosta e todos os tipos de feições lineares, como sulcos, ravinas e voçorocas (Fig. 86). As estacas foram fabricadas com madeira resistente e possuíam uma ponteira em uma das extremidades para fixação. A extensão padrão das estacas foi de 50 cm, sendo inseridas nas rochas fragmentadas, de modo que apenas 20 cm ficaram expostos inicialmente (exposição inicial). As medições da variação da exposição das estacas, que representam as taxas de erosão, foram realizadas em junho de 2018 e 2019, durante o mesmo período de instalação.

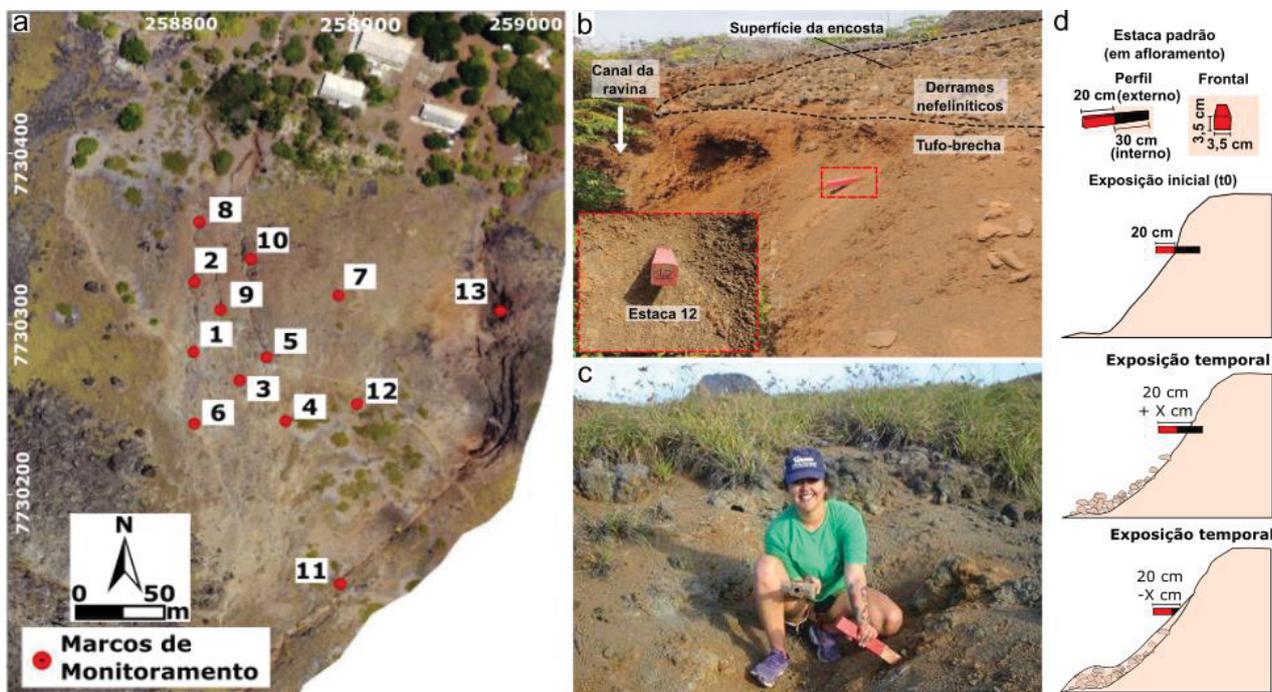


Fig. 86: O método de estaqueamento horizontal foi utilizado para mensurar a evolução das feições erosivas na área de estudo: (a) posicionamento em mapa para indicar sua localização; b) as estacas foram instaladas em afloramentos, e um detalhe da Estaca 12 é mostrado; (c) uma demonstração da instalação da estaca em campo é apresentada em uma feição do tipo ravina; e d) desenhos esquemáticos da dimensão padrão das estacas e da mensuração em afloramento.

5.5.1 Caracterização do substrato rochoso

A Formação Morro Vermelho, aflora na superfície das encostas e estende-se até a costa (Fig. 87). É constituída por litotipos com características geotécnicas distintas, frente aos processos intempéricos. Trata-se de derrames nefeliníticos (ocorrem nas cotas inferiores a 15 m e superiores a 55 m), mais resistentes ao intemperismo químico e mais suscetíveis ao intemperismo físico, que se encontram intercalados por depósitos piroclásticos fragmentados (ocorrem entre as cotas de 15 m e 55 m), os quais variam de tufos até brechas, e apresentam maior suscetibilidade ao intemperismo químico (Fig. 88). As principais características geológico-geotécnicas descritas em campo, encontram-se descritos a seguir.

Os afloramentos de tufo-brecha são descontínuos e predominantemente friáveis. Eles se apresentam extremamente alterados (Fig. 88 e 89), caracterizados pelo intemperismo que penetra nas discontinuidades e nos materiais rochosos. Mais de 50% desses horizontes foram observados decompostos e descoloridos, com predominância de uma coloração marrom acastanhado-avermelhado, especialmente nas porções da matriz e dos fragmentos compostos por materiais menos resistentes, como escórias e lapilli-tufo (descritos com matriz mal selecionada). Na região do sopé das encostas, foram identificados estratos compostos por tufo-brecha e lapilli-tufo, que se encontram completamente alterados (Fig. 89e).

Observou-se que nos afloramentos de tufo-brecha, as feições lineares se aprofundam, variando de 1 m a 3 m de profundidade na região NW da encosta e alcançando 20 m de profundidade no vale que delimita o perímetro NE da área de estudo. Esses estratos estão intercalados por camadas de lapilli-tufo (com espessura máxima de 1 m) e tufos (com espessura máxima de 60 cm). O contato entre esses diferentes litotipos piroclásticos (com altitude média de 53 m) é transicional e geralmente apresenta estratificação. Os horizontes compostos por lapilli-tufos e tufos são descontínuos e encontram-se completamente alterados e descoloridos, exibindo uma coloração marrom acastanhado-avermelhado. O material rochoso nesses horizontes está decomposto, mas as características texturais e estruturais estão preservadas (Fig. 89 e 90).

Os lapilli-tufos exibem diferentes graus de seleção, com os estratos bem selecionados sendo mais proeminentes nos afloramentos em comparação com os horizontes moderadamente e mal selecionados. Foi observada uma estratificação plano-paralela, e os fragmentos têm dimensões variando de 1 mm a 1,5 cm, com uma esfericidade predominantemente baixa a média e uma forma geralmente angular. Por outro lado, os estratos compostos por tufos apresentam uma seleção moderada a bem selecionada. Eles são geralmente estratificados e se destacam nos afloramentos, e os fragmentos também são predominantemente angulosos, com baixa esfericidade.

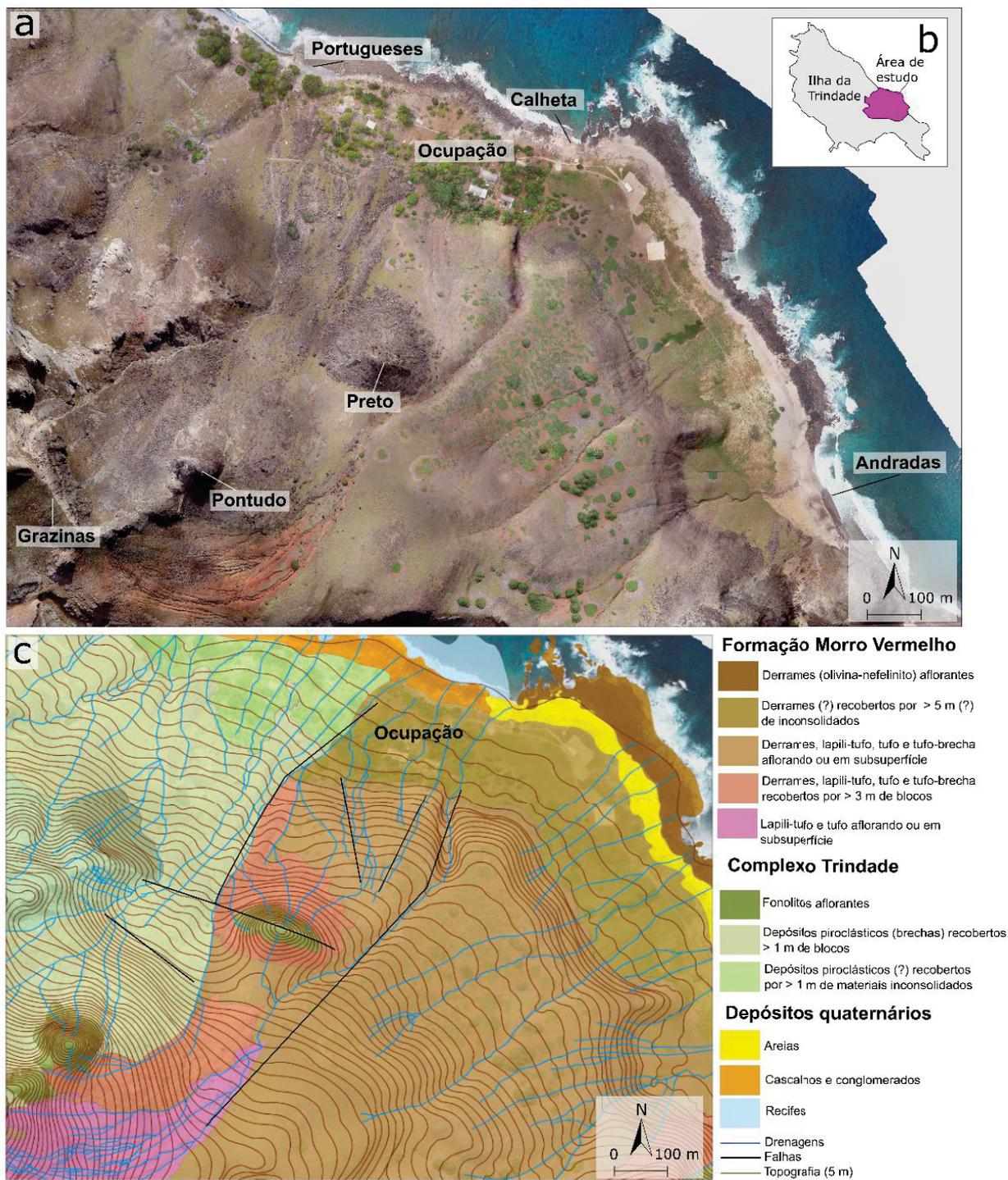


Fig. 87: Distribuição geológica da área de estudo: (a) vista aérea (imagem DHN, 2011) e (b) localização da área de estudo, na porção leste da Ilha da Trindade; e (c) mapa geológico-geotécnico simplificado.

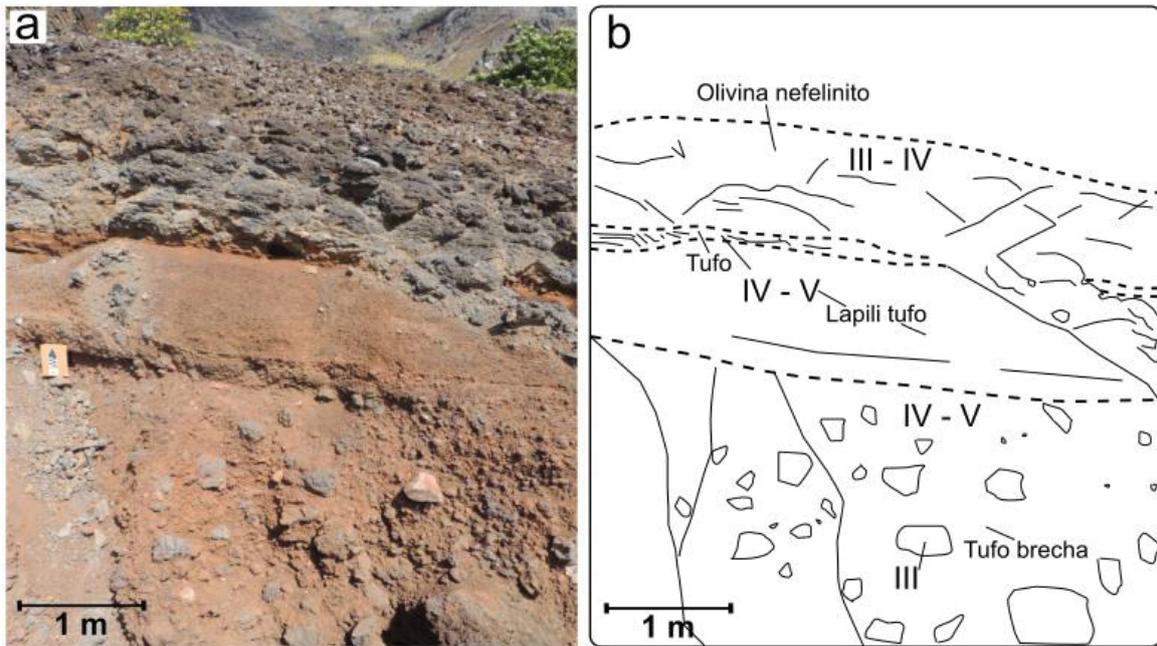


Fig. 88: Afloramento típico da encosta investigada na Ilha da Trindade, no qual afloram litotipos da Formação Morro Vermelho, com material rochoso fragmentado referente as rochas piroclásticas (tufo-brecha, lapilli-tufo e tufo), intercalados por derrames (olivina-nefelinito). Siglas referentes ao grau de intemperismo: III – moderadamente alterado; IV – extremamente alterado; V – completamente alterado.



Fig. 89: Afloramentos de tufo-brecha da Formação Morro Vermelho na encosta estudada: a), b), c) afloramentos localizados na quebra do relevo entre as cotas altimétricas 37,5 e 41,5, com alta

densidade de vazios resultantes da erosão diferencial, que facilitam a infiltração de águas superficiais e a ocorrência de erosão interna, apresentando descontinuidades marcantes; d) afloramento exposto em ravina; e) sopé da encosta com os litotipos completamente alterados e a presença de colúvio.

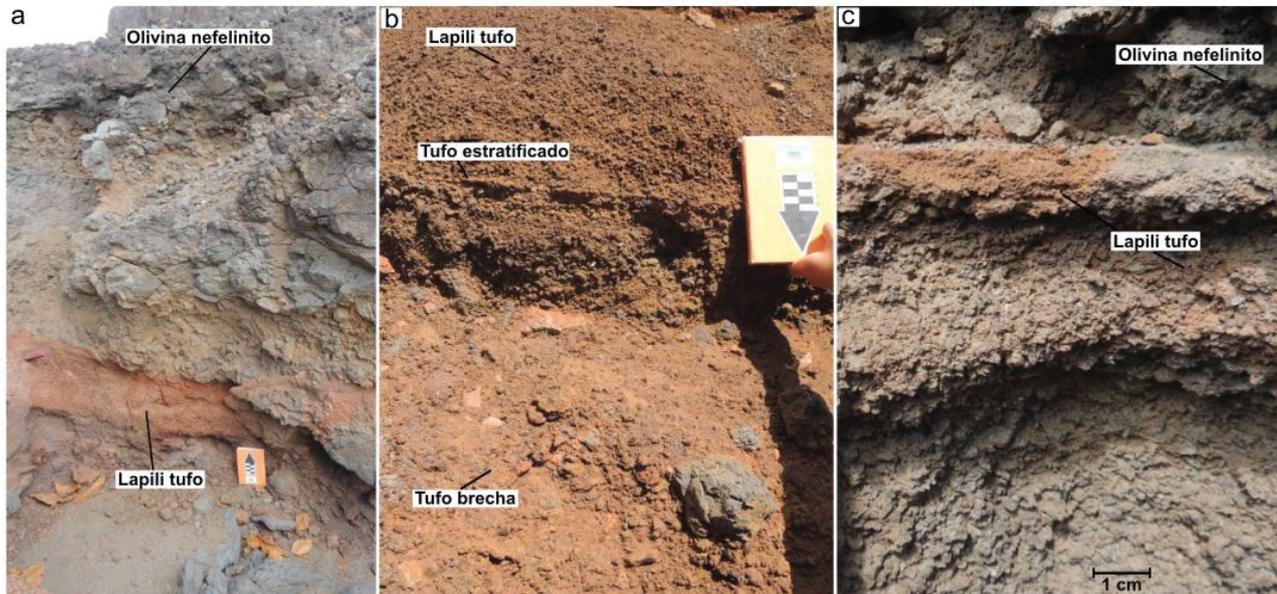


Fig. 90: Depósitos piroclásticos: a) afloramento exposto em ravina que mostra a sobreposição de um horizonte de lapilli-tufo sobre olivina-nefelinito; b) empilhamento litoestratigráfico característico da Formação Morro Vermelho, com tufo-brecha sobreposto por camadas intercaladas de tufo e lapilli-tufo; c) detalhe que apresenta lapilli-tufo sobreposto por derrames fortemente alterados.

Os derrames de olivina-nefelinito ocorrem sobrepostos às sequências piroclásticas, a partir da cota 55 m, e representam o litotipo com a maior área de afloramento na encosta investigada, abrangendo uma área de 0,030 km², o que corresponde a 53% da área total (Fig. 91). Também foram observados afloramentos de olivina-nefelinito em cotas abaixo de 15 m, na região da desembocadura do vale, no nordeste da área de estudo. O contato dos derrames com os horizontes piroclásticos é abrupto, descontínuo e marcado por vazios (Fig. 91a). Esses vazios são típicos de processos de erosão interna, com tufos e lapilli-tufo em contato com os derrames, úmidos e indicando a infiltração de água proveniente das chuvas.

As camadas de olivina-nefelinito são predominantemente descontínuas e extremamente fraturadas. Quando expostas em superfície, apresentam intemperismo esferoidal típico (Fig. 91d). Essas camadas exibem um nível moderado de alteração, com descoloração persistente (predominantemente cinza-claro), mas o maciço rochoso não é friável. Também foram observados horizontes altamente alterados, com 50% das rochas sendo friáveis e com descoloração persistente. Nesses horizontes, a cor varia de cinza-claro e esbranquiçado a vermelho-acastanhado. Além disso, foram identificados horizontes completamente alterados, descoloridos (predominantemente vermelho-acastanhado) e friáveis.

Os derrames exibem variações na densidade de vesículas, sendo que as porções superiores e inferiores dos estratos apresentam uma grande quantidade de vesículas (coincidindo com as zonas de erosão interna) e geralmente estão altamente ou

completamente alteradas. À medida que nos aproximamos do centro do derrame, a rocha tende a ter poucas vesículas, com predominância de condições moderadas de alteração.



Fig. 91: Destaque para os horizontes dos derrames da Formação Morro Vermelho: a) afloramento em ravina, com derrames no topo, altamente fraturados e com indícios de infiltração de água nos contatos com as rochas piroclásticas; b) derrame aflorando na superfície da encosta, apresentando intensa alteração e fragilidade; c) variação na densidade de vesículas; d) afloramento em superfície mostrando o intemperismo esferoidal comum nos derrames que se expõem no terreno.

A região sudoeste da área investigada é delimitada por materiais inconsolidados provenientes do morro testemunho Pico Preto, pertencente à unidade geológica mais antiga chamada Complexo Trindade (Fig. 92). Esses materiais consistem em depósitos de tálus, com espessura de várias dezenas de metros, compostos por blocos de rochas classificadas como fonolito. Os blocos têm dimensões que variam de menos de 1 m a mais de 30 m de diâmetro. A coloração predominante dos materiais inconsolidados do Pico Preto é cinza, com tonalidades que vão desde claras até escuras nas partes mais frescas, e tonalidades que variam de verde a castanho-avermelhado nas partes mais alteradas, concentrando-se principalmente nas discontinuidades das rochas.

Os blocos fonolíticos são descritos como levemente alterados, com o intemperismo penetrando na maioria das discontinuidades, mas os maciços rochosos estando apenas ligeiramente intemperizados. Também são encontrados níveis moderados de alteração nos blocos, nos quais o intemperismo penetra nas discontinuidades e no material rochoso, mas o material não é friável (menos de 50% da rocha está decomposta e descolorida) e porções de rocha fresca são comuns. Com base na descrição do substrato rochoso, foi constatado que os depósitos de tálus recobrem as seqüências de rochas (derrames intercalados com depósitos piroclásticos) da Formação Morro Vermelho.

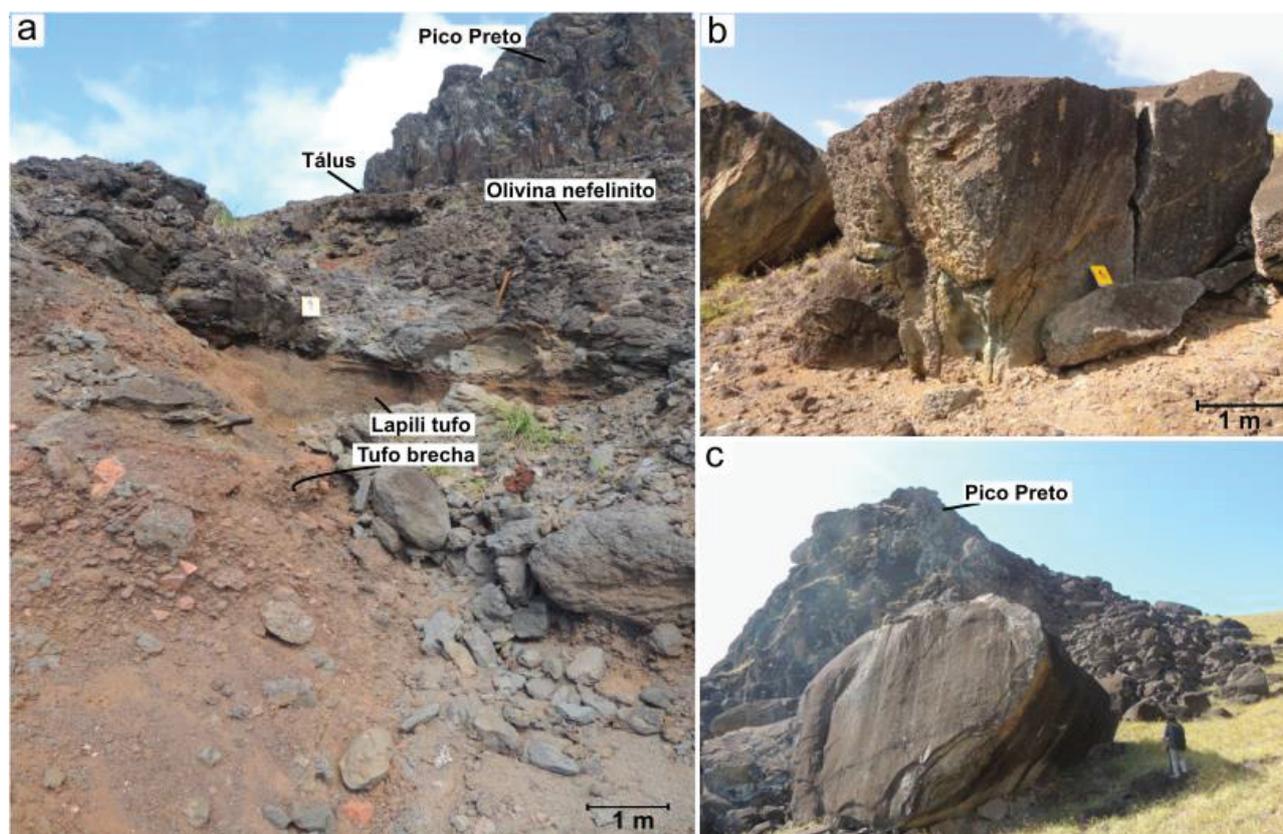


Fig. 92: Limite sudoeste (SW) da área investigada encoberto por depósitos de tálus provenientes do Pico Preto, um morro testemunho do Complexo Trindade: (a) esses depósitos recobrem as seqüências litológicas da Formação Morro Vermelho; (b) e (c) os blocos presentes nos depósitos de tálus possuem dimensões predominantemente decamétricas, encontram-se fraturados e apresentam níveis moderados de alteração

5.5.2 Caracterização das feições erosivas

O modelo 3D (Fig. 93) destaca o intenso desgaste do relevo, que resulta na formação de canais a partir de feições estruturais primárias, conhecidas como lineamentos. Esses lineamentos estão localizados nas áreas críticas de perda de solo. Na porção leste, onde o vale atinge uma profundidade de 18 metros, coincide com o afloramento das rochas de maior erodibilidade da Formação Morro Vermelho, identificadas por observações qualitativas como tufo-brechas.

Durante as investigações de campo e análises em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (ver item 6.4), foram identificadas feições erosivas lineares do tipo sulco (Fig. 94). Essas feições são mais frequentes a partir da cota 60 m, com maior predominância nos litotipos classificados como olivina-nefelinito. Foram observadas ravinas com comprimento máximo de 170 m, que estão associadas ao segundo lineamento principal da área de estudo, próximo ao vale da região nordeste. Essas ravinas ocorrem com maior densidade nas cotas onde afloram as sequências piroclásticas, como lapilli-tufo, tufo e tufo-brecha.

Também foi observada a presença de uma feição do tipo voçoroca, com uma profundidade máxima de 20 metros e largura máxima de 40 metros, localizada na desembocadura do vale da porção nordeste. Nesse local, aflora o horizonte de maior espessura correspondente aos tufo-brechas, que estão intercalados por tufo, lapilli-tufo e zonas de autobrechas do derrame nefelinítico.

Além disso, foi constatada a ocorrência de erosão intersulcos, bem como erosão interna na interface de contato entre os piroclastos e o derrame. Esse cenário é resultado da evolução natural da paisagem, porém, é provável que tenha sido acelerado pela intervenção humana, especialmente devido à introdução de animais por antigos colonizadores. Atualmente, observa-se uma recuperação da vegetação rasteira desde a extinção dos animais. No entanto, a presença da espécie exótica *Guilandina bonduc* está prejudicando a recuperação das gramíneas, o que favorece o avanço dos processos erosivos.

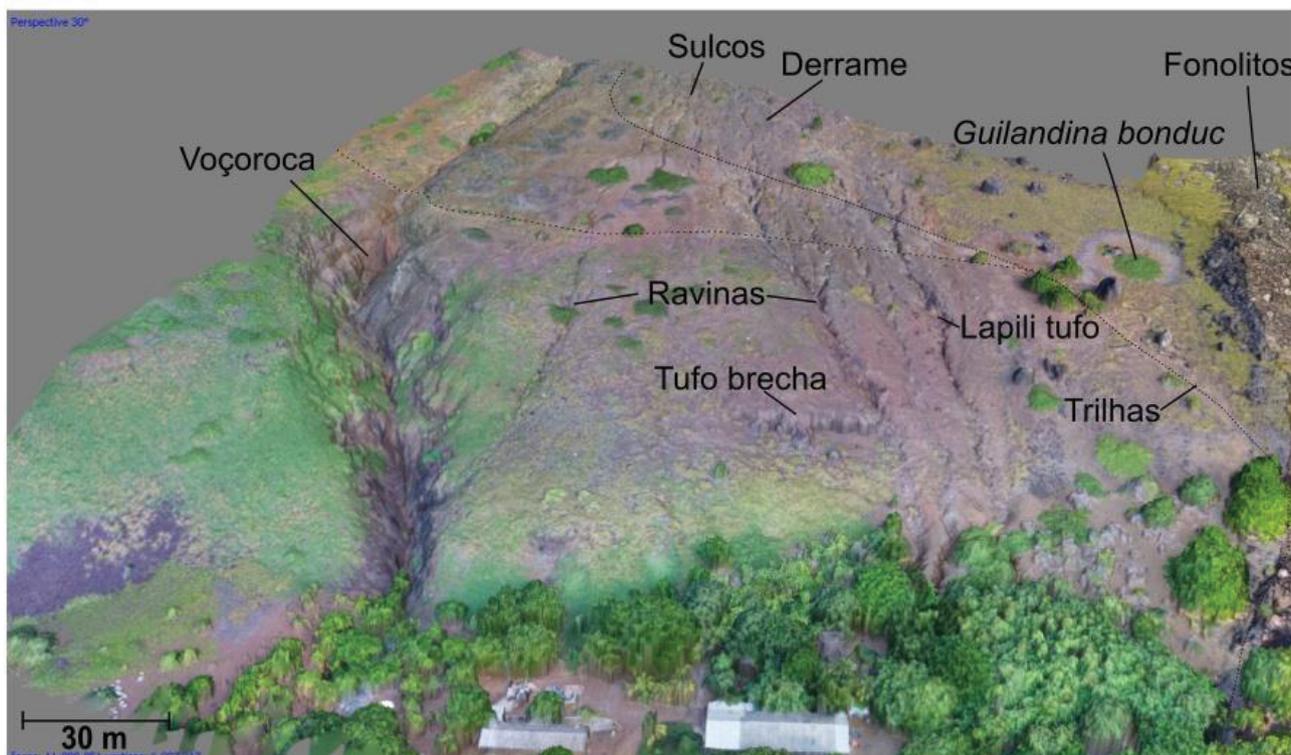


Fig. 93: Modelo 3D da encosta investigada, obtido por meio de levantamento com aeronave remotamente pilotada (RPA), destacando as principais feições e litotipos.

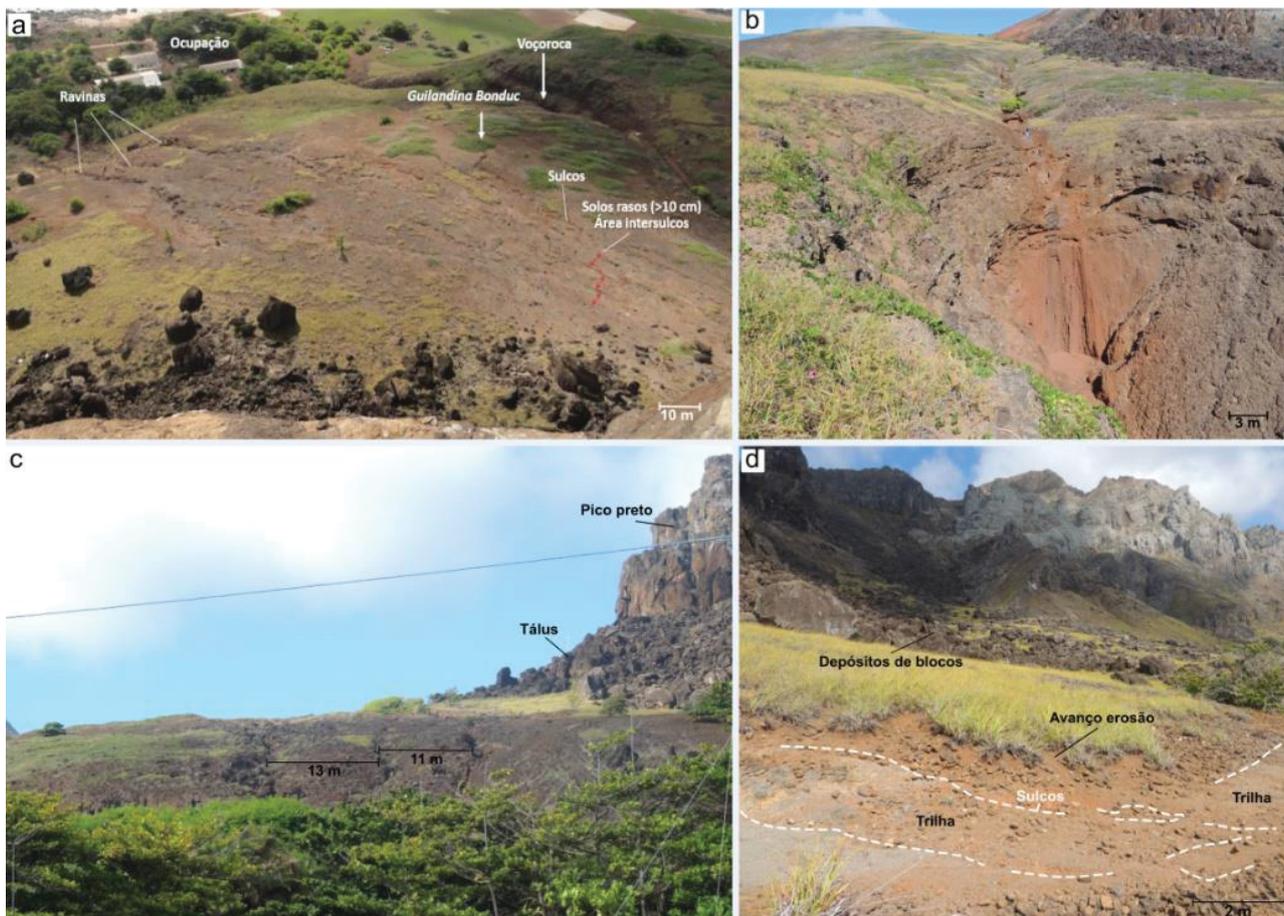


Fig. 94: Processos erosivos a montante da ocupação na Ilha da Trindade: a) vista panorâmica da encosta mostrando a predominância de sulcos a montante, que evoluem para ravinas e voçorocas a jusante; b) detalhe da voçoroca; c) panorâmica destacando as ravinas; e d) trecho da trilha utilizada pela ocupação, onde a erosão está próxima da zona de depósitos de blocos.

O monitoramento das estacas de monitoramento revelou que a maioria das feições lineares apresentam erosão ativa, embora tenha sido observada uma predominância de pouca evolução nos marcos entre 2017 e 2019 (Tabela 17). Essas evidências fornecem indícios de uma relação entre os materiais e processos erosivos. Destaca-se a medição realizada no marco 10, instalado na camada onde afloram brechas na base dos estratos da área de estudo, que evidenciou uma erosão de 21 cm entre 2017 e 2018. Isso sugere que as brechas, sendo mais suscetíveis à erosão, desempenham um papel significativo no processo erosivo na área. No entanto, o marco 10 permaneceu estável entre 2018 e 2019, o que pode indicar uma estabilização do processo erosivo nesse período, possivelmente devido a mudanças nas condições ambientais ou à ocorrência de processos de autorrecuperação, como a formação de uma cobertura protetora de vegetação observada.

A estaca 11, localizada na desembocadura da voçoroca (18 m de profundidade), demonstrou estabilidade durante o período monitorado, evidenciada pela recuperação da vegetação rasteira que alcança o fundo do vale. Isso sugere que as características geológicas e os materiais presentes nessa região podem possuir uma maior resistência à erosão ou que os processos erosivos tenham diminuído nessa área específica. Por outro lado, o marco 22 apresentou erosão de 2,5 cm entre 2017 e 2018 e, em 2019, foi encontrado deslocado de sua posição original devido a processos de deslizamento planar, a alguns metros de distância. Isso indica que eventos episódicos, como deslizamentos, desempenham um papel importante na erosão da região. Esses eventos são

desencadeados por fatores como chuvas intensas, instabilidades nas encostas e atividades humanas, como o uso da área como trilha de acesso. Além disso, as evidências revelam que, dos 13 marcos instalados, 5 estão sendo soterrados, o que indica que o material desprendido pela erosão intersulcos, ou seja, a erosão entre os sulcos formados na superfície do terreno e transportado pelas águas superficiais, é predominante nessas áreas. A presença de material inconsolidado soterrando os marcos sugere uma intensa formação coluvial, em que o material é desprendido da superfície e se acumula nas áreas ao redor dos marcos. As estacas foram instaladas no substrato rochoso e, durante o monitoramento, observou-se pouca evolução no período monitorado, o que pode estar relacionado aos materiais inconsolidados transportados pelas chuvas. Além disso, os processos erosivos parecem estar mais associados ao aprofundamento das feições do que ao seu alargamento. No entanto, as evidências indicam que os materiais geológicos, como as brechas, e os processos erosivos locais desempenham um papel significativo na taxa e estabilidade da erosão na área estudada. Também se observou que eventos episódicos, como deslizamentos desencadeados pelas chuvas, exercem uma influência importante na erosão local. Compreender essas relações é essencial para gerenciar e prevenir os processos erosivos e seus impactos na região.

Tabela 17: Resultados do monitoramento das feições erosivas em 2017, 2018 e 2019. A estaca 12a foi removida do local em 2018, possivelmente devido a episódios de chuva, e foi reinstalada em 2019 (12b).

Rótulo	Estaca		Litotipo	Feição	Exposição da estaca (em cm)		
	Posição (WGS 26 Sul)	Altitude (m)			jun./17	jun./18	jun./19
1	258806 / 7730360	78	olivina-nefelinito	ravina	20	21,2	20
2	258801 / 7730367	60	olivina-nefelinito	ravina	20	21	21
3	258845 / 7730296	80	olivina-nefelinito	ravina	20	14	14
4	258846 / 7730269	85	Olivina-nefelinito	ravina	20	17	17
5	258847 / 7730315	75	solo alóctone (olivina-nefelinito)	sulco	20	19,5	19
6	258850 / 7730321	74	olivina-nefelinito	ravina	20	17	18
7	258817 / 7730355	65	solo alóctone (olivina-nefelinito)	ravina	20	11,6	11
8	258838 / 7730354	63	lapilli-tufo	ravina	20	24	25
9	258837 / 7730356	62	contato lapilli-tufo e tufo-brecha	ravina	20	21	21
10	258845 / 7730394	68	tufo-brecha	afloramento na quebra da encosta	20	41	41
11	258924 / 7730244	72	tufo-brecha	voçoroca	20	20	20
12a	258896 / 7730320	85	Olivina-nefelinito	ravina	20	19	-
12b	258876 / 7730300	91	solo alóctone	intersulcos	-	-	20
13	258975 / 7730301	50	olivina-nefelinito	voçoroca	20	23	23

5.6 Análise das chuvas e a ocorrência de movimentos de massa gravitacionais e processos erosivos

Nesta seção da tese, são resumidas as principais percepções das observações, descrições e interpretações realizadas neste estudo. As microbacias que compõem a área de estudo, que também inclui elementos antropogênicos, apresentam principalmente drenagens efêmeras. Devido ao relevo escarpado, as chuvas geram escoamento superficial com alta energia, transportando materiais das áreas mais altas até as praias.

Nos locais onde afloram a Formação Morro Vermelho, que é composta por intercalações de tufo-brecha, lapilli-tufo, tufo e olivina-nefelinito, os sedimentos arenosos e argilosos são transportados por meio da erosão superficial, formando feições lineares e leques aluviais. As áreas de deposição correspondem ao sopé das encostas e às praias modernas, como as praias arenosas dos Andradas e da Calheta. Além disso, foi observado um vale de um rio efêmero, onde ocorre um importante transporte de sedimentos, principalmente argilosos, durante os períodos de chuva. O escoamento superficial também causa intensa erosão linear na bacia ocupada, desde estágios iniciais de erosão (sulcos) até erosão linear profunda (ravinas e voçorocas). Os sedimentos transportados por esse processo hidrodinâmico são depositados próximo às áreas ocupadas e na praia arenosa da Calheta. De maneira geral, a área de estudo apresenta um estágio significativo de erosão diferencial, refletido tanto nas feições de relevo, como os picos fonolíticos na paisagem, quanto nos afloramentos em profundidade, nos quais os estratos exibem diferentes estágios de intemperismo.

No contexto dos processos erosivos identificados, observou-se que, embora não representem um perigo direto para a ocupação, sua evolução pode afetar camadas mais frágeis¹⁰ em profundidade, como o tufo-brecha, ou expandir-se espacialmente em direção às superfícies que sustentam os depósitos de avalanches de rochas, que fluem em direção às edificações (Figura 95). Nesse sentido, a erosão desempenha um papel importante na desencadeação de movimentos de massa gravitacionais perigosos, como as avalanches de rochas (por exemplo, Marinos et al., 2017; Wenger et al., 2018), que são potencialmente perigosos, episódicos e representam uma das principais ameaças à vida humana em ilhas vulcânicas no oceano.

Nos locais onde a unidade geológica Complexo Trindade aflora, são observadas estruturas vulcânicas fonolíticas que se destacam na paisagem como picos isolados, enquanto o embasamento da ilha é composto por brechas piroclásticas. As encostas dessas áreas são predominantemente cobertas por blocos de rochas de tamanho variando entre métrico e decamétrico, que se estendem até as praias e áreas ocupadas. Esses blocos foram deslocados devido a processos gravitacionais como quedas, tombamentos, deslizamentos e avalanches de material rochoso. Em ilhas oceânicas, esses tipos de movimentos gravitacionais representam o maior perigo, frequentemente resultando em perdas de vidas e prejuízos econômicos (por exemplo, Saroglou et al., 2012; Marinos et al., 2017).

¹⁰ No contexto mencionado, "camadas mais frágeis" refere-se a camadas de rochas ou materiais que possuem uma estrutura menos resistente e são mais suscetíveis a sofrer erosão ou danos causados pelos processos erosivos. Essas camadas podem ser menos consolidadas, menos compactas ou menos coesas, o que as torna mais vulneráveis à ação dos agentes erosivos, como a água ou vento. Consequentemente, quando se menciona que camadas sensíveis em profundidade podem ser atingidas pela evolução dos processos erosivos, significa que essas camadas mais delicadas ou suscetíveis à erosão estão sujeitas a serem afetadas ou expostas à medida que a erosão progride ou se aprofunda. Estas informações foram obtidas no OPENAI (2023).

Na área de estudo, as áreas de deposição dos processos gravitacionais correspondem à região das praias da Calheta e dos Portugueses, onde há depósitos de detritos e sedimentos finos transportados pelo fluxo de detritos e depositados por meio de leques aluviais formados pelo escoamento das águas superficiais. Embora as espessuras desses depósitos não sejam significativas, a Ilha da Trindade apresenta uma dinâmica complexa e diversidade de processos que resultam em sedimentos de diferentes dimensões. Os movimentos de massa gravitacionais, como quedas, tombamentos e avalanches de rochas, que podem ser acelerados e intensificados pelos processos erosivos, representam o cenário de maior perigo para a ocupação da Ilha da Trindade.

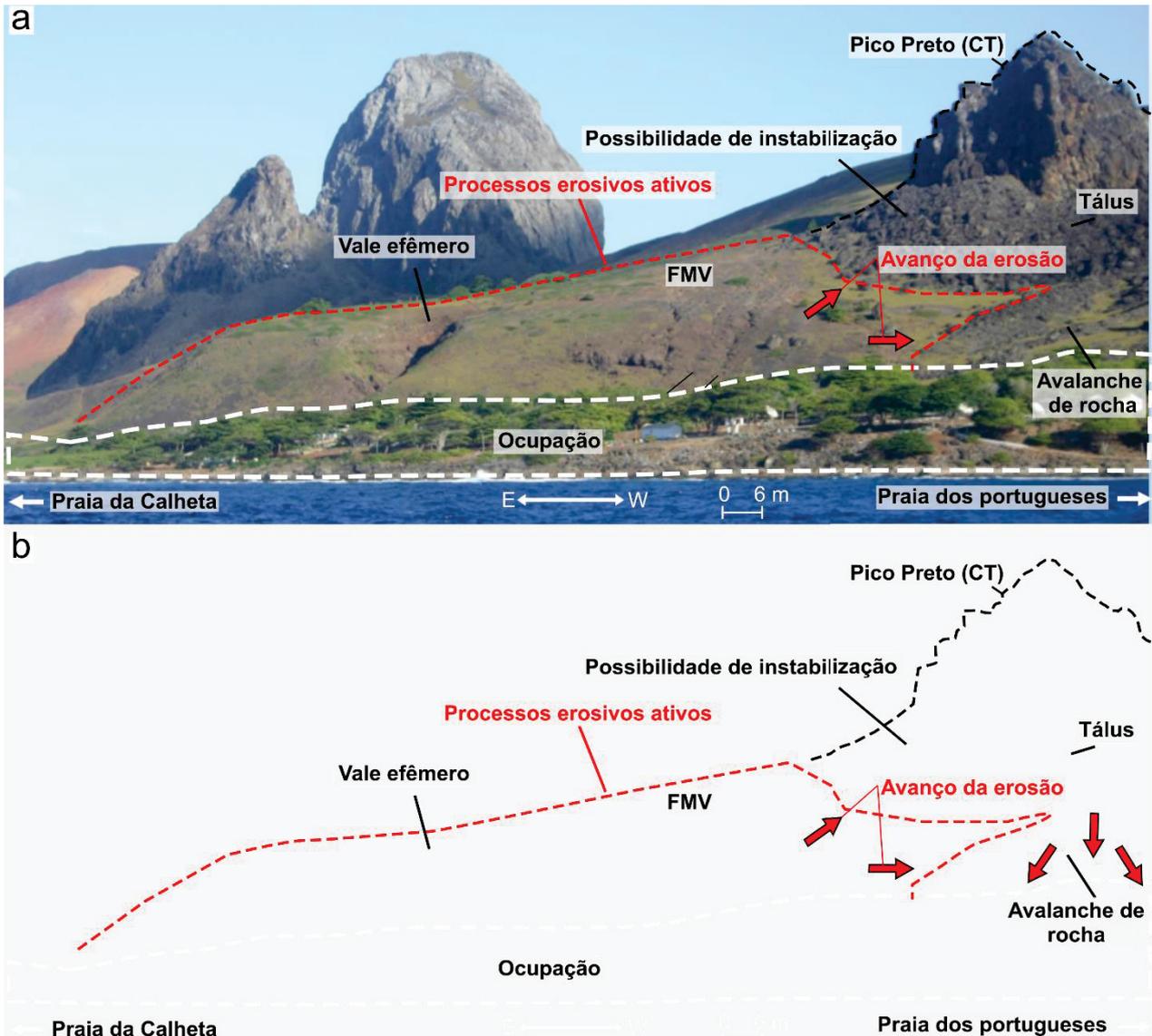


Fig. 95: Representação de um possível cenário em relação aos processos erosivos a montante da região ocupada na Ilha da Trindade: a) vista panorâmica da encosta, destacando o avanço dos processos erosivos em relação aos depósitos de blocos de rocha.; e b) representação esquemática do cenário, ilustrando os processos erosivos e a relação com os depósitos de blocos de rocha.

6. Discussão integrada e conclusão

6.1 Reflexão dos perigos geológicos na Ilha da Trindade

Na presente tese, fornecemos a base conceitual (item 4) que embasou os métodos e resultados. Essa etapa do estudo é de extrema importância, especialmente quando a análise abrange dados relacionados à atividade humana, os quais podem contribuir para prevenir perdas de vidas e danos ao patrimônio brasileiro, como no caso da Ilha da Trindade. Conforme apontado por Zuquette (2018a), muitos estudos sobre eventos perigosos não adotam os conceitos estabelecidos pela comunidade técnico-científica, nem empregam adequadamente o significado real e técnico das palavras. A padronização e o entendimento dos termos são cruciais, uma vez que diversos profissionais estão envolvidos nas diferentes fases do gerenciamento de riscos e desastres. Optamos por seguir conceitos e classificações amplamente reconhecidos e utilizados na comunidade científica internacional, especialmente aplicados em regiões vulcânicas insulares.

Para compreender os perigos geológicos e suas potenciais consequências, como perda de vidas, danos econômicos e perda de patrimônio, realizamos levantamentos detalhados dos aspectos básicos da área ocupada. Esses levantamentos incluíram estudos geomorfológicos, análise da superfície do terreno, avaliação de parâmetros geológicos-geotécnicos e coleta de dados pluviométricos. Essa etapa inicial foi fundamental, pois a Ilha da Trindade carecia de informações geológicas-geotécnicas relacionadas aos perigos geológicos. A ausência desses dados impossibilitava a utilização de modelos conceituais baseados em estudos pré-existentes, o que nos levou a realizar um estudo conceitual-observacional com dados próprios. Além disso, essa falta de informações científicas sobre a Ilha da Trindade também inviabilizava a realização de análises de risco essenciais, como a probabilidade de danos decorrentes da exposição a determinados perigos. Isso ocorria devido à ausência de um banco de dados temporal relacionado à dinâmica dos processos geológicos exógenos, bem como à falta de detalhes sobre a superfície do terreno.

Para estabelecer o primeiro modelo conceitual-observacional¹¹ da Ilha da Trindade, realizamos uma série de levantamentos. Iniciamos pela caracterização detalhada do relevo, incluindo topografia, declividade e feições geomorfológicas, por meio da utilização de recursos tecnológicos para produzir modelos digitais de elevação. Esse levantamento permitiu a criação de um programa de dados temporais em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), o que é essencial para análises futuras relacionadas aos riscos geológicos e previsibilidade desses eventos. Também realizamos o mapeamento da área de estudo para identificar a dinâmica dos processos erosivos e deposicionais na ilha, considerando sua relação com a ocupação humana. Essa análise detalhada nos permitiu compreender os fatores que contribuem para os processos erosivos e suas implicações.

Por fim, enfocamos a investigação das encostas que apresentam um estado avançado de degradação devido aos processos erosivos. Além disso, coletamos dados relacionados às chuvas episódicas, que desempenham um papel fundamental na evolução

¹¹ Na presente tese, o modelo conceitual-observacional foi apresentado por meio de um texto contendo dados e informações relevantes. Nesse contexto, o modelo descreve de forma conceitual as características geotécnicas observadas na área de estudo, como o substrato rochoso, materiais inconsolidados, composição, propriedades geológico-geotécnicas e comportamento frente aos processos erosivos, entre outros aspectos pertinentes. Esse modelo tem o propósito de auxiliar na compreensão e interpretação do comportamento geológico-geotécnico da região, fornecendo subsídios para análises e tomadas de decisão relacionadas à gestão de riscos e ao planejamento urbano.

da paisagem na ilha. Esses levantamentos e análises são cruciais para a compreensão dos processos erosivos e de movimentos de massa na Ilha da Trindade, bem como para a realização de estudos futuros relacionados aos riscos geológicos e previsibilidade desses eventos.

Os resultados obtidos nesta tese forneceram informações técnicas importantes sobre os perigos geológicos na Ilha da Trindade. Essas informações são úteis e cruciais, e devem ser consideradas pelas autoridades responsáveis pela gestão territorial, manutenção da segurança da ocupação e projetos de expansão das edificações na ilha. Esses resultados ajudam a subsidiar decisões e medidas de mitigação de riscos, visando garantir a segurança e proteção da população e do patrimônio na Ilha da Trindade.

6.2 Análises de riscos geológicos na Ilha da Trindade: o que é necessário?

Como mencionado anteriormente, a Ilha da Trindade carece de dados temporais para viabilizar estudos de previsão relacionados aos riscos geológicos não-vulcânicos. Nesta tese, foi demonstrada a metodologia, viabilidade e importância de monitorar a evolução das feições erosivas e gravitacionais por meio de geotecnologias. Propomos o uso de aeronaves remotamente pilotadas com medições verticais realizadas por *RTK-GNSS*. Além disso, recomendamos a instalação de uma rede de monitoramento em tempo real nas encostas a montante da ocupação, juntamente com medidas não estruturais, como alarmes e planos de evacuação. Essas medidas visam fornecer informações atualizadas e permitir uma resposta rápida diante de possíveis eventos geológicos.

Os dados de monitoramento são efetivamente utilizados para acompanhar e compreender a evolução das feições erosivas e movimentos gravitacionais ao longo do tempo. Por meio do banco de dados gerado a partir de dados de monitoramento, é possível realizar análises comparativas para identificar mudanças significativas nas feições observadas, como o avanço de processos erosivos, movimentos de massa gravitacionais ou instabilidades geotécnicas. Essas informações permitem avaliar a velocidade e direção dos processos, identificar áreas de maior perigo e risco, e compreender os mecanismos subjacentes. Com base nessas informações atualizadas de forma regular, medidas preventivas e corretivas podem ser tomadas, tanto em termos estruturais quanto não-estruturais, como a implementação de ações de estabilização de encostas, a definição de zonas de restrição ou evacuação, e a adaptação de projetos de expansão urbana. Além disso, os dados de monitoramento são essenciais para aprimorar modelos e prever possíveis cenários futuros, contribuindo para uma abordagem mais proativa na gestão dos riscos geológicos.

Também demonstramos que a análise detalhada da distribuição das chuvas em alta resolução permite reconhecer padrões que provavelmente estariam ocultos pelos totais de chuvas mensais ou anuais. Nesse sentido, é necessária a implementação de um sistema de monitoramento diário, com registro de chuvas a cada hora, na Ilha da Trindade, em vez de apenas o registro do acumulado diário atualmente realizado. Essa abordagem detalhada é fundamental para a manutenção e para estudos de previsão da evolução dos processos perigosos exógenos. Ressalta-se que as lacunas na coleta de dados de chuva na Estação Meteorológica da Ilha da Trindade (EMIT), devido à falta de manutenção do equipamento desde 2019 até o término desta tese em 2023, prejudicam os estudos dos processos exógenos na região.

O presente estudo fornece dados básicos detalhados sobre geologia, geomorfologia e processos exógenos, essenciais para a delimitação dos perigos geológicos. Esses dados, combinados com informações temporais provenientes de programas de monitoramento, permitirão o desenvolvimento de modelos analíticos e de previsão no contexto de riscos geológicos, orientando a implementação de medidas preventivas adequadas na região. Para isso, é necessário que, além dos esforços científicos, haja sensibilização por parte das autoridades, como a Marinha do Brasil, responsável pela gestão do local, resultando em investimentos financeiros e humanos adequados. Essa cooperação, em conjunto com as universidades, viabilizará a implementação de um programa de gestão de múltiplos riscos, que é necessário e urgente. A Ilha da Trindade requer uma abordagem abrangente de gestão de riscos, uma vez que representa uma região estratégica para a soberania nacional, situada na Amazônia Azul, sendo uma área de proteção ambiental e um monumento natural com uma ocupação em condições de isolamento, limitada em recursos médicos e exposta a processos geológicos perigosos.

7. Conclusão e considerações finais

Os resultados obtidos na presente tese estão relacionados aos processos geológicos exógenos, proporcionando uma compreensão de como esses processos se comportam e se agrupam. Nesse sentido, foi constatado que a topografia da ilha está passando por uma intensa fase de erosão (destrutiva), uma vez que a atividade vulcânica que contribuiu para a fase construtiva cessou aproximadamente 0,17 Ma, conforme relatado por Pires et al. (2016). A área mapeada está sujeita a uma intensa erosão hídrica causada pelo escoamento das águas superficiais. Essa erosão varia desde estágios iniciais, como erosão intersulcos, até erosões lineares profundas, como voçorocas. Observa-se também um intenso desgaste do relevo e a formação de vales a partir de feições estruturais primárias, como lineamentos. Além disso, os eventos climáticos episódicos, caracterizados por alta pluviosidade e intensidade em curto período, desempenham um papel importante no transporte, remoção e deposição de materiais inconsolidados, bem como na ocorrência de movimentos de massa gravitacionais. Portanto, as características locais de erosão eólica e hídrica desempenham um papel fundamental na erosão total dos materiais geológicos nas áreas a montante da ocupação na Ilha da Trindade.

Com base no mapeamento de campo, monitoramento e ensaios realizados na área de estudo entre 2018 e 2022, foi constatado que a Formação Morro Vermelho é a formação geológica mais afetada pela degradação ambiental devido aos processos erosivos. Dentro dessa formação, os horizontes compostos por rochas piroclástica, caracterizados por serem fracamente cimentados e naturalmente friáveis, estão sofrendo uma erosão mais intensa em comparação aos horizontes suprajacentes compostos por rochas nefeliníticas, especialmente em áreas com alta declividade. Na área de estudo, as feições erosivas lineares que ocorrem nos nefelinitos, apresentam menor dimensão lateral e profundidade, com predomínio de erosão intersulcos e ravinas pouco profundas. Por outro lado, nos depósitos piroclásticos, como tufos, lapili-tufos e tufo-brechas, as feições lineares mais profundas e largas da área de estudo estão associadas a essas rochas. Isso sugere que esse processo está relacionado à natureza friável dessas rochas, que apresentam maior porosidade e permeabilidade, assemelhando-se às características de rochas sedimentares, apesar de sua origem vulcânica. Portanto, essas rochas devem ser abordadas como rochas vulcano-sedimentares.

É crucial destacar a importância de retardar ao máximo a evolução e o aprofundamento das feições nas áreas onde ocorrem os derrames nefeliníticos. Caso essas feições atinjam as camadas de rochas piroclásticas sobrepostas e subjacentes, os processos erosivos podem se intensificar e atingir os depósitos de blocos decamétricos do Complexo Trindade, representando um risco para as áreas ocupadas nas encostas. O escoamento superficial, juntamente com o transporte de materiais inconsolidados, detritos e erosões intersulcos provenientes de drenagens efêmeras, são os principais agentes de erosão nas encostas da Formação Morro Vermelho e no substrato rochoso piroclástico do Complexo Trindade. Essas feições lineares são altamente susceptíveis ao transporte e desempenham um papel significativo na sua própria formação e evolução. Portanto, é essencial adotar medidas para mitigar o avanço desses processos erosivos e proteger as áreas ocupadas nas encostas contra possíveis riscos.

Em resumo, a ocupação, a infraestrutura e o patrimônio da Ilha da Trindade estão sujeitos a processos geológicos que representam riscos potenciais de danos e perda de vidas. Em particular, os movimentos de massa gravitacionais, como avalanches, quedas e tombamentos de blocos de rochas, que podem ser acelerados e intensificados pelos processos erosivos hídricos e desencadeado pelas chuvas episódicas, representam o maior perigo. Além disso, a evolução da paisagem na ilha está relacionada não apenas a processos naturais, mas também à intervenção humana desde a época dos antigos colonizadores, que introduziram animais e tiveram um impacto significativo na aceleração dos processos erosivos. Nesse sentido, a Ilha da Trindade, especialmente a região ocupada abordada na tese, pode ser considerada em um contexto de processos quase-naturais.

Considera-se também que, devido à exposição e heterogeneidade dos processos geodinâmicos em uma área relativamente pequena (de poucos km²), a Ilha da Trindade oferece uma oportunidade única para compreender os mecanismos e interações dos processos que moldam a paisagem em regiões tropicais e montanhosas, em analogia com um laboratório natural. Assim como um laboratório permite o estudo controlado e detalhado de fenômenos de interesse, a Ilha da Trindade oferece condições excepcionais para investigar os processos geodinâmicos em uma escala de detalhe com características diversificadas. A exposição e a heterogeneidade dos processos na ilha fornecem um cenário ideal para analisar e compreender a evolução da paisagem em regiões análogas, como outras áreas tropicais e montanhosas. Dessa forma, a ilha se torna um ponto de referência valioso para estudos comparativos em relação aos processos geodinâmicos em diferentes contextos geológicos e geográficos. Além disso, as técnicas empregadas neste estudo podem ser aplicadas em regiões remotas ou de difícil acesso, caracterizadas por relevo acidentado que representa um desafio para o deslocamento.

A presente tese oferece dados inéditos e fundamentais da área ocupada na Ilha da Trindade, possibilitando estudos detalhados de suscetibilidade, vulnerabilidade e mecanismos desencadeadores. Os resultados obtidos revelam que o processo de retirada, degradação e transporte dos materiais é conduzido por dois agentes principais: a água da chuva e a gravidade, que culminam na deposição dos materiais até as praias, coincidindo com a área ocupada. Além disso, a pesquisa fornece evidências suficientes que comprovam que a região está exposta a processos que podem resultar em perdas de vidas, especialmente se ocorrerem episódios, tal como avalanche de rochas, durante a noite, quando toda a ocupação se encontra nos alojamentos, que coincidem com a direção do fluxo. Diante disso, destaca-se a urgência de tomar medidas por parte das autoridades, incluindo a implementação imediata de um programa de monitoramento de riscos geológicos.

REFERÊNCIAS

- Abdalla, A., Mustafa M. 2021. Horizontal displacement of control points using GNSS differential positioning and network adjustment, *Measurement*, 174:108965. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.108965>
- Aguilar F.J., Agüera F., Aguilar M.A., Carvajal, F. 2005. Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on grid DEM accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, (7):805-816. <https://doi.org/10.14358/pers.71.7.805>
- Almeida, F.F.M. 1961. Geologia e petrologia da ilha de Trindade. Dissertação (18), Departamento Nacional de Produção Mineral, Rio de Janeiro.
- Almeida, F.F.M. 2002, Ilha de Trindade: Registro de vulcanismo cenozoico no Atlântico Sul, C. Schobbenhaus, DA Campos, ET Queiroz, Winge M, 369–377.
- Almeida, F.F.M. 2006. Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica. *Terræ Didat.* 2 (1), 3e18.
- Angulo R.J., Souza M.C., Barboza E.G., Rosa M.L.C.C., Guedes C.C.F., Oliveira L.H.S., Manzolli R.P., Disaró S.T., Junior A.L.F., Martin C.M., Santos F.A., Garcia M.H. 2017. Quaternário e paleoníveis marinhos na Ilha da Trindade In: Protrindade: programa de pesquisas científicas na Ilha da Trindade. 10 anos de pesquisas. Secretaria da Comissão Interministerial de Recursos do Mar, Brasília, 200 p.
- Angulo, R.J.; Souza, Mc.; Barboza, E.G.; Rosa, M.L.C.C.; Fernandes, L.A.; Guedes, C.C.F.; Oliveira, L.H.S.; Manzolli, R.P; Disaró. S.T.; Ferreira, A.G.; Martin, C.M. 2018 Quaternary sealevel changes and coastal evolution of the Island of Trindade, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 84, 208-222.
- Arosio, D., Longoni, L., Papini, M., Bièvre, G., Zanzi, L. 2019. Geological and geophysical investigations to analyse a lateral spreading phenomenon: the case study of Torrioni di Rialba, northern Italy. *Landslides*, 16(7), 1257-1271.
- Aryes, Q.C. 1936. *Soil Erosion and its control*. 1. ed. New York, London: McGraw-Hill. 365 p.
- Alves, R.J.V. 1998. Ilha da Trindade e Arquipélago Martim Vaz: um ensaio geobotânico. Rio de Janeiro, Serviço de Documentação da Marinha, 144p.
- Aubaud, C., Athanase, J.E., Clouard, V., Barras, A.V., Sedan, O., 2013. A review of historical landslides, floods, and lahars in the Prêcheur river catchment, Montagne Pel'ee Volcano (Martinique, Lesser Antilles). *Bull. Soc. Geol. Fr.* 184 (1–2), 137–154. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.184.1-2.137>
- Avelar, A.S., Coelho, A.L.N., Lacerda, W.L., Becker, L.B., Mendonça, M.B. 2011. Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. *Procs., 2nd World Landslides Forum, Rome*.
- Bandis, S.C., Sharp, J.C., Mackean, R.A., Bacasis, E.A. 2011. Explicit characterisation and interactive analysis for engineering design of rock caverns. In: *Proceedings of the Joint Hong Kong Institute of Engineers—Hong Kong Institute of Planning Conference on Planning and Development of Underground Space*. Hong Kong Institute of Engineers and Hong Kong Institute of Planners, pp 133–142.
- Barão, L. M., Trzaskos, B., Angulo, R. J., de Souza, M. C., Daufenbach, H. F., Santos, F. A., Vasconcellos, E. M. G., 2020. Deformational structures developed in volcanic sequences

- as a product of tectonic adjustments in the South Atlantic Ocean. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102812. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102812>.
- Barth, O. M.; Alvarez, C. E. 2012. Rudolf Barth: um cientista pioneiro na Ilha da Trindade. *História, Ciências, Saúde-Manguinhos (Impresso)*, 19: 969-992.
- Bates, R. L., Jackson, J. A. 1980. *Glossary of Geology*: Falls Church Virginia, American Geological Institute, 167.
- Bates, R.L, Jackson, J.A.J. 1984. *Glossary of Geology*. (3 ed.). American Geological Institute. Alexandria, EUA.
- Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley, New York.
- Bird, E., 2008. *Coastal Geomorphology: An Introduction* 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK.
- Blakie, P., Cannon, T., Davis, I., Wisner, B. 1994. *At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*. New York, Routledge.
- Brasil. 2018. Decreto nº 9.312, de 19 de março de 2018. Criação da área de proteção ambiental do Arquipélago de Trindade e Martim Vaz e o Monumento Natural das ilhas de Trindade e Martim Vaz e do Monte Columbia. *Diário Oficial da União, Seção 1, nº54, ano CLV, 20 de março de 2018*.
- Brasington J., Langham J., Rumsby B. 2003. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology*, 53(3-4):299-316. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00320-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00320-3)
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. 2021a. Earth Science, Geologic Time and Fossils. *Earth Sciences: Erosion*. <https://www.britannica.com/science/erosion-geology> (acesso em 10 Fevereiro de 2022).
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. 2021b. Earth Science, Geologic Time and Fossils. *Earth Sciences: Mass movements*. <https://www.britannica.com/science/mass-movement> (acesso em 11 dezembro de 2021).
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. 2022. Earth Science, Geologic Time and Fossils. *Earth Sciences: environment*. *Encyclopedia Britannica*, 23 Dec. 2022, <https://www.britannica.com/science/environment> (acesso em 25 de Janeiro de 2023).
- Bobrowsky, P. and Couture, R., 2014. *Landslide Terminology – Canadian Technical Guidelines and Best Practices related to Landslides: a national initiative for loss reduction*; Geological Survey of Canada, Open File 7623, 68 p. doi:10.4095/293940
- Brus D.J., Kempen B., Heuvelink G.B.M. 2011. Sampling for validation of digital soil maps. *European Journal of Soil Science*, 62(3):394-407. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01364.x>
- Burton, I., Kates, R.W. 1964. The perception of natural hazards in Resource Management. *Natural Resources Journal*, v. III, n.3, p. 412-441.
- Cavalcanti, I.F.A., Ferreira, N.J., da Silva, M.G.A.J., Dias, M.A.F. 2009. *Tempo e Clima no Brasil*. Oficina de Textos, São Paulo
- Chaudhry M.H., Ahmad A., Gulzar Q., Farid M.S., Shahabi H., Al-Ansari N. 2021. Assessment of DSM based on radiometric transformation of UAV data. *Sensors*, 21(5):1649. <https://doi.org/10.3390/s21051649>
- Childs C. 2004. Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst. *ArcUser*, 3235(569):32-35.

- Conforti, M., Aucelli, P. P., Robustelli, G., Scarciglia, F. 2010. Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy), *Natural hazards*, 56: 881-898.
- Cordani, U.G. 1970. Idade do vulcanismo no Oceano Atlântico Sul. *Bol. IGA* 1, 9e75.
- Cruden, D.M., Varnes, D. J. 1996. Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides investigation and mitigation*. Transportation research board, US. National Research Council. Special Report 247, Washington, DC, Chapter 3, pp. 36–75.
- Crozier, M.J. 2005. Multiple-occurrence regional landslide events in New Zealand. *Hazard management issues. Landslides*. 2: 247–256.
- Cruden, D.M., Antoine, P. 1984. The slide from Mt. Granier, Isère and Savoie, France on Nov. 24, 1248. In: *Proc. 4th. International Symposium on Landslides*, Toronto, vol. 1, pp. 475–481.
- CSA-Canadian Standards Association. 1997. Risk management: guideline for decision-makers. A national standard of Canada. Canadian Standards Association, CAN/CSA-Q850-97.
- da Silva, N.G., Alves, R.J.V. 2017. Plantas vasculares terrestres da Ilha da Trindade, In: *Protrindade: programa de pesquisas científicas na Ilha da Trindade 10 anos de pesquisas*, Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar -SECIRM, Brasília, pp 195-198.
- Darwin, C. 1839. *Journal of Researches into the Geology and Natural History on the Various Countries Visited by H.M.S. Beagle*. Henry Colburn, London, pp. 615 Under the Command of Captain Fitzroy, R.N. from 1832 to 1836.
- Dearman, W. R., Matula, M. 1976. Environmental aspects of engineering geological mapping. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 13(1), 141–146.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. 1944. DNER-ME093-94: Densidade Real, p. 01/04.
- Desta, L, Adugna, B. 2012. A field guide on gully prevention and control. Nile Basin Initiative, Eastern Nile Subsidiary Action Program (ENSAP), Eastern Nile Technical Regional Office (ENTRO), Eastern Nile Watershed Management Project, Addis Ababa.
- DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2011. Imagem aérea Escala 1:10.000.
- Donnelly, L. J., Culshaw, M. G., Hobbs, P. R. N., Flint, R. C., Jackson, P. D. 2005. Engineering geological and geophysical investigations of a slope failure at Edinburgh Castle, Scotland. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(2), 119-137. <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0260-7>
- Doyle, P. 2005. Environmental Geology, In: Richard C. Selley, L. Robin M. Cocks, Ian R. Plimer, *Encyclopedia of Geology*, Elsevier, 25-33. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369396-9/00204-5>.
- Doyle, P. 2021 Environmental Geology. In: David Alderton, Scott A. Elias, *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*, Academic Press, 660-668. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12455-8>
- Draut, A., Bothner, M., Field, M., Reynolds, R., Cochran, S., Logan, J., Storlazzi, C., Berg, C., 2009. Supply and dispersal of flood sediment from a steep, tropical watershed: Hanalei bay, kaula'i, Hawai'i, USA. *Geol. Soc. Am. Bull.* 121 (3–4), 574–585.

- Esdac - Joint Research Centre European Soil Data Centre. 2021. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/landslides> (Acesso em 11 de dezembro de 2021).
- Ellison, W. D. 1947. Soils erosion studies Part 1. Agricultural Engineering. V.28, n 04.145 – 146 p.
- Fang, H. Y., Daniels, J. L. 2016. Introductory geotechnical engineering-An environmental perspective. London: Editora Taylor and Francis.
- Fernandes, A. L., Cruz, J. V., Figueira, C., Prada, S. 2020. Groundwater chemistry in Madeira Island (Portugal): main processes and contribution to the hydrogeological conceptual model. Environmental Earth Sciences. 79(18), 1-19
- Ferrari A.L., Riccomini C., 1999. Campo de esforços plio-pleistocênico na Ilha de Trindade (Oceano Atlântico Sul, Brasil) e sua relação com a tectônica regional. Rev. Bras. Geoc., 29:195-202.
- Ferrier, K.L., Huppert, K.L., Perron, J.T., 2013. Climatic control of bedrock river incision. Nature 496 (7444), 206–209.
- Figueiredo, C. A., Bongioiolo, E. M., Jutzeler, M., Gomes, O. D. F. M., Neumann, R. 2022. Alkalic pyroclast morphology informs on fragmentation mechanisms, Trindade Island, Brazil. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 428, 107575. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107575>
- Fisher, R V. 1961. Proposed classification of volcanoclastic sediments and rocks. Geological Society of America Bulletin, Vol. 72, 1409–1414.
- Fisher, R. V., Smith, G. A. 1991. Volcanism, tectonics and sedimentation, 1–5 in Sedimentation in volcanic settings. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication, 45.
- Fookes PG, Baynes FJ, Hutchinson JN (2000) Total geological history: a model approach to the anticipation, observation and understanding of site conditions. In: Proceedings of the international conference on geotechnical and geological engineering, Melbourne, Australia, vol 1. Technomic Publishing Co, Lancaster, PA, pp 370–460.
- Fookes PG, Lee EM, Griffiths JS. 2007. Engineering geomorphology, theory and practice. Whittles Publishing, Scotland
- Forte, G., Verrucci, L., Di Giulio, A., De Falco, M., Tommasi, P., Lanzo, G., Franke, K. W., Santo, A. 2021. Analysis of major rock slides that occurred during the 2016–2017 Central Italy seismic sequence. Engineering Geology, 290, 106194. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106194>
- Ganas, A., Briole, P., Papathanassiou, G., Bozionelos, G., Avallone, A., Melgar, D., Argyrakis, P., Valkaniotis, S., Mendonidis, E., Moshou, A., Elias, P. 2015. A preliminary report on the Nov 17, 2015 M = 6.4 South Lefkada earthquake, Ionian Sea, Greece, technical report. http://www.earthquakegeology.com/materials/reports/Lefkada_17_Nov_2015-Earthquake_Report.pdf (acesso em 17 de dezembro de 2021).
- Gares, P.A., Sherman, D.J., Nordstrom, K.F. 1994. Geomorphology and natural hazards, Geomorphology, 10: 1-18.
- Gaspar, J.L., Querioz, G., Ferreira, T., Amaral, P., Viveiros, F., Marques, R., Silva, C., Wallenstein, N. 2011. Geological Hazards and Monitoring at the Azores (Portugal). IEEE Earthzine, Azores.

- Geological British Society Engineering Group. 1972. The preparation of maps and plans in terms of engineering geology. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. London, v.5, 5(4), 293–382.
- Gerath, R.F., Hungr, O. 1993. Landslide terrain, Scatter River valley, north-eastern British Columbia. *Geoscience Canada* 10:30–32
- Griggs, G.B., Trenhaile, A.S., 1994. Coastal cliffs and platforms. *Coastal Evolution. Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. 425–450.
- Guadagno, F.M., Forte, R., Revellino, P., Fiorillo, F., Focareta, M. 2005. Some aspects of the initiation of debris avalanches in the Campania Region: the role of morphological slope discontinuities and the development of failure. *Geomorphology* 66:237–254.
- Guazelli, W., Carvalho, J.C. 1978. A extensão da zona de fratura de Vitória-Trindade no oceano e seu possível prolongamento no continente. Aspectos estruturais da margem continental leste e sudeste do Brasil. Rio de Janeiro. Petrobras. p. 31-37. (Série Projeto Remac n. 4).
- Guzzetti, F. M., Cardinali, P., Reichenbach, A., Carrara, A. 2000. Carrara Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber River Basin, Central Italy. *Environmental Management*, 25 (3): 247-363.
- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K.T., 2012. Landslide inventory maps: new tools for an old problem. *Earth Sci. Rev.* 112, 42–66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Hansen, M.A.F., Viramonte, J.G., Troian, F.L., Mizusaki, A.M.P., Becchio, R., Fensterseifer, H.C. 1998. Nuevas edades para el volcanismo de las islas Trindade y Martin Vaz, Brasil. Sixth International Meeting: Colima Volcano, México. vol. 26, pp. 1–28.
- Hansen, A. 1984a. Engineering geomorphology: the application of an evolutionary model of Hong Kong. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51: 39-50.
- Hansen, A. 1984b. Strategies for classification of landslides. In: Brunsden, D.B. Prior (Eds.), *Slope Instability*. Wiley, New York, pp. 523-602.
- Henry N. Stevens, Lewis Evans. 1920. His Map of the Middle British Colonies in America; a comparative account of eighteen different editions published between 1755 and 1814 (2nd ed. 1920).
- Hewitt, K. 1997. *Regions of risk: geographical Introduction to disasters*. Longman, Themes in Resource Management Series.
- Hoek, E., Bray, J. 1981. *Rock slope engineering*, 3rd ed. Inst. Mining and Metallurgy, London.
- Holcomb, R., Searle, R., 1991. Large landslides from oceanic volcanoes. *Mar. Georesour. Geotechnol.* 10 (1–2), 19–32.
- Hungr, O, Evans, S.G. 2004. The occurrence and classification of massive rock slope failure. *Felsbau*, Vienna, Austria 22:16–23.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Hutchinson, J.N. 1988. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, 1:3–35.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 1986. Orientações para o combate à erosão no Estado de S. Paulo, Bacia do Peixe - Paranapanema. São Paulo, 1986. 6 v. (IPT. Relatório, 24739).

Izquierdo, T. 2014. Conceptual hydrogeological model and aquifer system classification of a small volcanic island (La Gomera; Canary Islands). *Catena* 114, 119–128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.11.006>.

Jakob, M. 2000. The impacts of logging on landslide activity at Clayoquot Sound, British Columbia. *Catena*: 38:279–300.

Jarraud, M. 2008. Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8). World Meteorological Organisation: Geneva, Switzerland, 29.

Kte'pi, B. 2022. environmental science. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/environmental-science> (acessado em 25 de janeiro de 2023)

Kessler H, Mathers S, Sobisch HG. 2009. The capture and dissemination of integrated 3D geospatial knowledge at the British Geological Survey using GSI3D software and methodology. *Comput Geosci* 35(6):1311–1321.

Knödel, K., Lange, G., Voigt, H. J. 2007. Environmental geology: handbook of field methods and case studies. Springer Science and Business Media.

Kouli, M., Loupasakis, C., Soupios, P., Vallianatos, F. 2010. Landslide hazard zonation in high risk areas of Rethymno Prefecture, Crete Island, Greece. *Natural hazards*, 52(3), 599-621.

J. Kropacek, C. Schillaci, R. Salvini, M. Marker. 2016. Assessment of gully erosion in the Upper Awash, Central Ethiopian highlands based on a comparison of archived aerial photographs and very high resolution satellite images. *Geogr. Fis. Din. Quat.*, 39, 161-170.

Lachassagne, P., Aunay, B., Frissant, N., Guilbert, M., Malard, A. 2014. High-resolution conceptual hydrogeological model of complex basaltic volcanic islands: a Mayotte, Comoros, case study. *Terra Nova*, 26(4), 307-321. 10.1111/ter.12102.

Larsen M.C., Wieczorek G.F. 2006. Geomorphic effects of large debris flows and flash floods, northern Venezuela, 1999. *Z. Geomorph. N.F. suppl.-vol.* 145:147–175. Stuttgart, Berlin

Leinz, V., Amaral, S.E. 1989. *Geologia Geral*. 11ª ed. São Paulo: Editora Nacional, 399p.

Lewis, S.L. Maslin, M.A. 2015. Defining the Anthropocene. *Nature*. 519: 171-180. Doi: 10.1038/nature14258.

Lobo, B., 1919. Conferência sobre a ilha da Trindade. *Arquivos do Museu Nacional*, V 22: 105-169 p

López-Saavedra, M., & Martí, J. 2022. Reviewing the multi-hazard concept. Application to volcanic islands. *Earth-Science Reviews*, 104286. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104286>

Lupia-palmieri, E. 2004. Erosion. In: Goudie, A.S. (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology* (Volume 1), Psychology Press, London and New York.

Luz, F.R., 2019. Análise estratigráfica dos depósitos vulcânicos da Formação Morro Vermelho, Ilha da Trindade, Brasil. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- Leroueil, S., Locat, J., Vaunat, J., Picarelli, L., Lee, H., Faure, R. 1996. Geotechnical characterization of slope movements. In: Senneset K (ed) Landslides. Balkema, Rotterdam 1:53–74.
- Madonia, P., Liotta, M. 2010. Chemical composition of precipitation at Mt. Vesuvius and Vulcano Island, Italy: volcanological and environmental implications. *Environmental Earth Sciences*, 61(1), 159-171.
- Marinha, do Brasil. 2014. Comando do 1º Distrito Naval. Disponível em: <https://www1.mar.mil.br/com1dn> (acesso em 07 de julho de 2018).
- Marinha, do Brasil, 2021. Amazônia Azul. <https://www.marinha.mil.br/secirm/amazoniaazul> (acesso em 3 de fevereiro de 2021).
- Marinos, V., Proutzopoulos, G., Asteriou, P., Papathanassiou, G., Kaklis, T., Pantazis, G., Lambrou, E., Grendas, N., Pavlides, S. 2017. Beyond the boundaries of feasible engineering geological solutions: stability considerations of the spectacular Red Beach cliffs on Santorini Island, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 76(15), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6823-2>
- Mateus, A. C. C., Varajão, A. F. D. C., Petit, S., Oliveira, F. S., Schaefer, C. E. G. R. 2020. Mineralogical and geochemical signatures of Quaternary pyroclasts alterations at the volcanic Trindade Island, South Atlantic. *Journal of South American Earth Sciences*, 102, 102674.
- Mather, K. F., Mason, S. L. 2013. A source book in geology, 1400–1900. Harvard University Press. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674180666>
- Martino, S., Cercato, M., Della Seta, M., Esposito, C., Hailemichael, S., Iannucci, R., Martini, A., Paciello, A., Scarascia Mugnozza, G., Seneca, D., Troiani, F. 2020. Relevance of rock slope deformations in local seismic response and microzonation: Insights from the Accumoli case-study (central Apennines, Italy). *Engineering Geology*. 266, 105427. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105427>.
- Martins, G. S. L., Rodrigues, E. M., Costa, M. D., da Rocha Campos, A. N., Tótola, M. R. 2021. A not so cool Harlley's legacy: The catastrophic human-made Trindade Island devastation and its recovery. *Applied Soil Ecology*, 167, 104105. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104105>
- McCalpin, J. 1984. Preliminary age classification of landslides for inventory mapping. *Proceedings 21st annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium*, University Press, Moscow, Idaho, pp. 99-111.
- Mayer, E.M. 1957. Trindade, ilha misteriosa dos trópicos. Livraria Tupã Editora, Rio de Janeiro, 159 p.
- Menard, H. W., Ladd, H. S. 1963. 15. Oceanic islands, seamounts, guyots and atolls. *The Sea, Ideas and Observation on Progress in the Study of the Seas*, 3, 365.
- Mitchell, N.C., 2003. Susceptibility of mid-ocean ridge volcanic islands and seamounts to large-scale landsliding. *J. Geophys. Res* 108, 2397.
- Mondini, A.C, Guzzetti, F., Reichenbach, P., Rossi, M., Cardinali, M., Ardizzone, F. 2011. Semi-automatic recognition and mapping of rainfall induced shallow landslides using satellite optical images. *Remote Sensing of Environment*. 115: 1743-1757.
- Morgan, R.P.C. 1995. Soil erosion and its control, 2nd edn. Longman, New York, 320 p.

- Morgenstern, N. R., Cruden, D. M. 1977. Description and classification of geotechnical complexities. In: Proceedings of the international symposium on the geotechnics of structurally complex formations. Vol. 2, pp. 195-204.
- Morgenstern, N.R. 1992. The evaluation of slope stability: a 25 year perspective. In: Seed RB, Boulanger RW (eds) Stability and performance of slopes and embankments, ASCE Geotechnical Special Publication 31, 1:1–26
- Mossman, D.J., Gauthier-Lafaye, F., Dutkiewicz, A., Bruning, R. 2008. Carbonaceous substances in Oklo reactors—analogue for permanent deep geologic disposal of anthropogenic nuclear waste. *Rev Eng Geol* 19:1–13.
- Nadalin, R.J., Besser, M. L., Salamuni, E., Hindi, C. E., Santos, F.A., Nadalin, L.F., Monastier, M.S., de Souza, M.C. 2018. Guia geológico de campo. 1. ed. Curitiba: UFPR, Departamento de Geologia.
- Nichol, S, Hungr, O. 2002. Brittle and ductile toppling of large rock slopes. *Canadian Geotech J.* 39:1–16.
- Oh, H. J., Lee, S. 2011. Landslide susceptibility mapping on Panaon Island, Philippines using a geographic information system. *Environmental Earth Sciences*, 62(5), 935-951.
- OPENAI, 2023. O significado de “camadas frágeis” no estudo geotécnico. 1 conversa no ChatGPT. Disponível em: <https://chat.openai.com/>. Acesso em: 18 de maio de 2023.
- Pánek, T., Břežný, M., Kapustová, V., Lenart, J., Chalupa, V. 2019. Large landslides and deep-seated gravitational slope deformations in the Czech Flysch Carpathians: New LiDAR-based inventory. *Geomorphology*, 346: 106852.
- Parry, S., Baynes, F. J., Culshaw, M. G., Eggers, M., Keaton, J. F., Lentfer, K., ... Paul, D. 2014. Engineering geological models: an introduction: IAEG commission 25. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 73(3), 689-706.
- Parsons, A. J., Wainwright, J., Mark Powell, D., Kaduk, J., Brazier, R. E. 2004. A conceptual model for determining soil erosion by water. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 29(10), 1293-1302.
- Pašek, J. 1975. Landslide inventory International Association Engineering Geologist Bulletin, 12: 73-74.
- Patel, A. 2012. Mountain erosion and mitigation: global state of art. *Environmental Earth Sciences*, 66(6), 1631-1639. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1524-3>
- Pedroso, D, Panisset, J.S., Abdo, L.B.B. 2017. Climatologia da Ilha da Trindade. In: Protrindade: programa de pesquisas científicas na Ilha da Trindade 10 anos de pesquisas, Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar -SECIRM, Brasília, pp 27-34
- Pelletier, J.D., Kolb, K.J., McEwen, A.S., Kirk, R.L. 2008. Recent bright gully deposits on Mars: wet or dry flow?. *Geology*, 36, 211-214. <https://doi.org/10.1130/G24346A.1>
- Pettijohn, F. J. 1975. Sedimentary rocks (Vol. 3). New York: Harper & Row.
- Pérez-Rey, I., Muñiz-Menéndez, M., González, J., Vagnon, F., Walton, G., Alejano, L. R. 2021. Laboratory physical modelling of block toppling instability by means of tilt tests. *Engineering Geology*, 282, 105994.
- Pezzi, R.M.S. 2018. Caracterização geológica e geotécnica dos solos da região da praia da calheta, Ilha da Trindade- Brasil. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Paraná.

- Pires, G.L.C., Bongiolo, E.M., Geraldés, M.C., Renac, C., Santos, A.C., Jourdan, F., Neumann, R., 2016a. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and revised $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}^*$ data from nephelinitic–phonolitic volcanic successions of the Trindade Island (South Atlantic Ocean). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 327, 531–538.
- Pires, G.L.C., Bongiolo, E.M. 2016b. Journal of South American Earth Sciences the nephelinitic e phonolitic volcanism of the Trindade Island (South Atlantic Ocean): review of the stratigraphy, and inferences on the volcanic styles and sources of nephelinites. *J. South Am. Earth Sci.* 72, 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.07.008>
- Pomerol, C., Lagabrielle, Y., Renard, M., & Guillot, S. 2013. *Princípios de geologia: técnicas, modelos e teorias*. Bookman.
- Prada, S., Figueira, C., Aguiar, N., Cruz, J. V. 2015. Stable isotopes in rain and cloud water in Madeira: contribution for the hydrogeologic framework of a volcanic island. *Environmental Earth Sciences*, 73(6), 2733-2747.
- Prada, S., Cruz, J.V., Figueira, C. 2016. Using stable isotopes to characterize groundwater recharge sources in the volcanic Island of Madeira, Portugal. *J Hydrol.* 536: 409–425.
- Price, D. G. 1993. A suggested method for the classification of rock mass weathering by a rating system. *Q J Eng Geol* 26:69–76.
- Price, D. G. 2009. *Engineering geology: principles and practice*. Springer Science & Business Media.
- Pudasain, S.P., Krautblatter, M. 2021. The mechanics of landslide mobility with erosion. *Nature Communications*, 12:6793. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26959-5>
- Rotta, C. M. S. dos, Zuquette, L. V. 2013. Erosion feature reclamation in urban areas: typical unsuccessful examples from Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 72(2), 535-555. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2974-y>
- Rotta, C. M. S.; Zuquette, V. L. 2015. Processos erosivos. In: Zuquette, L. V. *Geotecnia Ambiental*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier. 115-152p.
- Ryabinin, V., Barbière, J., Haugan, P., Kullenberg, G., Smith, N., McLean, C., Trois, A., Fischer, A., Aricò, S., Aarup, P., Pissierssens, P., Visbeck, M., Enevoldsen, H.O., Rigaud, J. 2019. The UN decade of ocean science for sustainable development. *Frontiers in Marine Science*, 6, 470.
- Ramalho, R. S., Quartau, R., Trenhaile, A. S., Mitchell, N. C., Woodroffe, C. D., Ávila, S. P. 2013. Coastal evolution on volcanic oceanic islands: A complex interplay between volcanism, erosion, sedimentation, sea-level change and biogenic production. *Earth-Science Reviews*, 127, 140-170.
- Reyment, R. A. 1939. William Smith (1769–1839), the Father of English Geology. *Nature*. 144 (1939): 354-355. <https://doi.org/10.1038/144354a0>.
- Rogers, J. D. 2021. Engineering Geology. In: David Alderton, Scott A. Elias, *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*, Academic Press, 342-362. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00140-5>.
- Rossi, M., Sarro, R., Reichenbach, P., Mateos, R. M. 2021. Probabilistic identification of rockfall source areas at regional scale in El Hierro (Canary Islands, Spain). *Geomorphology*, 381, 107661.

- Rotta, C. M. S. 2012 Estudo da recuperação de áreas degradadas por processos erosivos: procedimentos e eficiência dos métodos. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.18.2012.tde-17062013-162539>
- Rotta, C. M. S.; Zuquette, V. L. 2015. Processos erosivos. In: Zuquette, L. V (Org.). Geotecnia Ambiental. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier. 115-152p.
- Santos, F.A., de Souza, M.C. 2018. Mapeamento aplicado a determinação de áreas de riscos geológicos. In: Nadalin, R.J., Besser, M. L., Salamuni, E., Hindi, C. E., Santos, F.A., Nadalin, L.F., Monastier, M.S., de Souza, M.C. Guia geológico de campo. 1. ed. Curitiba: UFPR, Departamento de Geologia.
- Santos, F.A. 2018. Inventário dos processos erosivos e movimentos de massa gravitacionais das bacias hidrográficas Desejado, Cabritada, Almirante e Morro Vermelho da Ilha da Trindade – Brasil. Dissertação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Santos, F. A., Souza, M. C. D., Zuquette, L. V., Angulo, R. J., Rosa, M. L. C. D. C., Talamini, A. A., Figueiredo, C. A. 2022. Inventory of natural processes with nautical charts, real-time kinematic global navigation satellite systems (RTK-GNSS), and unmanned aerial vehicle (UAV), Trindade Island, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 52. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202220220007>
- Sarsby, R. W. 2000. Environmental geotechnics. London: Thomas Telford Ltda.
- Saroglou, H., Marinos, V., Marinos, P., Tsiambaos, G. 2012. Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(6), 1823-1836.
- Schmidt, B. L., Schumm, S. A., & Harvey, M. D. 1982. Natural Erosion in the USA. ASA Special Publication.
- Sharma, H. D., Reddy, K. R. 2004. Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc.
- Scheidegger, A.E. 1994. Hazards: singularities in geomorphic systems. *Geomorphology*, 10: 19-28 p.
- Shinbrot, T., Duong, N.H., Kwan, L., Alvarez, M.M. 2004. Dry granular flows can resemble some Martian geological features attributed to liquid flow. *National Academy of Sciences Proceedings*. 101, 8542-8546.
- Singh, Y. K. 2006. Environmental science. New Age International, 310 p.
- Stapledon, D. H. 1982. Subsurface engineering—in search of a rational approach. *Aust Geomech News*, 4, 26-33.
- Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union* 38 (6), 913–920.
- Streckeisen, A. L. 1967. Classification and nomenclature of igneous rocks. *N. Jb. Miner.*, 107, 144-240.
- Sullivan, T.D. 2010. The geological model. In: Williams, A.L., Pinches, G.M., Chin, C.Y., McMorran, T.J., Massey CI (eds) *Geologically Zealand conference on geomechanics*, Hobart, vol 1, Institution of Engineers Australia, pp 227–234
- Syvitski, J., Waters, C.N., Day, J., Milliman, J.D., Summerhayes, C., Steffen, W., Zalasiewicz, J., Cearreta, A., Gałuszka, A., Hajdas, I., Head, M.J., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Poirier, C., Rose, N.L., Shotyk, W., Wagreich, M., Williams, M. 2020. Extraordinary

human energy consumption and resultant geological impacts beginning around 1950 CE initiated the proposed Anthropocene Epoch. *Communications Earth & Environment*. 1:32. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00029-y>.

Tominaga, L., Rossini-Penteado, D., Ferreira, C., Vedovello, R., Armani, G. 2008. Avaliação do perigo de escorregamentos por meio da análise de múltiplos fatores geoambientais. In: Congresso Brasileiro De Geologia De Engenharia E Ambiental. Vol. 12.

Tragsa, Tragsatec, Ministerio De Medio Ambiente. 1998. Forestry hydrological basins and erosion control. Editora Mundi Prensa, Madrid, p 945.

Trenhaile, A.S., 2011. Cliffs and rock coasts. In: Wolanski, E., McLusky, D. (Eds.), *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, vol. 3. Academic Press, Waltham, pp. 171–191.

Tsangaratos, P., Loupasakis, C., Nikolakopoulos, K. et al. 2018. Developing a landslide susceptibility map based on remote sensing, fuzzy logic and expert knowledge of the Island of Lefkada, Greece. *Environ Earth Sci.* 77, 363. <https://doi.org/ez22.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12665-018-7548-6>

Tschirhart, P., Bloomfield, E. F., 2020. Framing the Anthropocene as influence or impact: The importance of interdisciplinary contributions to stratigraphic classification. *Environmental Communication*. 14(5), 698–711. <https://doi.org/10.1080/17524032.2020.1716033>.

Turconi, L., De, S. K., Demurtas, F., Demurtas, L., Pendugiu, B., Tropeano, D., Savio, G. 2013. An analysis of debris-flow events in the Sardinia Island (Thyrrhenian Sea, Italy). *Environmental earth sciences*, 69(5), 1509-1521. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1985-4>

Turner, A.K. 2005. Geological Engineering. In: Richard C. Selley, L. Robin M. Cocks, Ian R. Plimer, *Encyclopedia of Geology*, Elsevier, 35-43. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369396-9/00500-1>

UN-ISDR. 2015. Sendai framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. In: Third United Nations World Conference on Disaster Risk Reduction. Sendai, Miyagi, Japan.

UNDRO- United Nations Disaster Relief Organization. 1982. Natural disasters and vulnerability analysis. Geneva, Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator.

UNESP/IGCE. 1999. Material Didático: arquivos de transparências (CD). Rio Claro: Departamento de Geologia Aplicada, disponível em <http://www1.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/introducao/introd02.html> (acessado em 27 de janeiro de 2023).

van Westen, C.J., van Asch, T.W.J., Soeters, R. 2006. Landslide hazard and risk zonation — why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65: 167-184.

Vanacker, V., Bellin, N., Molina, A., & Kubik, P. W. 2014. Erosion regulation as a function of human disturbances to vegetation cover: a conceptual model. *Landscape ecology*, 29(2), 293-309. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9956-z>

Varnes D. J. 1974. The logic of geological maps, with reference to their interpretation and use for engineering purposes. United States Geological Survey, Washington. Professional Paper 837

Varnes, D.J. 1978. Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) *Landslides, analysis and control*, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC., pp. 11–33.

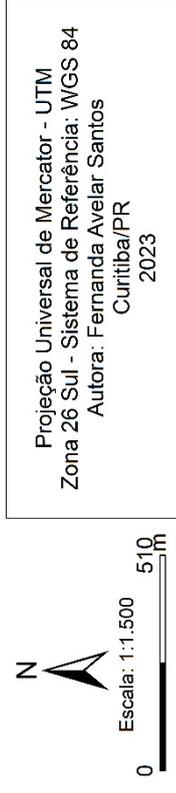
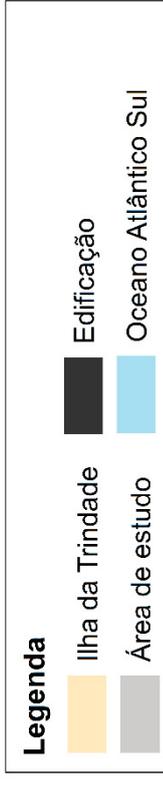
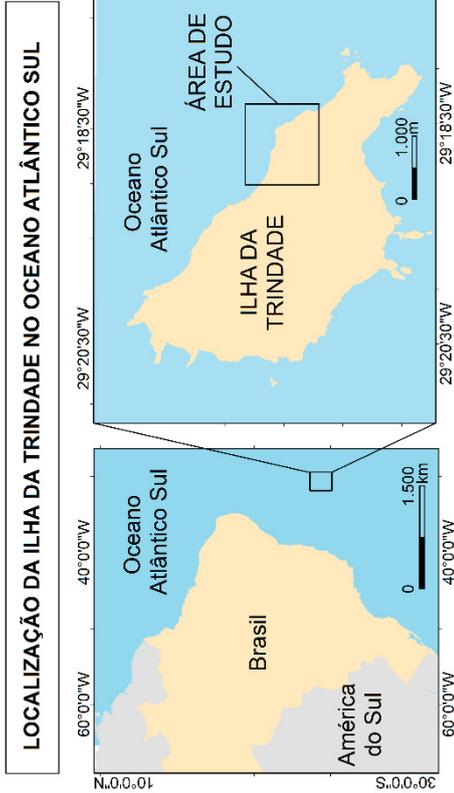
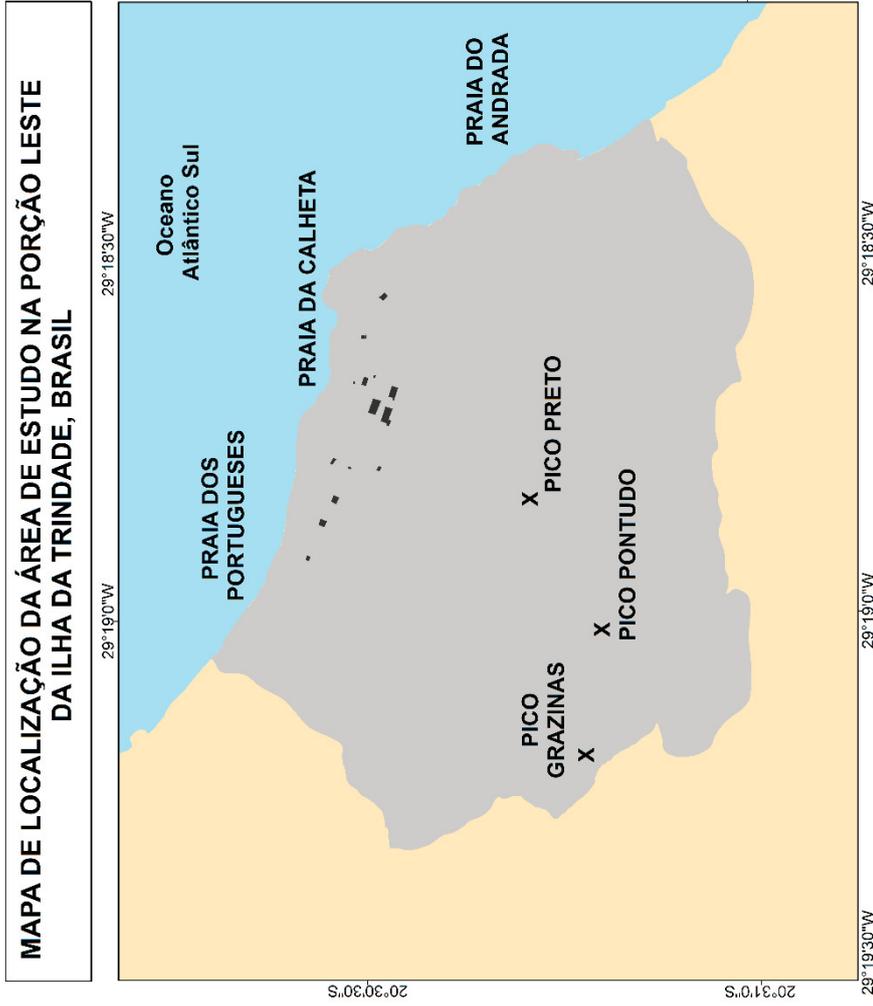
- Verheijen, F. G., Jones, R. J., Rickson, R. J., Smith, C. J. 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*. 94(1-4), 23-38.
- Walter, E., 2008. *Cambridge Advanced Learner's Dictionary*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Wentworth, C., 1927. Estimates of marine and fluvial erosion in Hawaii. *J. Geol.* 117–133.
- White, G.F. 1974. *Natural hazards, local, national, global*. O.U.P. 288 p.
- Wieczorek, G.F. 1984. Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 21 (3): 337-342.
- Winge, M., Santos, M. 2001. Glossário geológico ilustrado. Publicado na Internet. <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/> (acesso em 20 de dezembro de 2022).
- Wilkinson, B.H., 2005. Humans as geologic agents: a deep-time perspective. *Geology* 33 (3), 161–164. <https://doi.org/10.1130/G21108.1> .
- Yong, R. N., Mulligan, C. N., Fukue, M. 2014. *Sustainable practices in geoenvironmental engineering*. 2 Ed. Boca Raton, Taylor e Francis Group.
- Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Summerhayes, C.P., Wolfe, A.P., Barnosky, A.D., Cearreta, A., Crutzen, P., Ellis, E., Fairchild, I. J., Galuszka, A., Haff, P., Hajdas, I., Head, M.J., Ivar do Sul, J.A., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J. R., Neal, C., Odada, E., Oreskes, N., Steffen, W., Syvitski, J., Vidas, D., Wagnreich, M., Williams, M. 2017. The Working Group on the Anthropocene: Summary of evidence and interim recommendations. *Anthropocene*. 19, 55. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.09.001>
- Zalasiewicz, J., Waters, C. N., Ellis, E. C., Head, M. J., Vidas, D., Steffen, W., Thomas, J.A., Horn, E., Summerhayes, C.P., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Galuszka, A., Williams, M., Barnosky, A. D., Richter, D. de B., Gibbard, P. L., Syvitski, J., Jeandel. C. , Cearreta, A., Cundy, A. B., Fairchild, I. J., Rose, N. L. , Ivar do Sul, J. A., Shotyk, W., Turner, S., Wagnreich, M., Zinke, J., 2021. The Anthropocene: comparing its meaning in geology (chronostratigraphy) with conceptual approaches arising in other disciplines. *Earth's Future*. 9, 1-25. <https://doi.org/10.1029/2020EF001896>.
- Zaruba, Q, Mencl, V. 1969. *Landslides and their control*. Elsevier, New York, 238p.
- Zheng, Y., Chen, C., Liu, T., Zhang, H., Xia, K., Liu, F. 2018. Study on the mechanisms of flexural toppling failure in anti-inclined rock slopes using numerical and limit equilibrium models. *Engineering Geology*, 237, 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.02.006>.
- Zuquette, L.V., Pejon, O.J., Sinelli, O., Gandolfi, N. 1994. Map of potential risks to erosion: city of Franca (SP), scale 1:25,000 (Brazil). In: Ricaldi V et al (eds) *Investigaciones sobre los riesgos geológicos en ciudades de America Latina*. AGID Geoscience, Series No. 21, pp 25–38.
- Zuquette, L.V., Collares, J.Q.S, Pejon, O.J. 2003. Land degradation assessment based on environmental geoindicators in the Fortaleza metropolitan region, state of Ceara, Brazil. *Environ Geol* 45:408–425. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0892-0>
- Zuquette, L. V.; Gandolfi, N. 2004 *Cartografia geotécnica*. São Paulo: Oficina de Textos, 190 p.
- Zuquette, L. V. 2015. Aspectos conceituais e abrangências do tema. In: Zuquette (Org.), L. V. *Geotecnia Ambiental*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier. 1-12 p.
- Zuquette, L. V. 2018a. *Riscos, desastres e eventos perigosos: aspectos conceituais na análise e estimativa de riscos*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier.

Zuquette, L. V. 2018b. Riscos, desastres e eventos perigosos: fontes de eventos perigosos. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier.

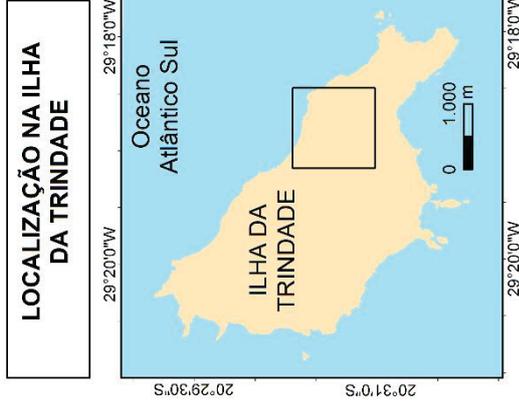
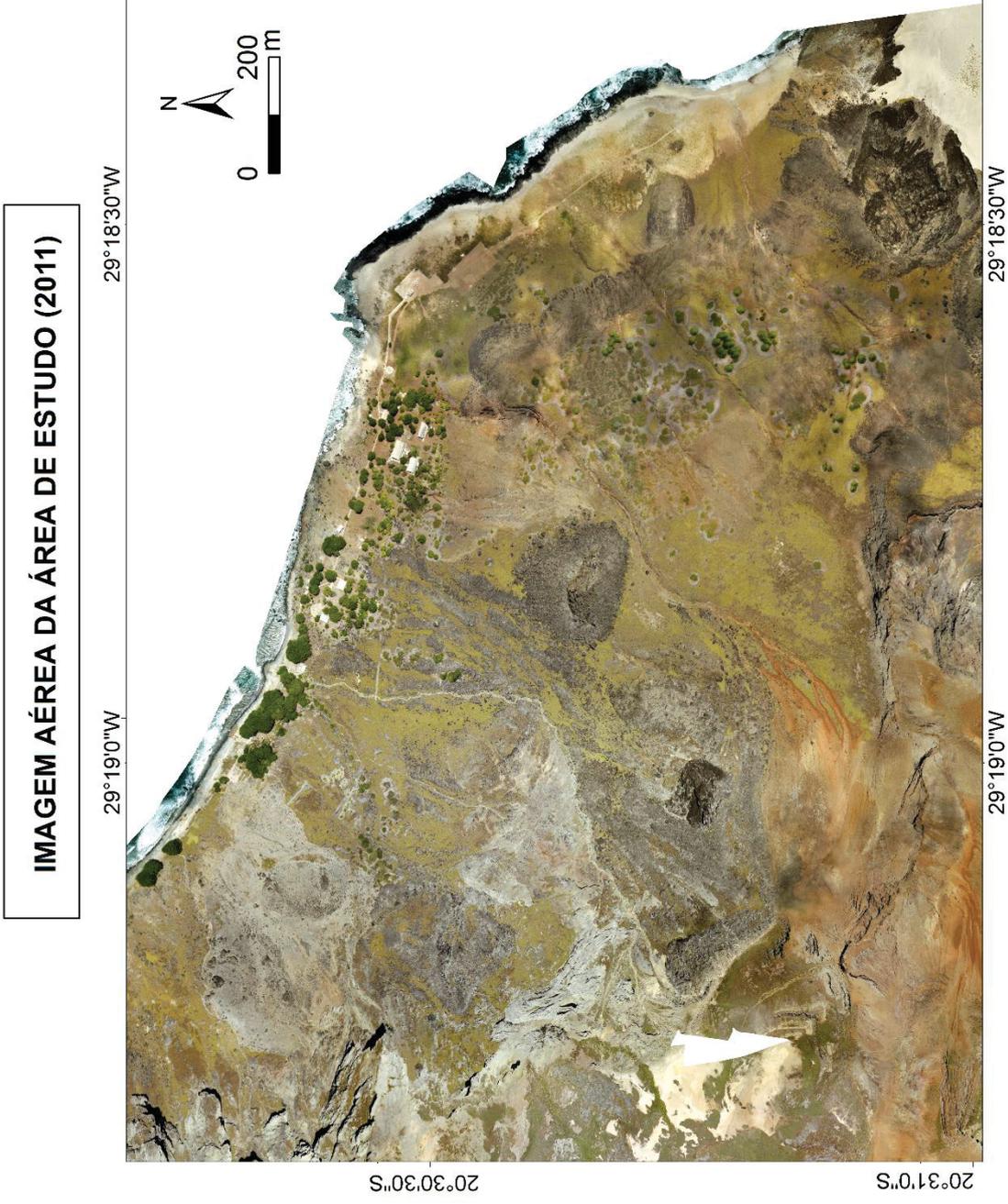
Wagner, W.L.; Herbest, D.R., Sohmer, S.H. 1991. Manual of the flowering plants of Havaí. Havaí, University of Havaí Press, 2, 1854p.

Yesiloglu-Gultekin, N., Gokceoglu, C., Sonmez, H. 2012. Geohazard reconnaissance mapping for a settlement area. *Environmental Earth Sciences*,66(6), 1653-1666. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0984-1>

ANEXO 1 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

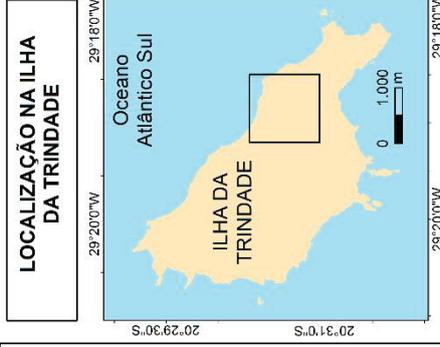
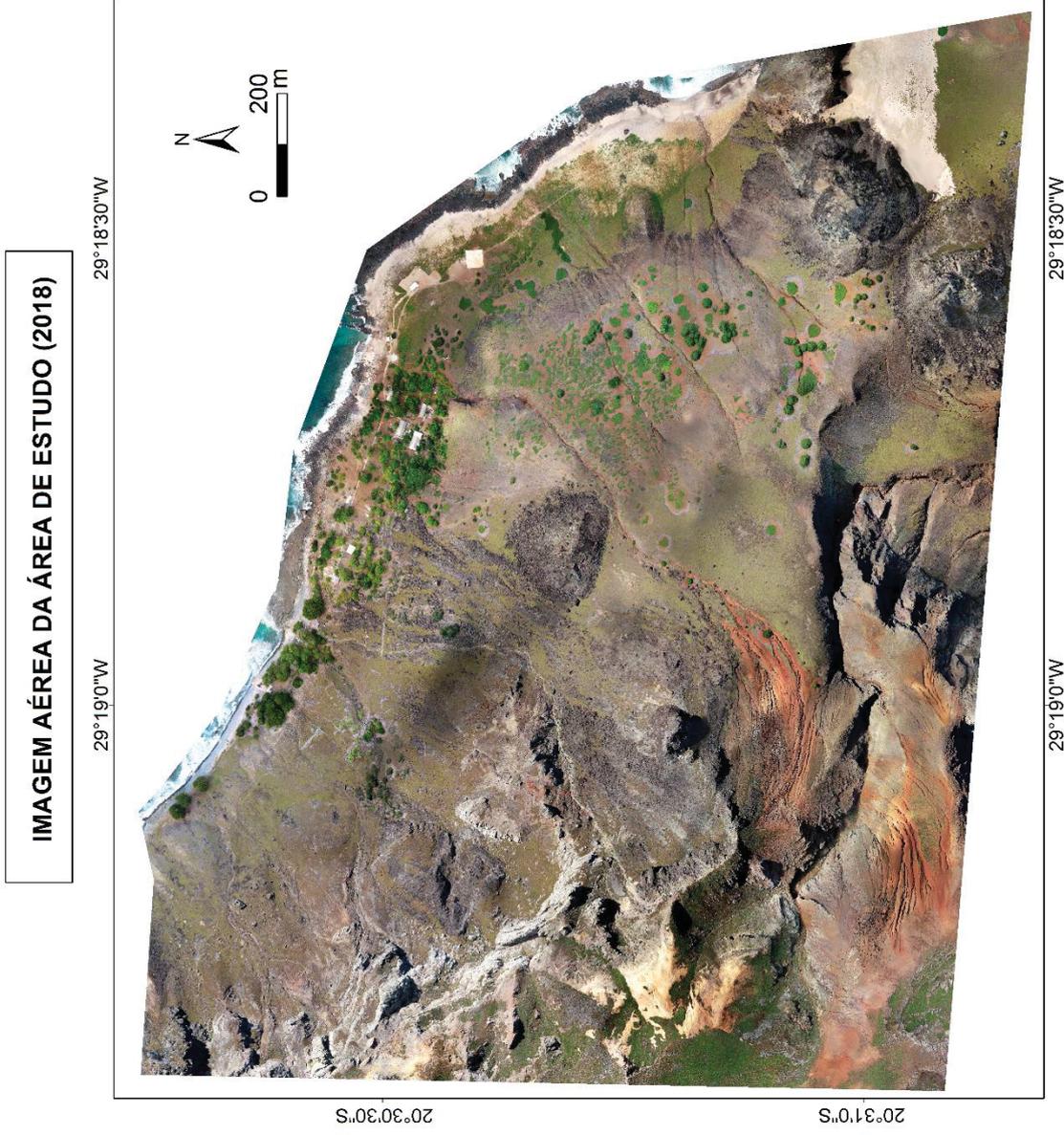


ANEXO 2 – IMAGEM AÉREA DA ÁREA DE ESTUDO (2011)



Projeção Universal de Mercator - UTM
Zona 26 Sul
Sistema de Referência: WGS 84
Imagem de 2011 cedida pela Marinha do Brasil (DHN)

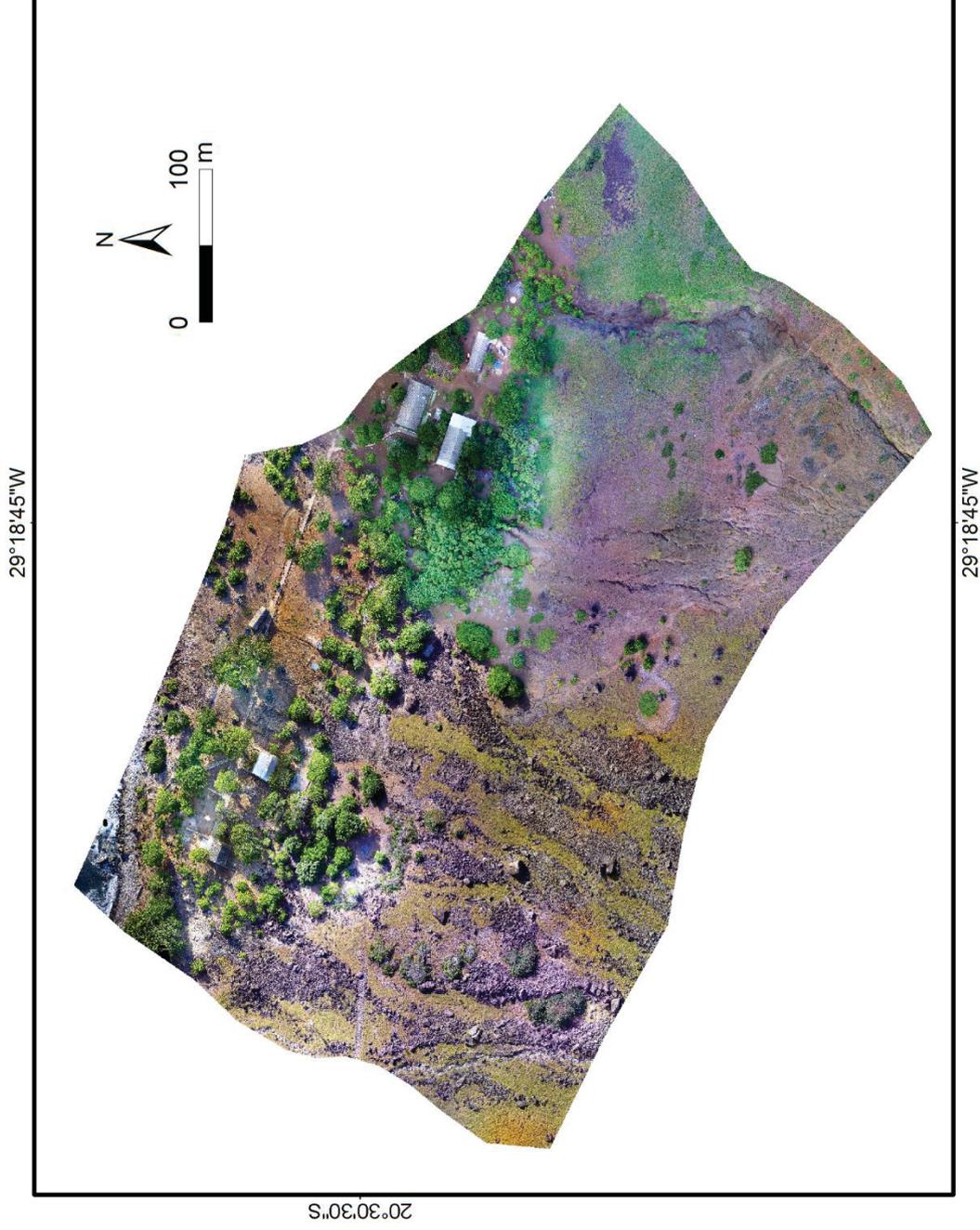
ANEXO 3 – IMAGEM AÉREA DA ÁREA DE ESTUDO (2018)



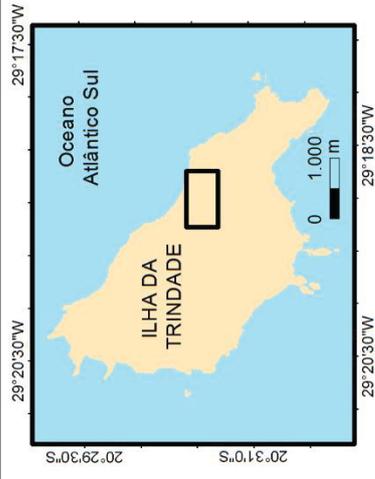
Projeção Universal de Mercator - UTM
Zona 26 Sul
Sistema de Referência: WGS 84
Ortofoto de 2018 cedida pelo Professor Fábio Soares (UFMG)

ANEXO 4 – IMAGEM AÉREA DE DETALHE DA ÁREA DE ESTUDO (2019)

IMAGEM AÉREA DE DETALHE DA ÁREA DE ESTUDO, ILHA DA TRINDADE, BRASIL (2019)



LOCALIZAÇÃO NA ILHA DA TRINDADE

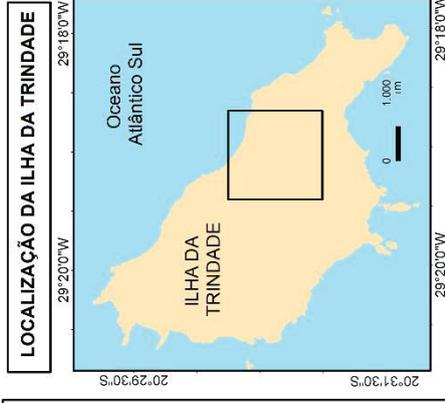
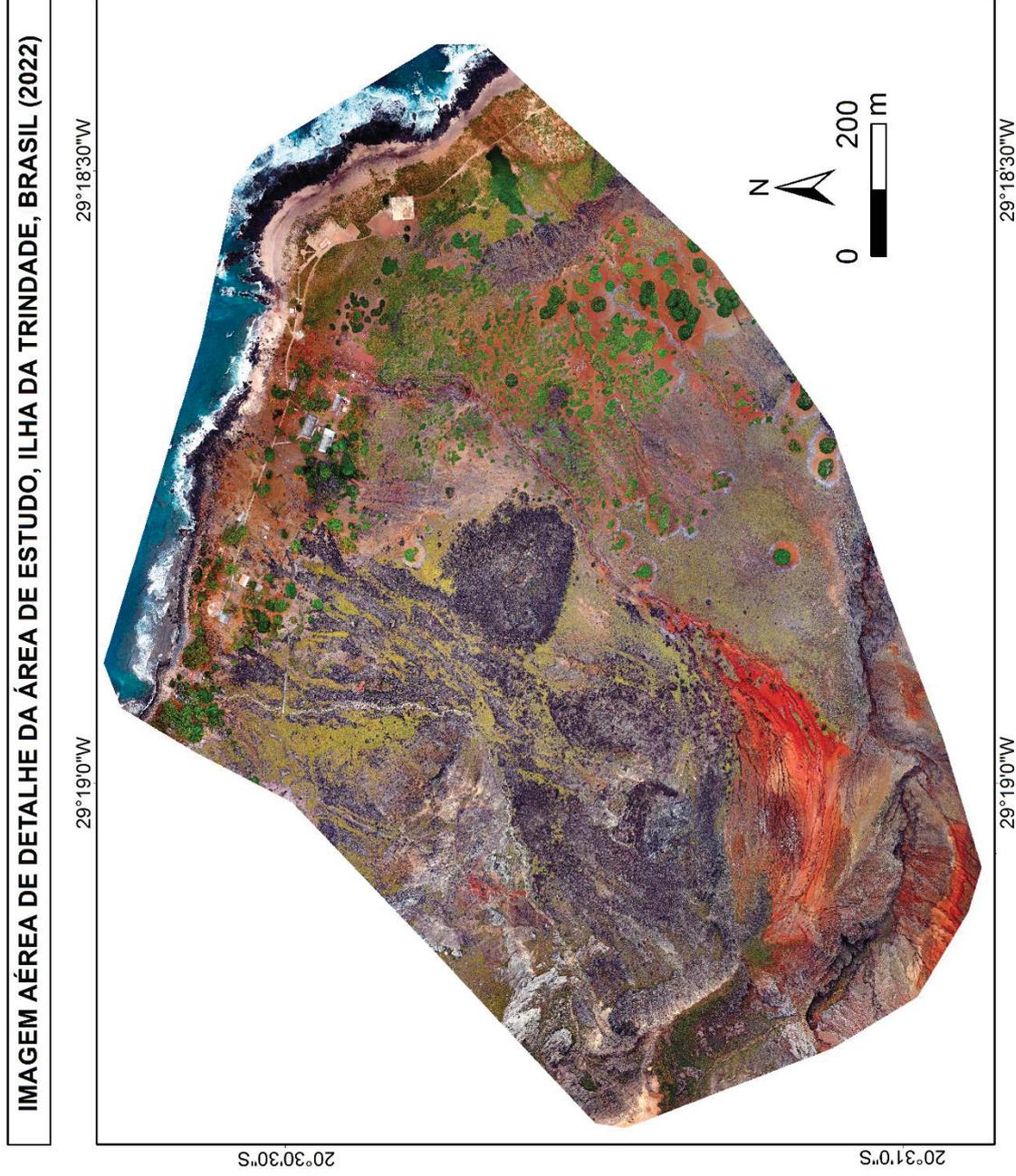


Projeção Universal de Mercator - UTM
Zona 26 Sul

Sistema de Referência: WGS 84
Ortomosaico obtido por dados de aeronave
remotamente pilotada e sistema global
de navegação por satélite em tempo real

Autora: Fernanda Avelar Santos
Curitiba/PR
2019

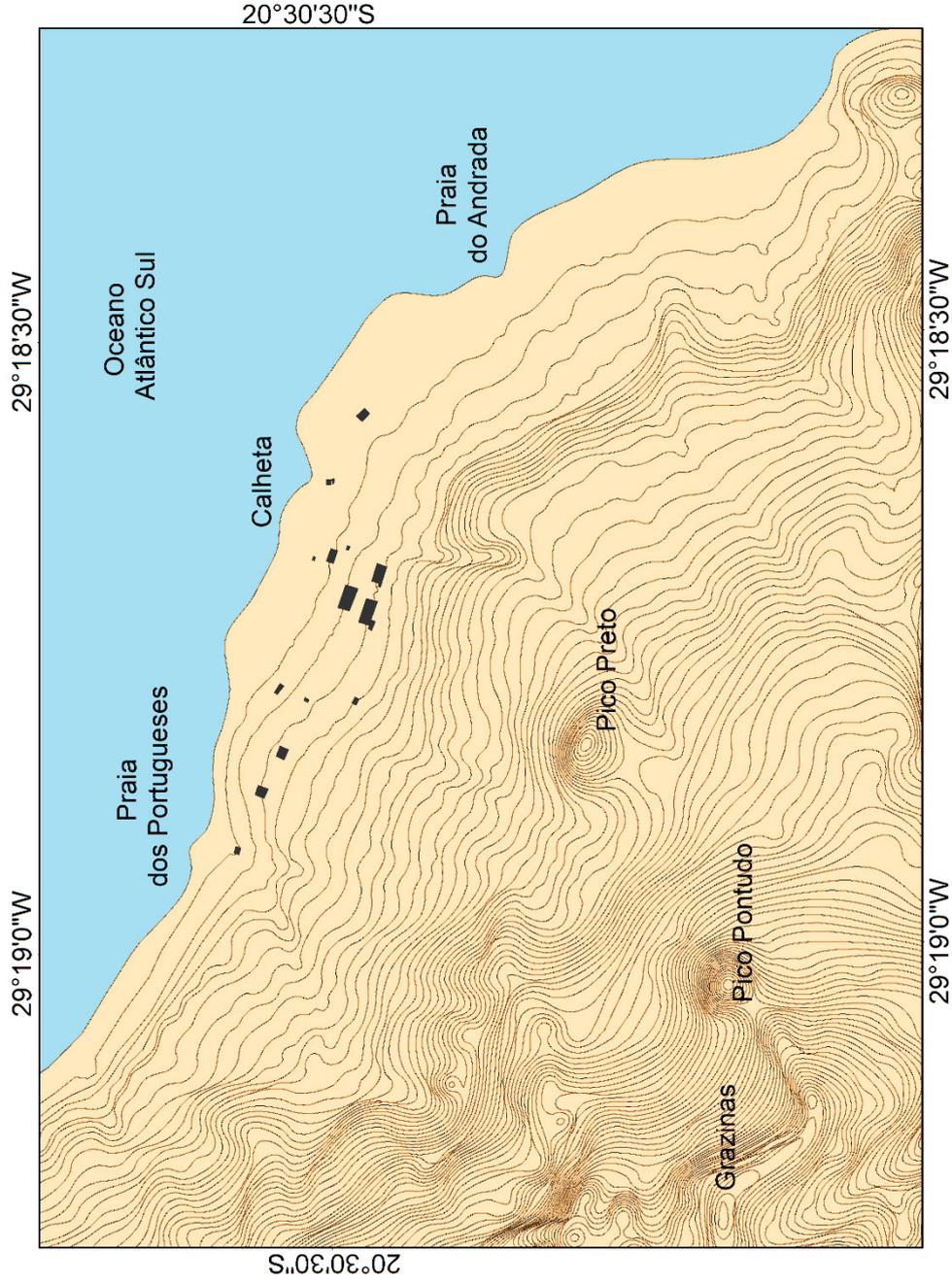
ANEXO 5 – IMAGEM AÉREA DE DETALHE DA ÁREA DE ESTUDO (2022)



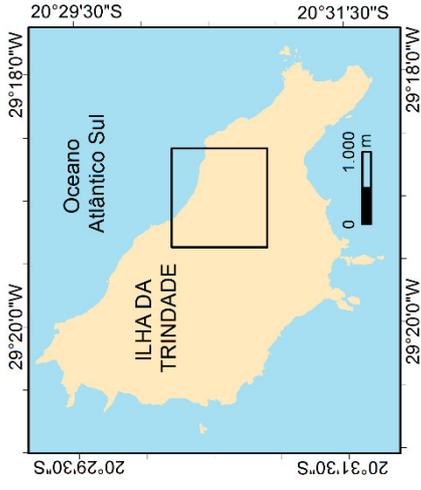
Projeção Universal de Mercator - UTM
Zona 26 Sul
Sistema de Referência: WGS 84
Ortomosaico obtido por dados de aeronave remotamente pilotada e sistema global de navegação por satélite em tempo real
Autora: Fernanda Avelar Santos
Curitiba/PR
2022

ANEXO 6 – MAPA TOPOGRÁFICO

MAPA TOPOGRÁFICO DA ÁREA DE ESTUDO NA PORÇÃO LESTE DA ILHA DA TRINDADE, BRASIL



LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



Legenda

- Área de estudo
- Edificação
- Oceano Atlântico Sul
- Curva de nível

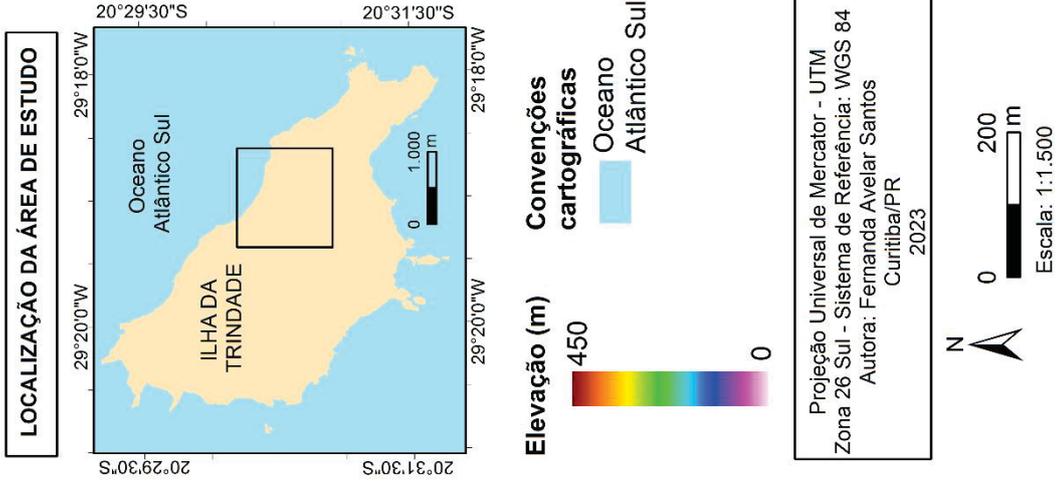
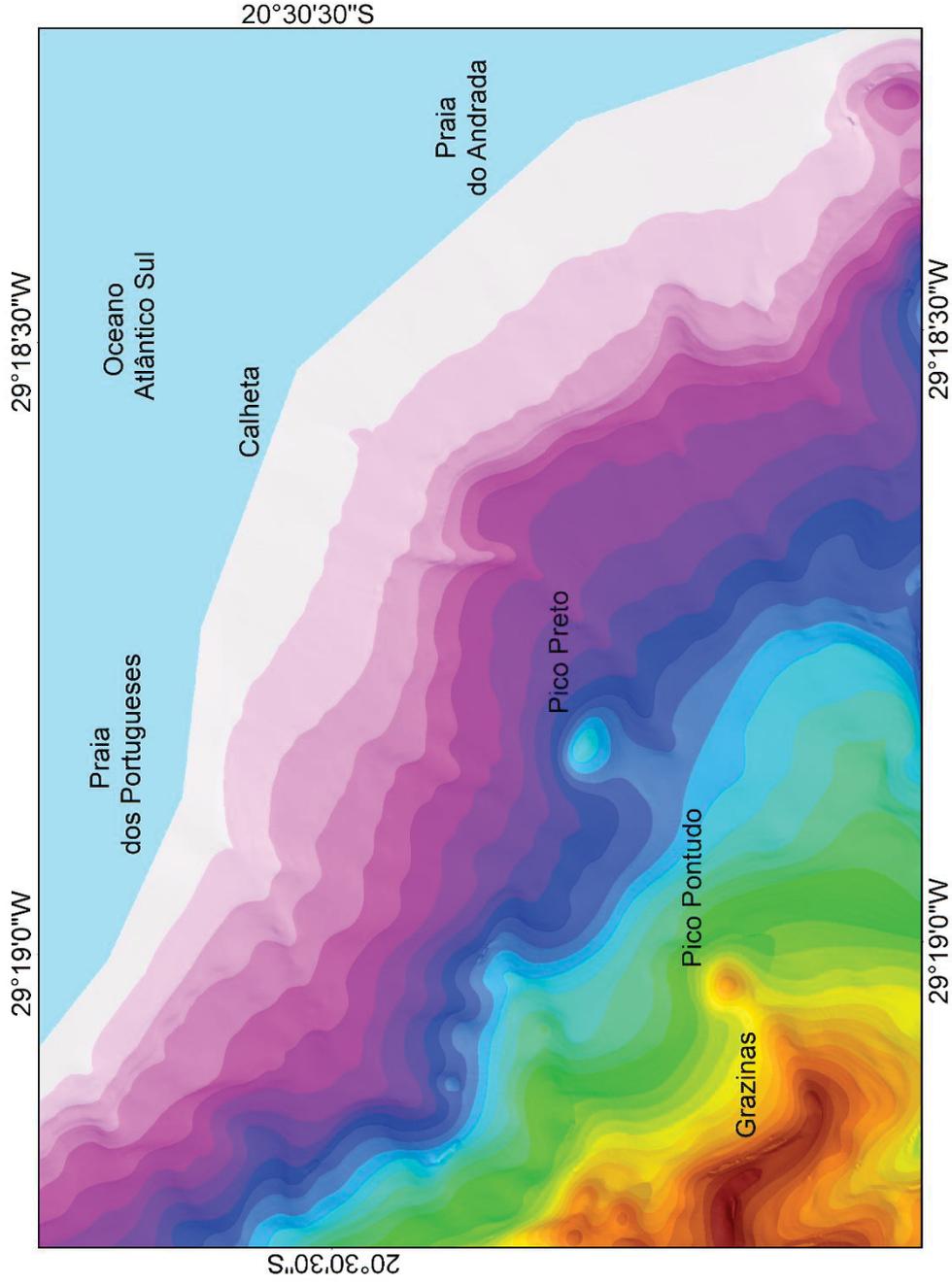
Projeção Universal de Mercator - UTM
Zona 26 Sul - Sistema de Referência: WGS 84
Equidistância das curvas de nível: 5 metros
Autora: Fernanda Avelar Santos
Curitiba/PR
2023



Escala: 1:1.500

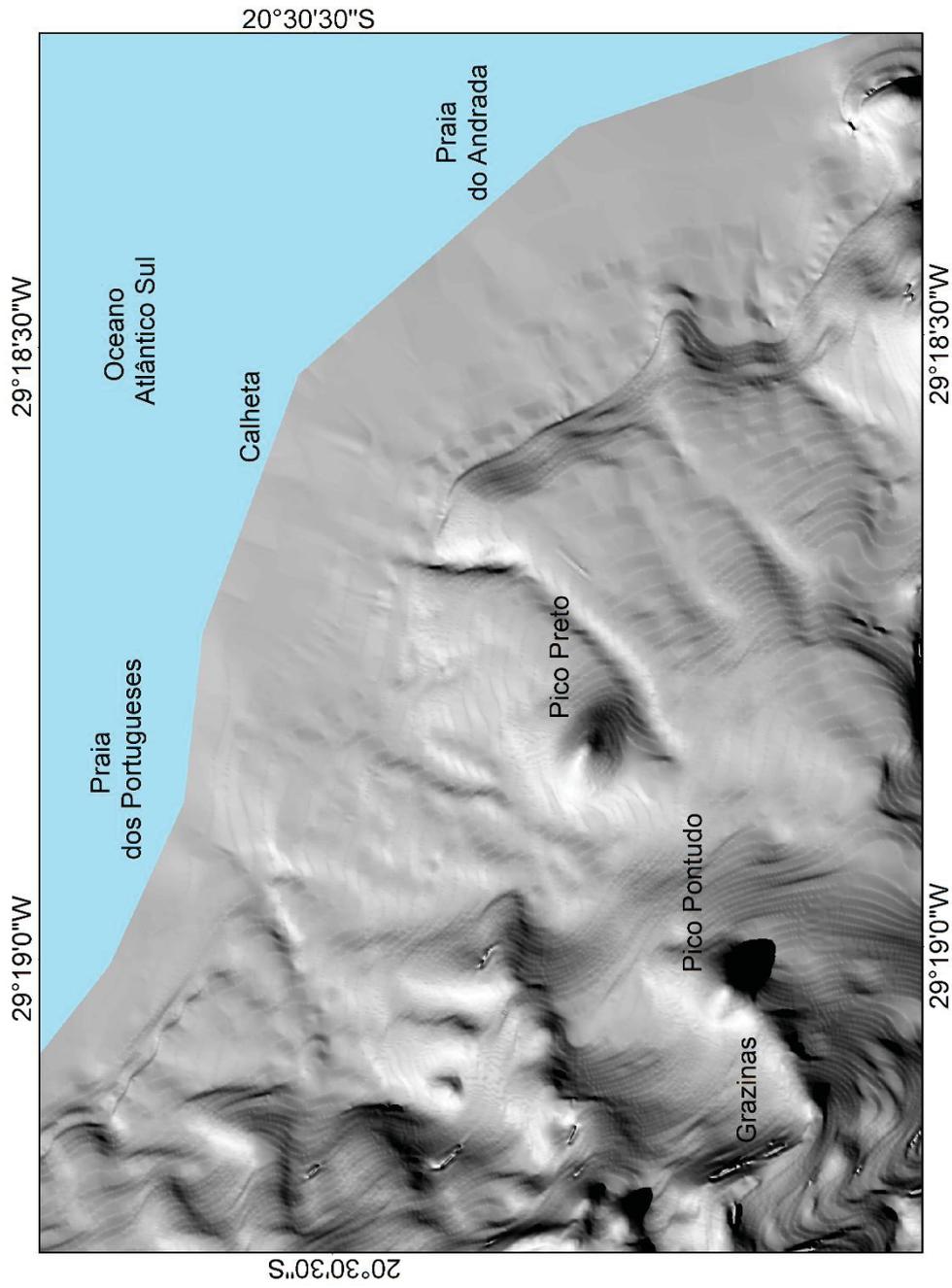
ANEXO 7 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA PORÇÃO LESTE DA ILHA DA TRINDADE, BRASIL

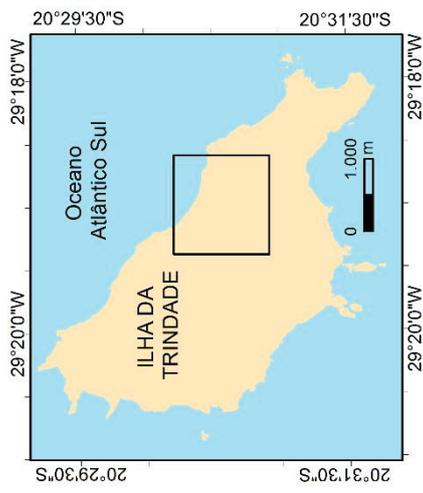


ANEXO 8 – MAPA DE RELEVO SOMBREADO

RELEVO SOMBREADO DA ÁREA DE ESTUDO NA PORÇÃO LESTE DA ILHA DA TRINDADE, BRASIL



LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



Relevo



Convenções cartográficas



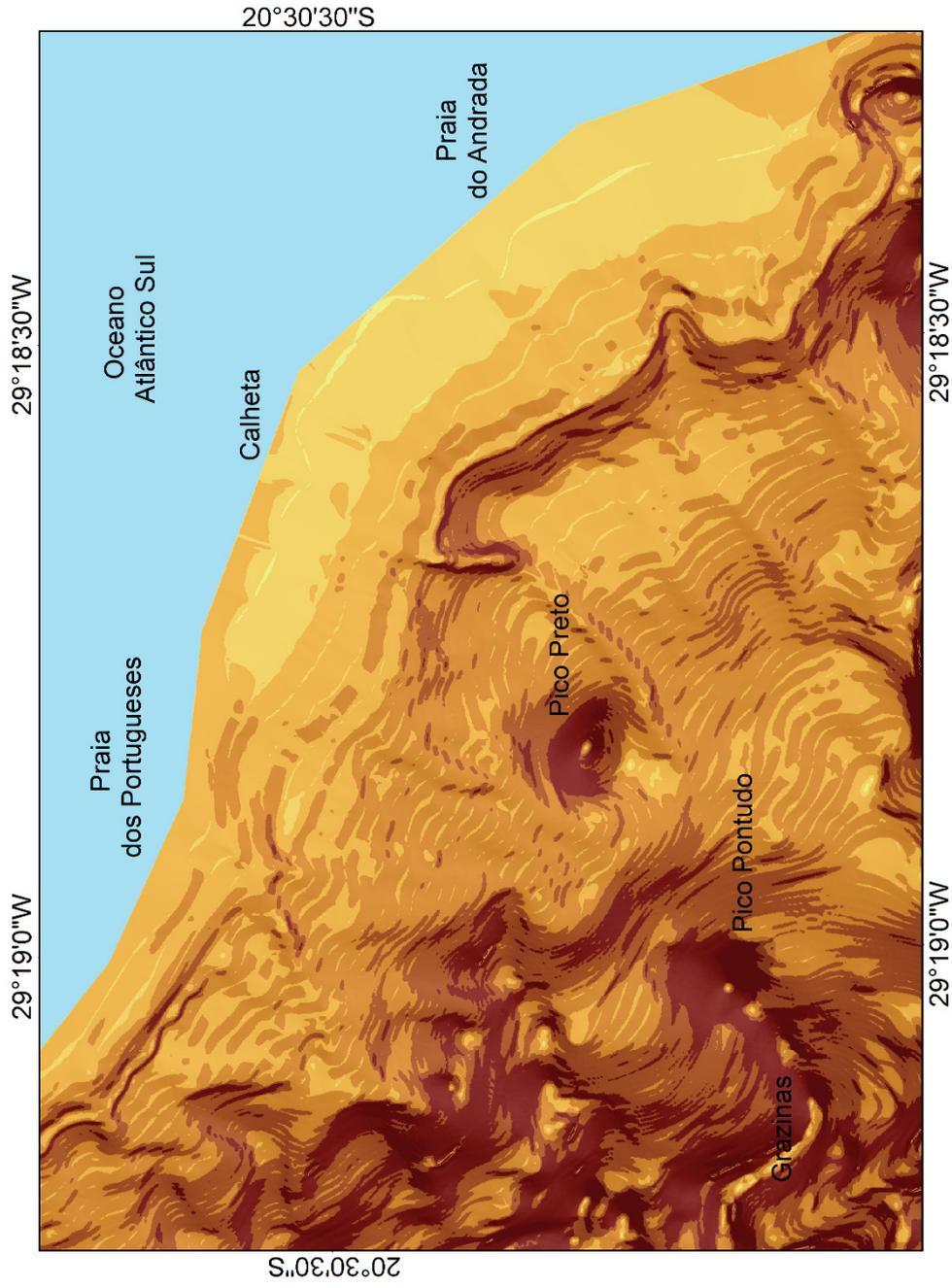
Projeção Universal de Mercator - UTM
Zona 26 Sul - Sistema de Referência: WGS 84
Autora: Fernanda Avelar Santos
Curitiba/PR
2023



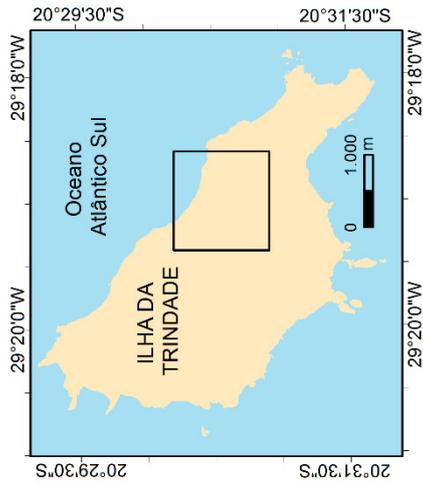
Escala: 1:1.500

ANEXO 9 – MAPA DIGITAL DE DECLIVIDADE

MODELO DIGITAL DE DECLIVIDADE DA ÁREA DE ESTUDO NA PORÇÃO LESTE DA ILHA DA TRINDADE, BRASIL



LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



Declividade



Convenções cartográficas



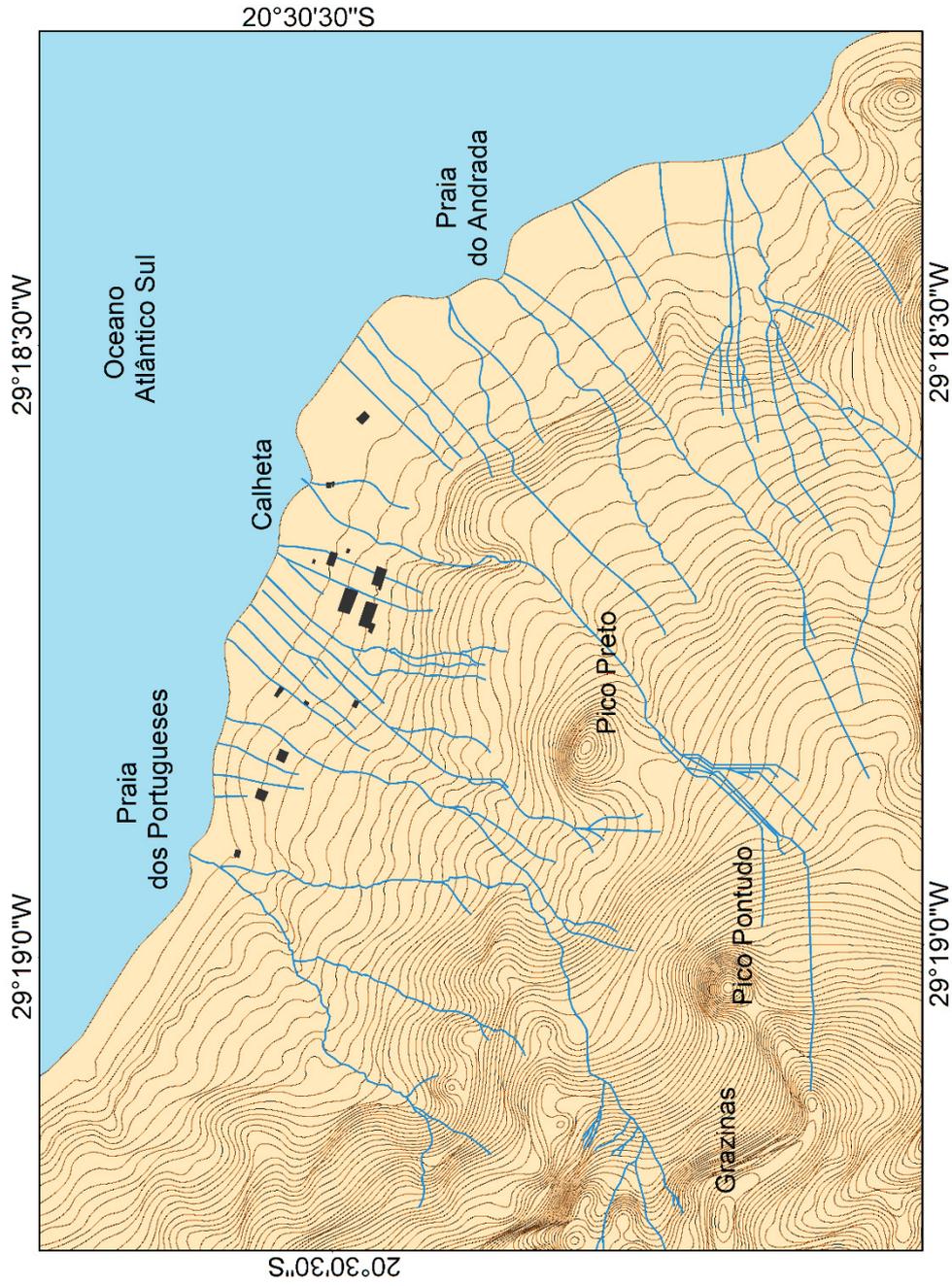
Projeção Universal de Mercator - UTM
Zona 26 Sul - Sistema de Referência: WGS 84
Autora: Fernanda Avelar Santos
Curitiba/PR
2023



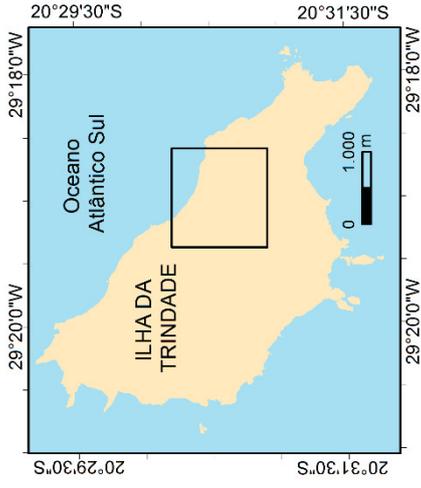
Escala: 1:1.500

ANEXO 10 – MAPA HIDROGRÁFICO

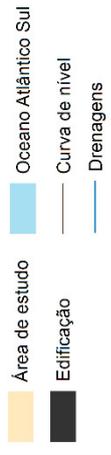
MAPA HIDROGRÁFICO DA ÁREA DE ESTUDO NA PORÇÃO LESTE DA ILHA DA TRINDADE, BRASIL



LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



Legenda



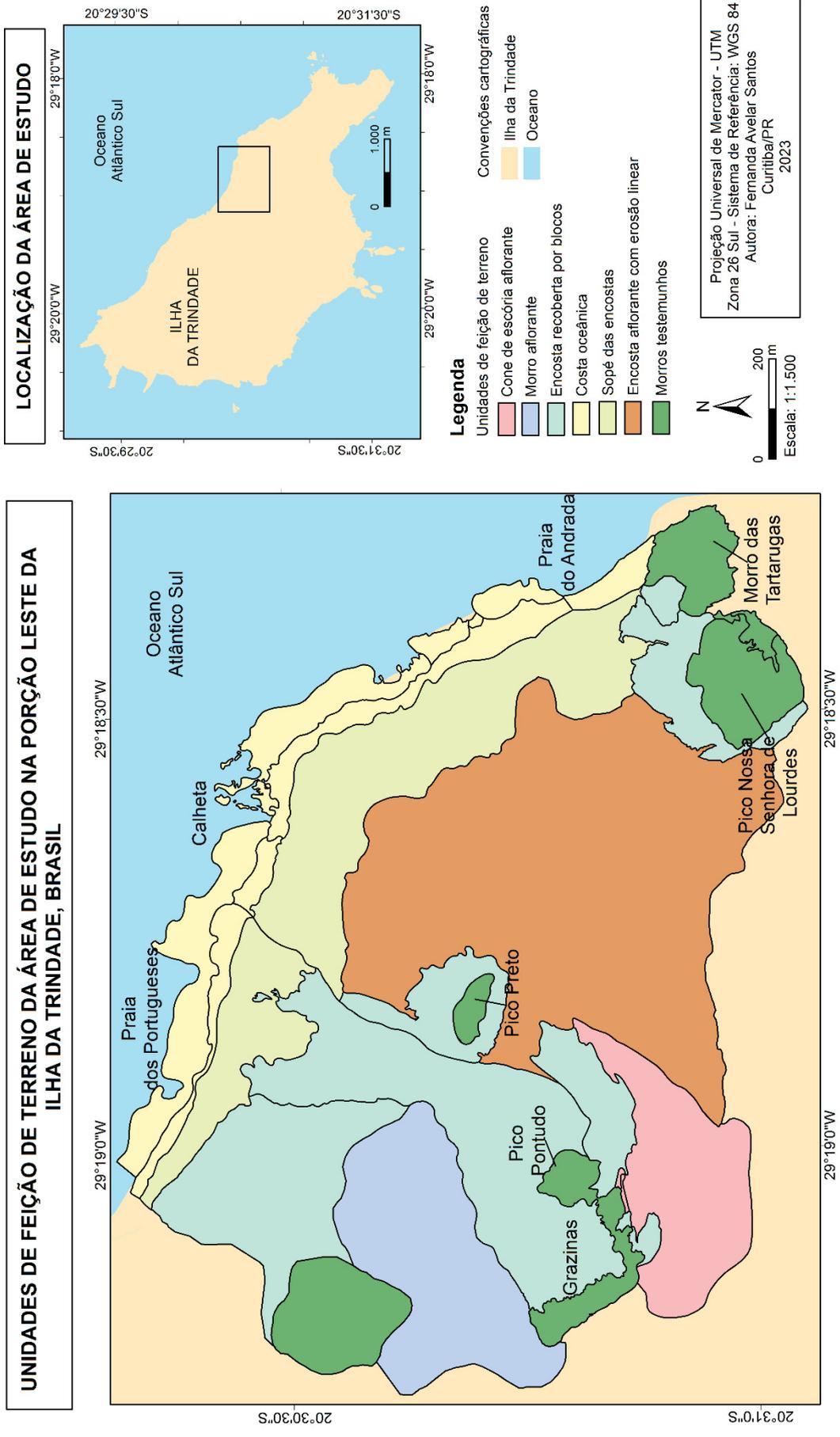
Projeção Universal de Mercator - UTM
Zona 26 Sul - Sistema de Referência: WGS 84
Equidistância das curvas de nível: 5 metros
Autora: Fernanda Avelar Santos
Curitiba/PR
2023



Escala: 1:1.500



ANEXO 11 – MAPA DE UNIDADES DE FEIÇÃO DE TERRENO



ANEXO 12 – MAPA DE UNIDADES GEOLÓGICAS DE DETALHE

