

Monitoramento da geração de sedimentos por evento de chuva na Ilha da Trindade, Brasil

Monitoring of sediment generation by rainfall event in Trindade Island, Brazil

Fernanda Avelar Santos^{ad} , **Adriana Ahrendt Talamini**^{be} , **Lázaro Valentin Zuquette**^{cf} ,
Renata Marianne Santos Pezzi^{ag} , **Rodolfo José Angulo**^{ah} , **Maria Cristina de Souza**^{ai} 

^aPrograma de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná, ^bDepartamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná, ^cDepartamento de Geotecnia da Universidade de São Paulo

^dfernanda.avelars@gmail.com, ^eadrianatalamini@ufpr.br, ^flazarusl@sc.usp.br, ^grepezzil@gmail.com, ^hfitoangulo@gmail.com,
ⁱcristinasouza2527@gmail.com



© 2024 The authors. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons license.

Resumo

Este estudo detalha eventos de chuva extrema e sua relação com o escoamento superficial e o transporte de sedimentos na Ilha da Trindade, situada no Atlântico Sul a 1.140 km do continente sul-americano. A ilha possui ocupação remota e infraestrutura insuficiente para o enfrentamento de desastres. Com o objetivo de caracterizar preliminarmente a evolução dos processos de erosão hidráulica, o estudo foi conduzido numa encosta de 1,7 km², adjacente às construções da ilha, entre os dias 27 de abril e 16 de junho de 2019. A abordagem integrada incluiu a instalação de um pluviógrafo digital, a construção de uma parcela experimental de 3 m² para coleta de sedimentos transportados pelo escoamento superficial, a realização de análises geotécnicas e químicas de materiais inconsolidados, levantamentos geoespaciais com drone e a caracterização do substrato rochoso. Foram registrados 14 dias com chuvas, com acumulado total de 920 mm, intensidades máximas de 13,3 mm/s e mínima de 1,3 mm/min, com duração total de 410 minutos e 3055 g de sedimentos transportados. Nos dias de chuva extrema, conforme a classificação de chuvas do INMET, que apresentaram os maiores índices de precipitação, duração e intensidade, foi registrado o transporte de 2647 g de sedimentos, com taxas de 4,0, 1,7 e 1,9 g/m²/min. A erosão diferencial é mais intensa no substrato rochoso da Formação Morro Vermelho, principalmente nas camadas de tufo-brecha. Os materiais inconsolidados, provenientes principalmente desta unidade, foram classificados segundo a norma ABNT correlata como arenosos-siltosos, com pedregulhos, com altos teores de umidade, baixos limites de liquidez, não plásticos e pouca evolução pedogenética. Estas características geológicas somadas aos aspectos climáticos conferem a área alta suscetibilidade à erosão hidráulica. Ressalta-se a necessidade de realizar ações por parte das autoridades para mitigar a erosão hidráulica, com foco nas feições erosivas da Formação Morro Vermelho, a fim de proteger as áreas habitadas dos riscos relacionados a estes processos naturais.

Palavras-chave: Chuvas extremas; Erosão hidráulica; Ilha vulcânica; Dinâmica e evolução da paisagem; Processos erosivos.

Abstract

This is the first study to detail extreme rainfall events and their relationship with surface runoff and sediment transport in the Brazilian territory furthest from the coast. Trindade Island, located in the South Atlantic 1,140 km from the South American continent, has a remote occupation and insufficient infrastructure to face disasters. Aiming to characterize the evolution of hydric erosion preliminarily, the study was conducted on a 1.7 km² slope adjacent to the island's buildings, between April 27 and June 01, 2019. The integrated approach included the installation of a digital pluviograph, the construction of a 3 m² experimental plot for sediment collection, geotechnical and chemical analyses of unconsolidated materials, geospatial surveys with drones, and the characterization of the rocky substrate. The monitoring data revealed 14 days of rain, with a total accumulation of 920 mm, maximum intensities of 13.3 mm/s, and a minimum of 1.3 mm/min, lasting 410 minutes and 3055 g of sediments transported. On days of extreme rain, according to the INMET rainfall classification, which showed the highest precipitation rates, duration, and intensity, 2647 g of sediments were transported, with rates of 4, 1.7, and 1.9 g/m²/min. Differential erosion is imminent in the rocky substrate of the Morro Vermelho Formation, especially in the layers of tuff-breccia. The unconsolidated materials, from this unit, were classified according to the correlated ABNT standard as predominantly sandy-silty (with pebbles), with high moisture content, low liquidity limits, non-plastic, and little pedogenetic evolution. These geological characteristics, combined with climatic aspects, make the region highly susceptible to water erosion. It highlights the importance of actions by the authorities to mitigate water erosion, with a special focus on the linear erosive features of the Morro Vermelho Formation, to protect the inhabited areas from the risks related to these natural processes.

Keywords: Extreme rainfall; Water erosion; Volcanic island; Landscape dynamics and evolution; Erosive processes.

1. Introdução

As ocupações habitacionais insulares enfrentam severas fontes de eventos perigosos exógenos, em comparação às ocupações do continente, devido à sua localização geográfica. As ilhas oceânicas estão expostas não apenas a eventos terrestres, mas também a fenômenos marinhos e climáticos episódicos, tais como linhas de instabilidade e ciclones, que potencializam a erosão e a perda de massa (por exemplo, Aubaud et al. 2013; Marinos et al. 2017).

O monitoramento de processos de dinâmica superficial em ambientes insulares e costeiros (Moss et al. 1999; Gaspar et al. 2011; Osilieri et al. 2013; Kerguillec et al. 2019) é crucial para identificar riscos naturais e desenvolver estratégias de gestão territorial (López-Saavedra & Martí 2023). No entanto, a escassez de programas de monitoramentos contínuos detalhados e de longa duração nos estudos sobre erosão linear dificulta uma avaliação confiável deste tipo de fenômeno altamente variável (Castillo e Gómez 2016).

Na Ilha da Trindade (Fig. 1), as construções e as intervenções humanas estão situadas perto de áreas com processos exógenos ativos (Angulo et al. 2017; Santos et al. 2022). Neste sentido, estudos e programas de monitoramento que investiguem os perigos geológicos não-vulcânicos são necessários nesta região.

No entanto, a ausência de banco de dados e programas de monitoramento prejudica a percepção dos problemas geoambientais e impossibilita a modelagem de riscos geológicos. A fim de abordar tal lacuna de conhecimento, partindo da hipótese de que ocorrerão desastres com vítimas, o objetivo deste estudo foi caracterizar a erosão hídrica na área ocupada da Ilha da Trindade. Para isso, foram realizados levantamentos quantitativos dos processos hídricos e seu desenvolvimento nos estratos que sustentam os depósitos das encostas próximas à área ocupada.

2. Área de estudo

2.1 Localização

A Ilha da Trindade, situada a 1140 km a leste da margem continental do sudeste brasileiro (Fig. 1), é um território remoto com uso militar e científico. Designada como área de preservação e monumento natural (Brasil 2018), sua ocupação enfrenta desafios de isolamento e recursos médicos limitados. Para este estudo, foram selecionadas encostas previamente identificadas com evidências de erosão hídrica, localizadas a montante das áreas construídas, situadas no leste da ilha e acessíveis pela Praia da Calheta (Fig. 1d). Estas áreas são a chave para entender a dinâmica erosiva e desenvolver estratégias de prevenção e mitigação eficazes.

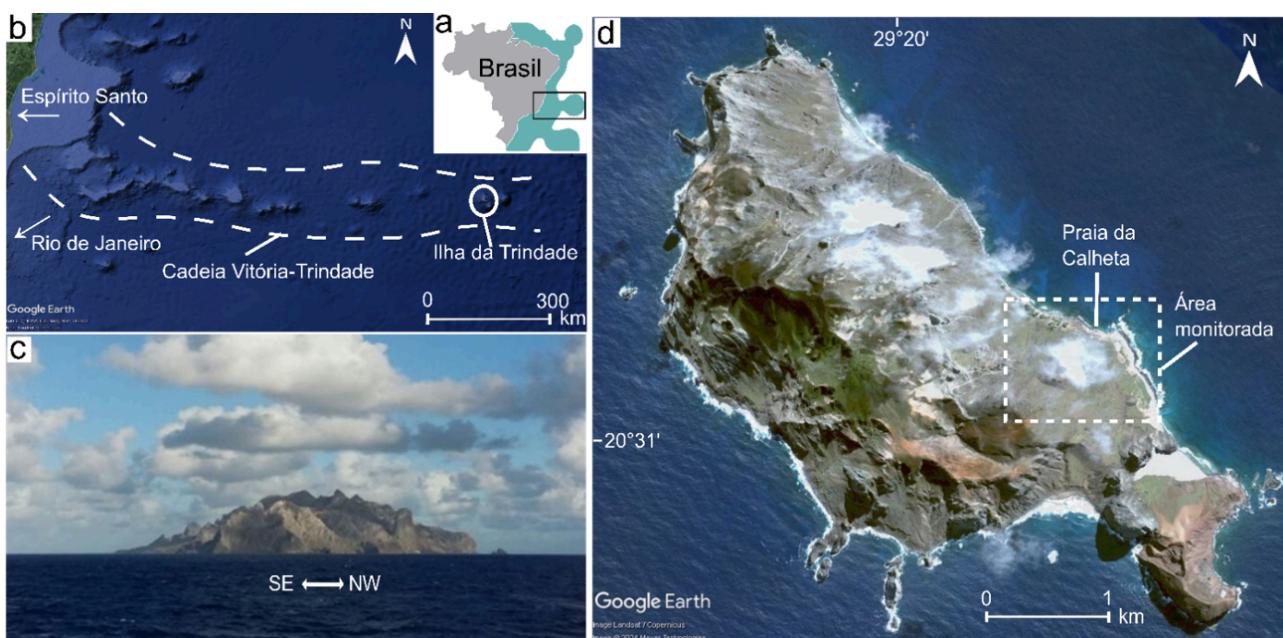


Figura 1 – Localização: (a) Ilha da Trindade ($20,5^{\circ}$ S, $29,3^{\circ}$ W) situada no Atlântico Sul a 1.140 km do continente sul-americano no extremo leste da cadeia vulcânica submarina Vitória-Trindade, integra a (b) Zona Econômica Exclusiva do Brasil (em azul). (c) vista panorâmica do terreno escarpado e (d) vista aérea da área de estudo, situada na parte leste da ilha, delimitada por tracejado, abrangendo as encostas a montante das construções.

2.2 Geologia e geomorfologia

Almeida (1961) delimitou a ilha em unidades geológicas constituídas por derrames, estruturas fonolíticas e sequências piroclásticas (Fig. 2), que foram nomeados nas seguintes unidades, em ordem cronológica: Complexo de Trindade, Sequência Desejado, Formação Morro Vermelho, Formação Valado e Formação Vulcão do Paredão. Destaca-se que

alguns trabalhos a partir de 2022, atualizaram a nomenclatura da Sequência Desejado para Formação Desejado (e.g., Monteiro et al. 2022; Figueiredo et al. 2022).

O relevo atual da ilha é resultado da intensa erosão pluvial do edifício vulcânico e caracteriza-se pela sua heterogeneidade geomorfológica e geológica (Fig. 2). Os diversos montes íngremes proeminentes na

paisagem, correspondem a estruturas remanescentes dos antigos vulcões que construíram o terreno emerso da ilha, tais como diques, necks e domos (Almeida 1961, Almeida 2002), além de cones de escórias remanescentes (Luz 2019; Pasqualon 2019). Destaca-se que, na superfície do relevo da ilha, predominam materiais inconsolidados. Estes variam desde

sedimentos transportados por leques aluviais e associados principalmente aos depósitos piroclásticos, até blocos de rocha de dimensões decamétricas associados às estruturas vulcânicas remanescentes, depositados principalmente por processos de avalanches de rochas. Tal variedade contribui para a complexidade geomorfológica e geológica observada.

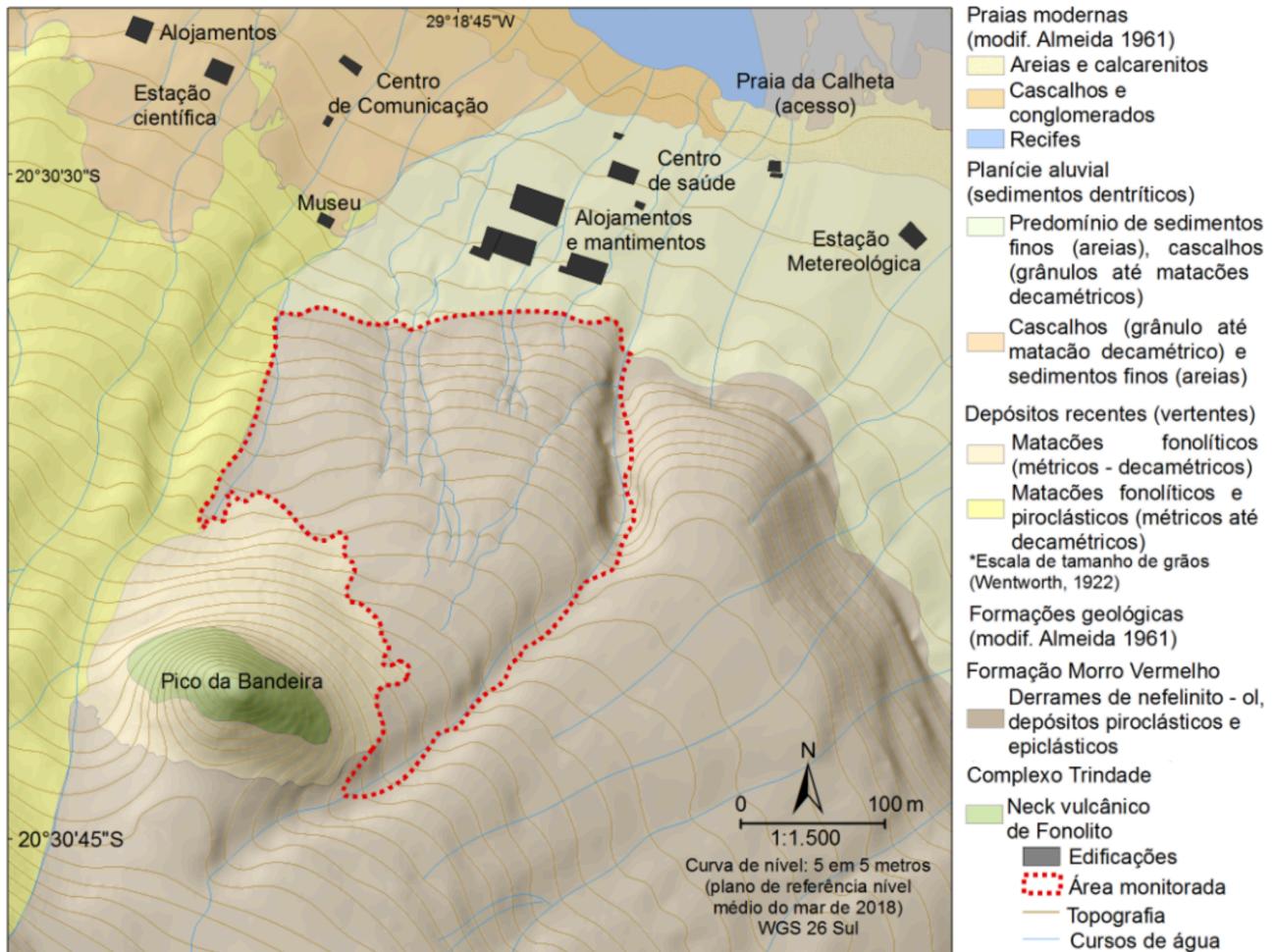


Figura 2 – Mapa geológico da área de estudo com destaque para a área de monitoramento.

2.3 Clima

O clima na Ilha da Trindade é o Tropical Oceânico (Marinha do Brasil 2011). No geral, conforme as informações climatológicas da Estação Meteorológica da Ilha da Trindade - EMIT (código 83650, 20°30'S/29°19'W), a ilha é caracterizada por uma temperatura média anual de 25 °C, com média da máxima de 28 °C e média da mínima de 23 °C e umidade relativa anual de 72%. Segundo os dados, a média anual de precipitação entre 1974 e 2010 (dados revisados em 2013) é de 921 mm, com 106 dias efetivos de chuva (Fig. 3). O período mais úmido - maior média mensal de precipitação e maior número de dias chuvosos - é entre abril e junho, e o mais seco - menor média mensal de precipitação e menos dias chuvosos - ocorre em agosto, seguido de janeiro e fevereiro (Fig. 3).

3. Materiais e Métodos

No presente estudo foi escolhida a encosta adjacente à área ocupada, que se destaca pelo substrato rochoso exposto, densidade elevada de processos erosivos lineares e baixa cobertura vegetal (Fig. 4). Com o objetivo de caracterizar a erosão hídrica, foi definida a área de 1,7 km² para a realização das atividades descritas a seguir (Fig. 2).

O período de execução do experimento foi de 50 dias ininterruptos, de 27 de abril até 16 de junho de 2019. Foi instalado para este período um pluviôgrafo digital com resolução de 0,33 mm por segundo. Esta característica aponta para a alta sensibilidade do instrumento, apto a detectar até as precipitações mais leves. O dispositivo, de natureza eletromecânica, visa documentar tanto a quantidade de chuva quanto as respectivas datas e horários de cada evento, facilitando o processamento subsequente dos dados coletados. O

equipamento foi posicionado a 29°30'31" de latitude Sul e 29°18'32" de longitude Oeste, a 300 metros de distância da área designada para experimentação (Fig.

4). Para analisar a pluviosidade foram compilados os dados de chuva referentes ao período de execução do experimento, os quais foram extraídos das planilhas eletrônicas do pluviógrafo.

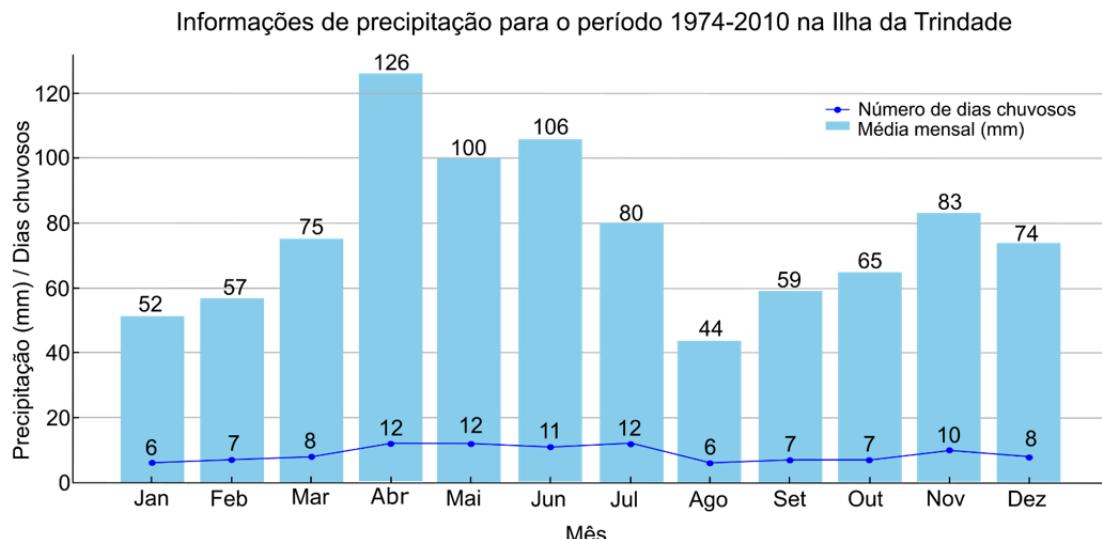


Figura 3 – Dados históricos da distribuição das chuvas na Ilha da Trindade disponíveis na Estação Meteorológica da Ilha da Trindade - EMIT.

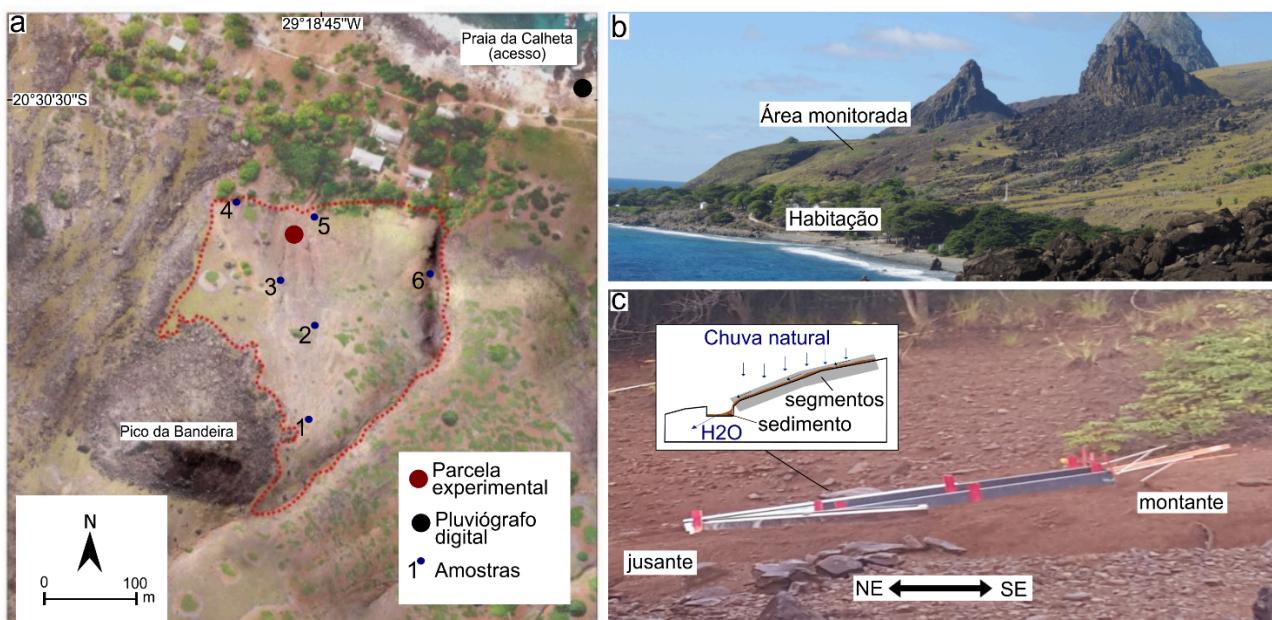


Figura 4 – Área de Estudo: (a) encosta monitorada, demarcada pela linha tracejada em vermelho, incluindo a localização da parcela experimental construída, o ponto de instalação do pluviógrafo digital, e a localização dos pontos de coleta de amostras de materiais inconsolidados de materiais inconsolidados coletadas para as caracterizações geotécnicas e químicas (imagem DHN, 2011); (b) vista panorâmica da área de estudo; (c) parcela experimental do transporte de sedimento pelas águas superficiais das chuvas.

Para estimar a quantidade de sedimento gerado pelos eventos chuvosos monitorados, utilizou-se uma parcela (coordenadas 29°30'33" de latitude Sul e 29°18'46" de longitude Oeste) sem cobertura vegetal, com amplitude topográfica de 0,5 m (altitude mínima: 17 m; altitude máxima: 17,5 m) e 16% de declividade (Fig. 4). A parcela enquadra-se no relevo do tipo ondulado, seguindo as classes de relevo estabelecidas pela Embrapa em 1979. Para a delimitação da parcela experimental, foi demarcada uma área de 3 m², utilizando-se chapas de alumínio com 50 cm de altura, fixadas no solo até uma profundidade de 25 cm. No

limite inferior da parcela, voltado para o fluxo descendente, foi criada uma saída de 40 cm de largura por 20 cm de profundidade, onde se posicionou um coletor de madeira (Fig. 4c). O coletor possui em seu fundo uma malha com aberturas de 0,03 mm, desenhada para facilitar o escoamento da água e de materiais dissolvidos, enquanto retém as partículas sólidas. Esse mecanismo exclui do cálculo de massa os materiais com granulação inferior a 0,03 mm. A verificação e o esvaziamento do coletor foram realizados diariamente em caso de chuvas com transporte de sedimento.

Neste sentido, realizou-se o monitoramento durante um dos períodos mais chuvosos do ano na Ilha da Trindade, no qual foram registradas as perdas de massa de solo e calculadas as taxas de erosão, que foram relacionadas aos tipos de chuva. A taxa de erosão foi calculada em g/m²/min, aplicando o cálculo que divide a perda total de sedimento pelo produto da área estudada e o tempo de observação da chuva. As amostras de sedimento coletadas foram levadas ao laboratório após o período de monitoramento, secadas ao ar livre e pesadas em uma balança analítica com precisão de 0,001 kg.

Para caracterizar os materiais inconsolidados, descritos durante o reconhecimento de campo como de textura silto-arenosa, foram coletadas seis amostras (Fig. 4a) para a realização de análises geotécnicas e químicas. Os procedimentos para avaliar as propriedades físicas das amostras aderiram às Normas Brasileiras (NBR), sendo eles Preparação para Ensaios de Caracterização e Compactação (NBR 6457/86), Análise Granulométrica (NBR 7181/84), Limite de Liquidez (LL) (NBR 6459/84), Limite de Plasticidade (LP) (NBR 7180/84) e Umidade Higroscópica (H) (NBR 6457/86). É importante evidenciar que para este trabalho optou-se por realizar o ensaio de Análise Granulométrica com secagem prévia, como também o uso de defloculante, instruções descritas na norma NBR 7181/84 e escala granulométrica na norma NBR 6502/95. Os resultados das análises geotécnicas foram interpretados conforme normas técnicas para determinar a distribuição dos tamanhos de partículas, a plasticidade e a consistência dos sedimentos, parâmetros cruciais para identificar a capacidade de deformação e o comportamento mecânico dos materiais inconsolidados.

A caracterização química dos sedimentos foi realizada em três amostras, incluindo análises de Fluorescência de Raios X (FRX) e Difratometria de Raios X (DRX) para rocha total e fração argila. Estes resultados permitiram determinar a composição química dos materiais que compõem o sedimento, identificar os principais minerais e argilominerais presentes, correlacionar os materiais com as rochas de origem e associar tais informações aos ensaios físicos realizados.

Os dados de relevo foram obtidos por meio de aerolevantamentos realizados com uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) (Phantom 3 Advanced – DJI) equipada com uma câmera FC300S. A câmera possui uma distância focal de 3,61 mm, tamanho de pixel de 1,56 × 1,56 µm e resolução de imagem de 4.000 × 3.000 pixels. O software PIX4D Capture foi utilizado para a execução dos levantamentos aéreos. Foram distribuídos 14 alvos codificados no terreno, os quais foram medidos utilizando o Sistema de Navegação Global por Satélite (Global Navigation Satellite System - GNSS) com posicionamento em tempo real (Real Time Kinematic - RTK). As imagens foram processadas utilizando o software Agisoft

Photoscan, empregando o algoritmo Structure from Motion-Multi View Stereo (SfM-MVS), para gerar o Modelo Digital de Elevação (MDE) e perfis topográficos da encosta monitorada.

O substrato rochoso foi descrito em campo com base em atributos como litotipos, grau de intemperismo, distribuição em área e profundidade, descontinuidades, fraturamento e tipo de contato entre os materiais geológicos. Para isso, foram empregadas técnicas de campo e geoprocessamento (por exemplo, Nadalin et al. 2018). Os litotipos foram classificados de acordo com as unidades geológicas da Ilha da Trindade, conforme definidas por Almeida (1961).

Para auxiliar na identificação das feições erosivas foram realizados levantamentos geoespacial via 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 e modelo digital de elevação.

4. Resultados

4.1 Caracterização do relevo, substrato rochoso e materiais inconsolidados

A área de monitoramento apresenta uma amplitude topográfica de aproximadamente 100 metros entre as cotas mais baixas (30 metros) e as mais altas (130 metros), evidenciando uma inclinação acentuada (Fig. 5). A declividade do relevo é classificada predominantemente como fortemente ondulado (20% -45%), embora varie de montanhosa (45% - 75%) a escarpada (maior do que 75%) no sopé da encosta e na principal voçoroca próxima às construções onde ocorre a desembocadura da drenagem efêmera a leste da encosta, como evidenciado nos perfis topográficos da Fig. 5. A encosta estudada é caracterizada por uma alta densidade de feições lineares (Fig. 5), que variam desde sulcos de pequena profundidade (largura menor ou igual a 50 cm) nas áreas de maior altitude, evoluindo para feições mais profundas nas altitudes mais baixas, como ravinas (largura maior ou igual a 1 m e profundidade superior a 50 cm) e voçorocas, que apresentam um canal bem definido e permanente, com paredes íngremes e fluxos efêmeros durante os períodos chuvosos, com profundidades de até 18 metros.

Em relação ao substrato rochoso, a Formação Morro Vermelho aflora em superfície e subsuperfície e é definida por litotipos de distintas características geotécnicas frente aos processos intempéricos. Os derrames nefeliníticos, resistentes ao intemperismo químico, mas suscetíveis ao físico, alternam-se com depósitos piroclásticos (Fig. 6). Tais depósitos piroclásticos variam de tufo a brechas, exibindo alta suscetibilidade ao intemperismo químico.

Os afloramentos de tufo-brecha, friáveis e descontínuos, marcam as áreas escarpadas (Fig. 6) e caracterizam-se pela erosão diferencial. Nestas

camadas as feições lineares atingem profundidade de 1 a 3 m na região noroeste e até 20 m no vale do perímetro nordeste (Fig. 5). As camadas intercaladas de lapilli-tufos e tufos exibem contatos transicionais com estratificação evidente. Tais horizontes, alterados e descoloridos, mantêm as texturas e estruturas apesar da decomposição. Os lapilli-tufos são predominantemente bem selecionados, apresentam estratificação plano-paralela, com fragmentos milimétricos a centimétricos, angulosos e de esfericidade baixa a média. Os tufos, de seleção moderada a alta, destacam-se por serem estratificados, com fragmentos angulosos e de baixa esfericidade.

Nas análises de campo, foi constatada diversidade nos tipos de materiais inconsolidados transportados na superfície da encosta, conforme ilustrado na Fig. 7. Entre os materiais, estão blocos isolados de dimensão decamétrica, compostos por fonolito, provenientes da erosão e de processos de movimentos de massa gravitacionais das estruturas vulcânicas do Complexo Trindade, localizados próximos às construções (Fig.

7a). No entanto, na superfície da encosta são predominantes sedimentos originados da erosão diferencial dos distintos litotipos da Formação Morro Vermelho (Fig. 6), que incluem desde blocos de rochas, pedregulhos (Figs. 7b, 7c), passando por areia, até silte e argila (Figs. 7d, 7e).

A partir da caracterização geotécnica dos materiais inconsolidados (Fig. 7d, e, Tabela 1) foi determinado que se trata de sedimentos arenosos-siltosos, com altos teores de umidade, baixos limites de liquidez e caracterizados por serem não-plásticos. A amostra 06, coletada na desembocadura da voçoroca, apresenta a maior proporção de argila (26%), umidade higroscópica (12,7) e limite de liquidez (40,5%) (Tabela 1). Também foram identificados pedregulhos que preservam características das rochas originais, incluindo minerais como olivinas e estruturas vesiculares. As amostras foram coletadas de profundidades superficiais, variando entre 1 a 50 cm. Os sedimentos coletados demonstram um baixo grau de evolução pedogenética, sendo predominantemente de natureza saprolítica.

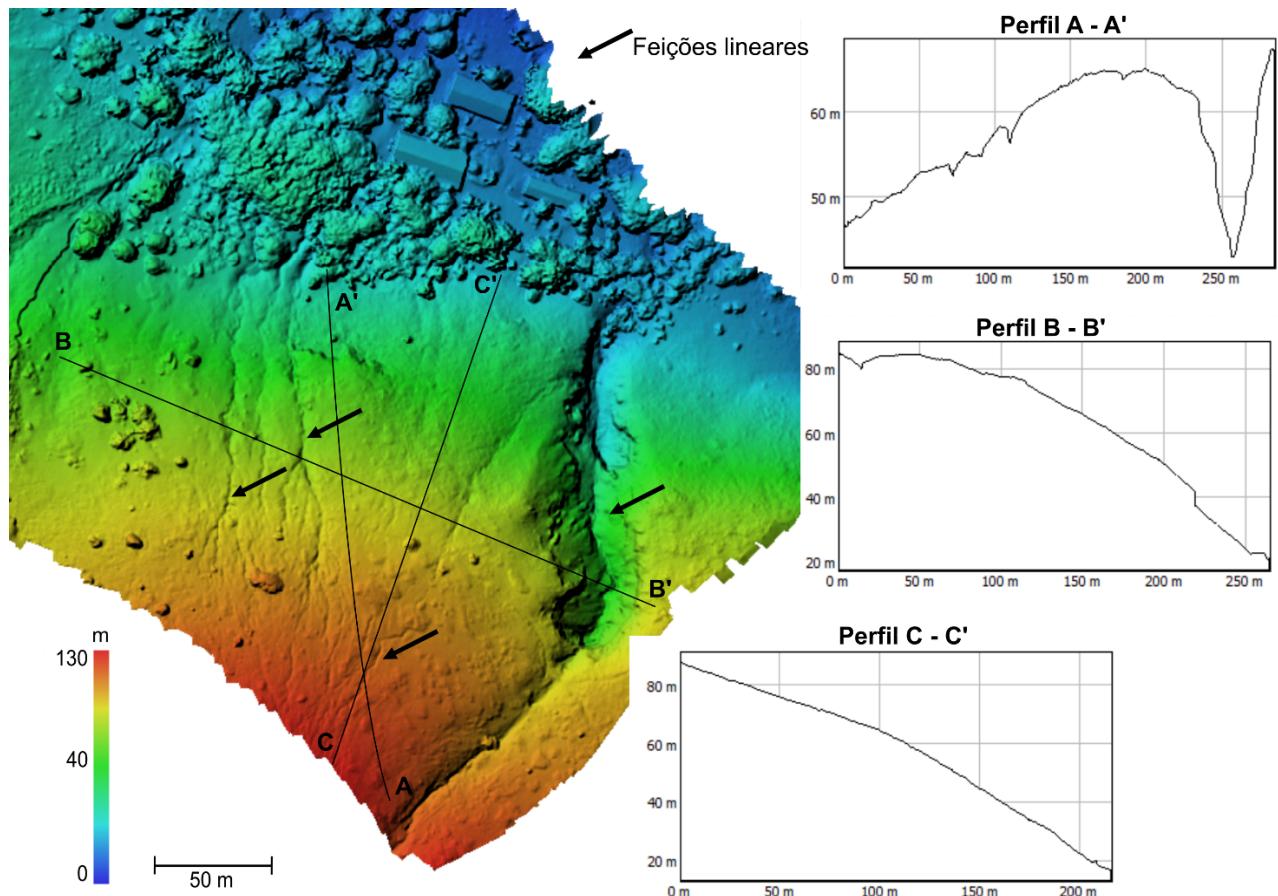


Figura 5 – Modelo digital de elevação e perfis topográficos da encosta monitorada.

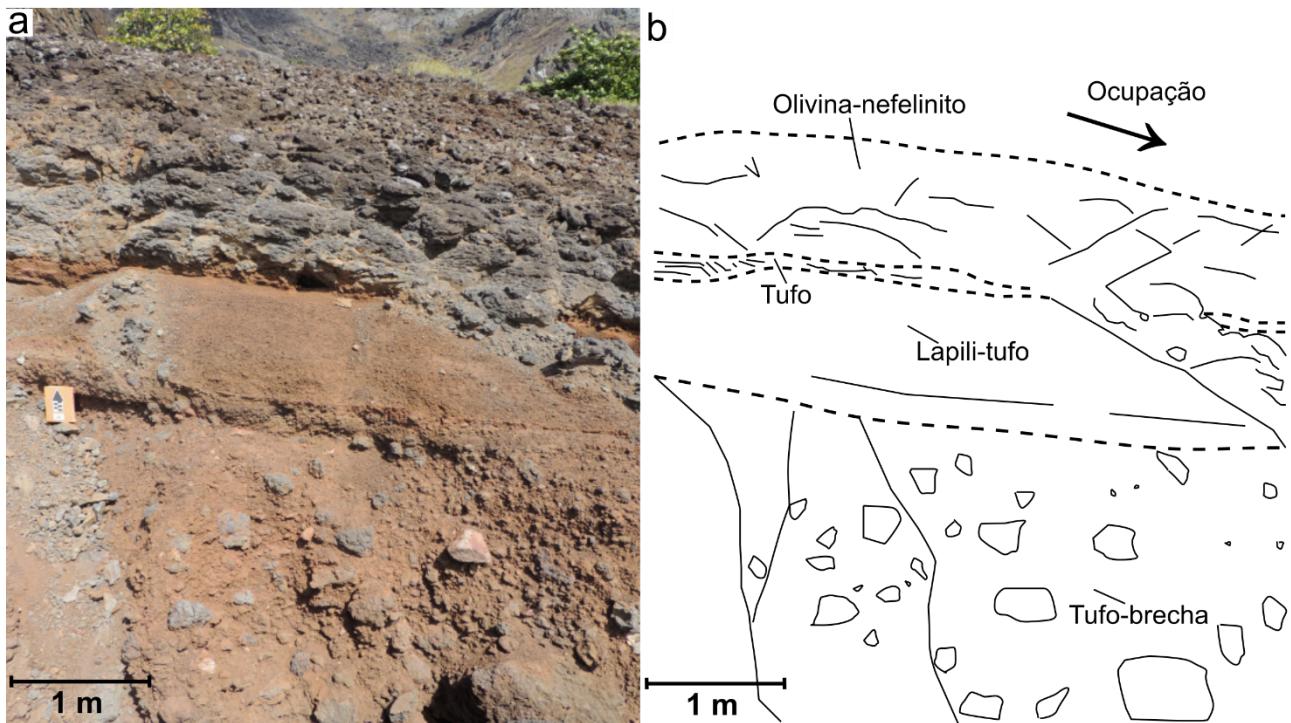


Figura 6 – (a) Fotomosaico e (b) interpretação de afloramento representativo da erosão diferencial das camadas da Formação Morro Vermelho, onde se observa tufo-brecha na base, sobreposta por camadas de lapili-tufo, tufo e nefelinito.

Tabela 1 – Textura, umidade higroscópica (H), índice de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) dos materiais inconsolidados coletados.

Amostra	Textura (%)				H (%)	LL (%)	LP (%)
	Argila	Silte	Areia	Pedregulho			
1	10,8	31,2	41,3	16,5	8,9	27,5	NP
2	10,3	29	40	20	6,7	25,7	NP
3	7,3	23	45,3	24,2	4,6	26,3	NP
4	3,8	5	19,4	17,7	9,4	25,8	NP
5	10,3	35,3	47,4	6,9	6,3	26	NP
6	26	25,7	44,8	3,4	12,7	40,5	NP

NP = não plásticos.

As análises químicas revelaram mineralogia uniforme entre as amostras selecionadas. Destaca-se abundância de minerais ferrosos, como hematita e magnetita, seguida por minerais magnesianos e cáticos, com fosfato presente em menor proporção. Análises por FRX confirmaram a homogeneidade, evidenciando elevados teores de sílica (SiO_2) e ferro (Fe_2O_3). Nota-se também uma presença significativa de magnésio (MgO) e fósforo (P_2O_5).

4.2 Episódios de chuvas e geração de sedimentos

O monitoramento detalhado da área foi realizado durante 50 dias, de abril a junho de 2019. As chuvas com distribuição intermitente e assimétrica foram registradas de 2 a 20 de maio, com total acumulado de 920 mm e duração total de 410 minutos (Tabela 2). Em relação a variação da precipitação e classificação das chuvas, a maior parte dos dias apresentou chuvas fraca a relativamente forte. A exceção foram três dias classificados como chuva extrema, onde a quantidade

de precipitação nestes dias destaca-se drasticamente em comparação com os outros dias (Tabela 2, Figs. 8, 9 e 10). A intensidade da chuva permaneceu constante na maior parte dos dias (2,3 mm/min, 2,7 mm/min ou 1,7 mm/min), exceto nos dias de chuvas classificadas como extrema. Embora a intensidade possa ser um fator, a duração da chuva (94 min, 108 min, e 158 min) foi crucial para a acumulação significativa da precipitação nos dias de chuva extrema. Além disso, entre os dias 18 e 20 de maio, a Ilha da Trindade foi afetada por tempestade oceânica severa que resultou no acumulado total de 488,8 mm de chuva, distribuídas ao longo de 46 horas e 47 minutos, com duração total de 280 minutos.

Nos 14 dias chuvosos, sedimentos acumularam-se na parcela experimental de 3 m² em cinco ocasiões, atingindo um total de 3055 g (Tabela 2). Tal geração de sedimentos esteve relacionada com os dias de maiores precipitações e principalmente com as chuvas

classificadas como extremas e, secundariamente, com a chuva relativamente forte. Nos dias em que ocorreram chuvas extremas, observa-se uma quantidade significativa de partículas acumuladas, 1181 g no dia 08, 553 g no dia 18 e 913 g no dia 20 de maio, que

representam taxas de aproximadamente 4, 1,7 e 1,9 g/m²/min, respectivamente. A seguir foram sumarizados os três dias nos quais as chuvas foram classificadas como extremas, destacando também os registros de maior acumulado total e de transporte de sedimentos.

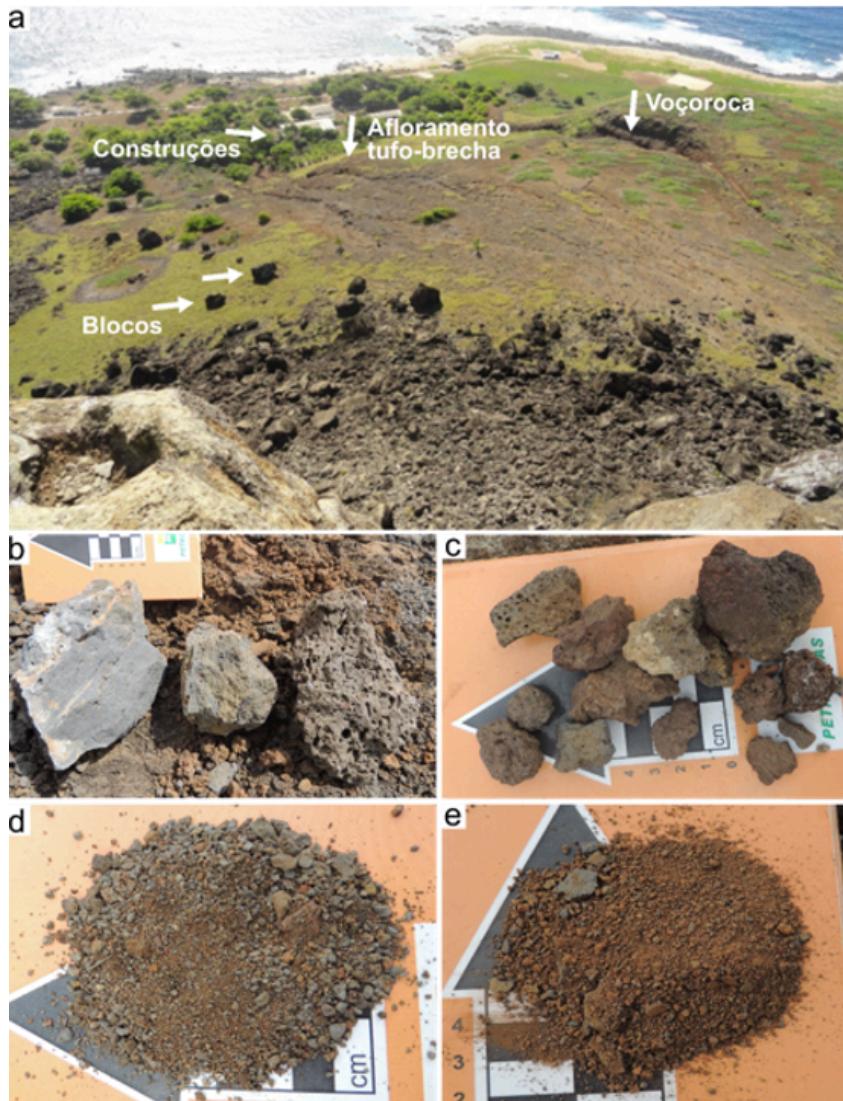


Figura 7 – Sedimentos predominantes na superfície da encosta monitorada: (a) visão panorâmica da encosta a montante das construções, com destaque para as feições lineares que coincidem com drenagens efêmeras, principais vias de transporte de sedimentos por escoamento superficial. Os sedimentos erodidos, resultantes principalmente da erosão diferencial da Formação Morro Vermelho, incluem (b) fragmentos de rochas; (c) pedregulhos e (d – e) areia, silte e argila, com pedregulhos.

No dia 8 de maio foi registrado o maior acumulado de chuva de todo o período de monitoramento, totalizando 344 mm de chuva, distribuídas de forma irregular ao longo de 15 horas e 37 minutos, com uma duração total de 94 minutos (Fig. 8, Anexo 1). Foi constatado grande variação na intensidade da chuva ao longo do dia (Anexo 1). Embora a intensidade mínima se manteve constante em 2,7 mm/min, a máxima e a média flutuaram, indicando variações na severidade das chuvas em diferentes horários. Isto reflete a natureza dinâmica das condições atmosféricas durante este evento chuvoso extremo.

Neste contexto, o horário das 06:00 apresentou um pico notável de precipitação, com 114,5 mm em 26 minutos e uma intensidade máxima de 13,3 mm/min — a mais alta registrada no dia. Por sua vez, o horário das 14:00 registrou um acumulado total de 66,6 mm, com duração de 14 minutos e a maior intensidade média do dia, alcançando 4,7 mm/min. Esses dois momentos contribuíram significativamente para o volume total de precipitação do dia, destacando a importância de eventos breves, mas severos, na contribuição para a erosão hídrica da ilha, especialmente considerando a quantidade de sedimento coletado nesse dia (Tabela 2, Fig. 8)

Tabela 2 – Registro de chuvas, transporte de sedimento fino e ativação de drenagem efêmera na encosta a montante da ocupação da Ilha da Trindade, com ocorrência de chuvas entre os dias 2 e 20 de maio de 2019, durante o período de monitoramento.

Dia	Precipitação (mm)	Duração (min)	Intensidade (mm/min)		Classificação da chuva (INMET mm/diário)	Estimativa de partículas acumuladas (g)	Drenagens efêmeras ativas
			Mínima	Máxima			
02/mai	2,1	1	2,3	2,3	chuvisco	0	Não
03/mai	0	0	0	0	-	0	Não
04/mai	11,5	5	2,3	2,3	moderada	0	Não
05/mai	6,9	3	2,3	2,3	fraca	0	Não
06/mai	0	0	0	0	-	0	Não
07/mai	5,4	2	2,7	2,7	fraca	0	Não
08/mai	343,6	94	2,7	13,3	extrema	1181	Sim
09/mai	0	0	0	0	-	0	Não
10/mai	0	0	0	0	-	0	Não
11/mai	0	0	0	0	-	0	Não
12/mai	35,1	13	2,7	2,7	forte	237	Sim
13/mai	16,2	6	2,7	2,7	relativamente forte	110	Sim
14/mai	5,1	3	1,7	1,7	fraca	0	Não
15/mai	1,7	1	1,7	1,7	fraca	0	Não
16/mai	1,7	1	1,7	1,7	fraca	0	Não
17/mai	1,7	1	1,7	1,7	fraca	0	Não
18/mai	181,2	108	1,7	3,3	extrema	553	Sim
19/mai	22,7	14	1,3	2,7	relativamente forte	61	Sim
20/mai	285	158	1,3	4	extrema	913	Sim
Total	920	410				3055	

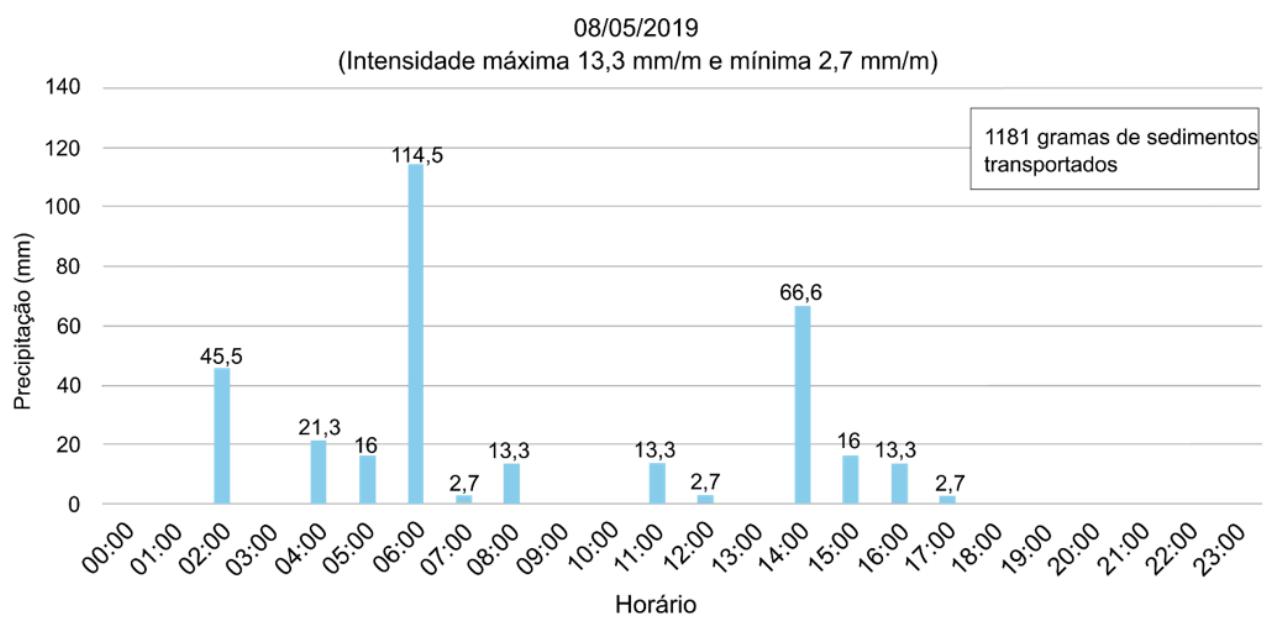


Figura 8 - Distribuição da precipitação ao longo do dia 08 de maio de 2019.

No dia 18 de maio foi registrado o terceiro maior acumulado de chuva, totalizando 181,2 mm de chuva ao longo de 108 minutos (Fig. 9). Os dados revelaram consistência da intensidade mínima e máxima de 1,7 mm/min — com exceção das 11:00 e 14:00 os quais ocorreram picos de 3,33 mm/min (Anexo 1). Há uma

tendência de aumento na quantidade total de precipitação da manhã para o início da tarde (08:00 às 14:00), alcançando o pico às 10:00 e 11:00, antes de começar a diminuir novamente. Isto pode indicar a passagem de um sistema meteorológico específico ao longo do dia. A intensidade média se manteve

relativamente estável durante o dia com 1,6 mm/min, com máxima de 1,9 mm/min e mínima de 1,3 mm/min.

O dia 20 de maio caracteriza-se como o segundo mais chuvoso do período monitorado, apresentando uma distribuição irregular das chuvas ao longo do dia. Neste dia, foi registrado o total de 284,8 mm de precipitação em um intervalo de 20 horas e 5 minutos, perfazendo duração efetiva de chuva de 158 minutos (Fig. 10). Notavelmente, o horário das 19:00 se destaca com o maior acumulado de 118,5 mm e a duração mais longa de 53 minutos, apresentando também a intensidade máxima de 4 mm/min (Fig. 10, Anexo 1). Este pico sugere um momento de intensificação significativa do evento chuvoso, potencialmente indicando a passagem da parte mais ativa de um sistema de chuva.

A maioria dos horários apresentou uma intensidade mínima constante de 1,3 mm/min. No entanto, em momentos específicos (06:00, 13:00, 18:00, 19:00, 20:00, e 21:00), a intensidade máxima aumentou (alcançando 4 mm/min em 06:00 e 19:00), indicando episódios de chuva mais intensa. Tais variações na intensidade em momentos específicos destacam a ocorrência de eventos isolados de chuva mais intensa, intercalados com períodos de precipitação mais leve e uniforme. A duração dos eventos chuvosos variou significativamente ao longo do dia, desde períodos curtos de 1 minuto (às 12:00, 14:00, 17:00) até o evento prolongado de 53 minutos às 19:00. Além disso, foi constatado o aumento de intensidade e acumulado de chuva à noite. A partir das 18:00, houve uma tendência de aumento tanto na intensidade quanto na precipitação de chuva, culminando no pico às 19:00.

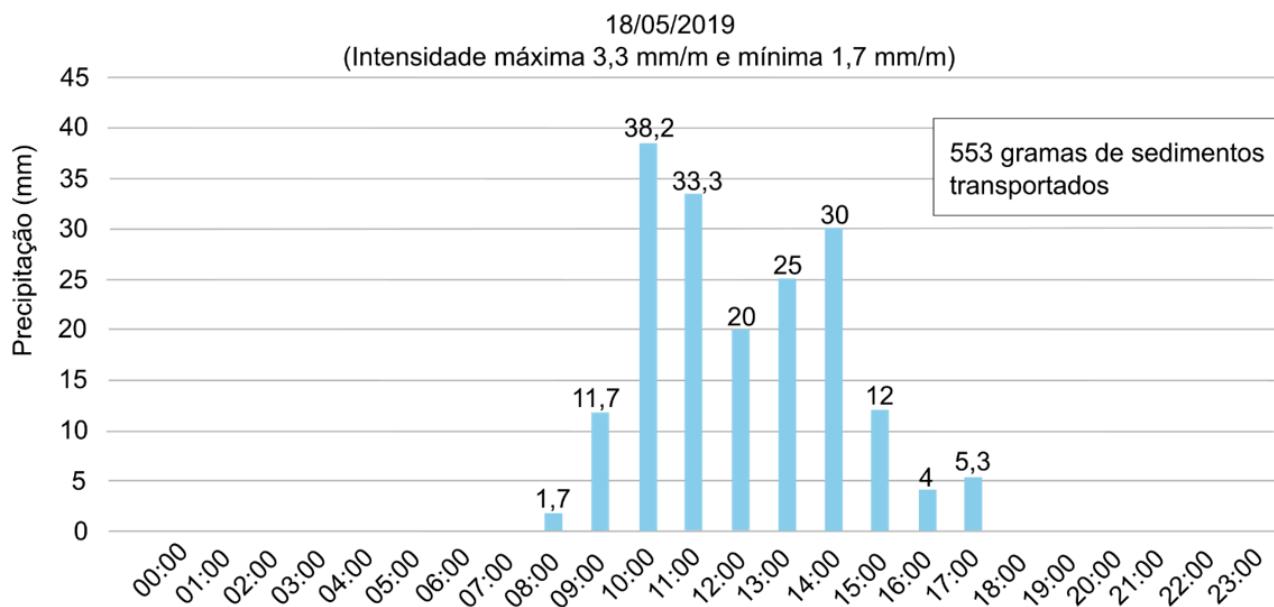


Figura 9 - Distribuição da precipitação ao longo do dia 18 de maio de 2019.

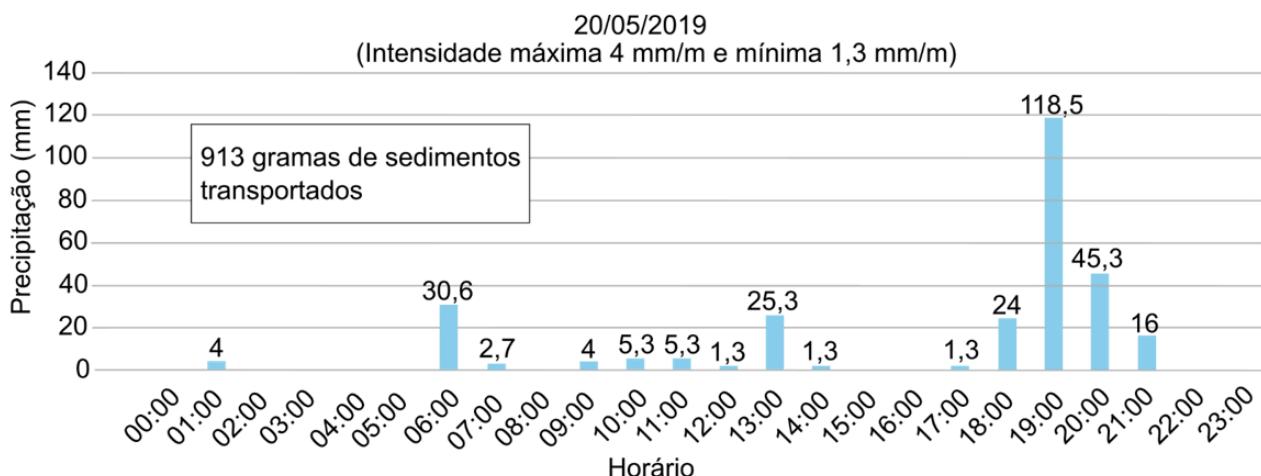


Figura 10 - Distribuição da precipitação ao longo do dia 20 de maio de 2019.

A área de estudo é marcada pela ausência de vegetação relacionada às feições erosivas lineares e drenagens efêmeras que, durante os eventos de chuva

com precipitação, duração e intensidade suficientes, promovem o escoamento superficial. Tal processo resulta no transporte de sedimentos que variam desde

granulação fina (silte, argila e areia) até pedregulhos (Fig. 7), depositando-os nas praias e áreas construídas (Fig. 11). Os resultados demonstraram que as drenagens efêmeras foram ativadas em dias de chuvas classificadas como predominantemente extremas, alinhando-se com os eventos de maior precipitação, duração e intensidade, bem como nos dias que foram registrados acúmulo de partículas (Tabela 2). Os

eventos de chuva registrados nos dias 8 e 20 de maio de 2019 destacaram-se pelo seu caráter destrutivo, causando danos significativos à infraestrutura da área ocupada. Estes danos foram causados pela combinação de fortes ventos com o volume e a intensidade das chuvas. Tais episódios também ativaram as drenagens efêmeras, resultando em fluxos de água expressivos durante e após os eventos de chuva (Figs. 11 b-f).

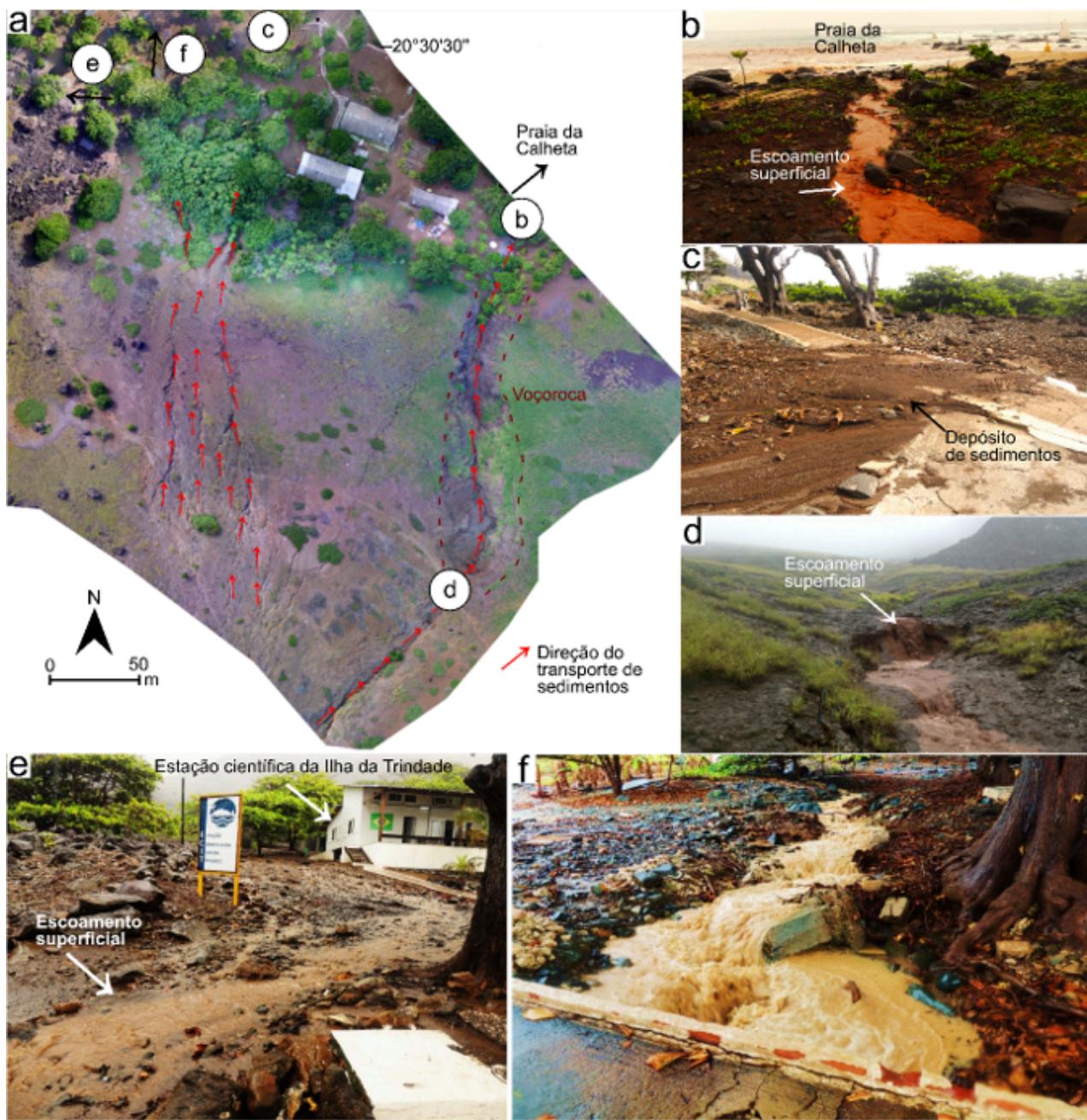


Figura 11 – Escoamento superficial durante os episódios de chuva no período de monitoramento: (a) modelo digital da encosta destacando as feições erosivas lineares, com direções dos fluxos dos sedimentos transportados; (b) drenagem efêmera ativa desaguando na praia da Calheta. Nota-se o escoamento superficial transportando lama, silte, areia (visível pela coloração vermelha da água), além de pedregulhos, folhas e galhos; (c) transporte de sedimentos finos, areia e pedregulhos via escoamento superficial, com deposição em áreas próximas às construções; (d – f) ativação de drenagem em resposta às chuvas.

5. Discussões

Este estudo detalhou a complexidade da encosta próxima à ocupação na Ilha da Trindade, abordando aspectos como relevo, substrato rochoso, materiais inconsolidados e a dinâmica entre as chuvas e o transporte de sedimentos por escoamento superficial. Notavelmente, a região se distingue pela densidade de feições lineares (Fig. 11a), indicativas de erosão hídrica acelerada. Comparando os dados de chuva de maio de 2019 com os registros históricos da EMIT de 1974 a 2010 (Fig. 3), observa-se uma notável discrepância. Neste estudo, foi identificado que o volume total de chuva em um único dia foi 2,7 vezes maior (343,6 mm) e, em 14 dias, foi 7,3 vezes maior (920 mm) do que a maior média mensal registrada nos dados históricos da EMIT (126 mm). Importante destacar que o total de precipitação observado durante o período de monitoramento assemelha-se à média anual histórica de 921 mm.

Este contexto sugere que os eventos extremos de chuva na Ilha da Trindade, influenciados pela sua posição geográfica, podem estar associados a fenômenos climáticos episódicos como ciclones extratropicais, linhas de instabilidade e frentes frias, conforme indicado por Cavalcanti et al. (2009). Tais fenômenos climáticos podem ultrapassar os limites dos padrões históricos e intensificar o processo de erosão (p.ex., Gomes et al. 2021; Santos et al. 2010). É importante destacar que o evento de chuva no dia 20 de maio alcançou seu pico durante a noite. Levando em consideração que eventos extremos de chuva podem desencadear episódios de movimentos de massa gravitacionais (p.ex., Iverson 2000; Nguyen et al. 2013; Marengo et al. 2024), que por sua vez podem resultar em vítimas, isto representa um alerta significativo para a ocupação na Ilha da Trindade. Além disso, a direção do fluxo das encostas a montante, que incluem blocos de rocha de tamanho métrico a decamétrico, coincide com as instalações da área ocupada.

Especificamente em ilhas vulcânicas de clima tropical, as chamadas chuvas erosivas apresentam características complexas dentro do evento, trazendo consequências significativas para o risco de erosão. Como apontado por Nel et al. (2016), em ambientes de ilhas tropicais, a distribuição da chuva durante a tempestade é crucial para a modelagem precisa da perda de solo. Portanto, ressalta-se a importância do registro contínuo e da disponibilidade de dados de chuva, permitindo a incorporação de padrões de chuvas extremas em modelos de evolução erosiva e de riscos geológicos na Ilha da Trindade.

A erosão hídrica é um dos principais fatores de desgaste das ilhas oceânicas, especialmente daquelas com altitudes elevadas e com ocorrência de chuva orográfica, contribuindo para o transporte de sedimentos até as regiões costeiras (Draut et al. 2009, Ferrier et al. 2013). O regime de erosão fluvial, seja perene ou efêmero/torrencial, influencia a distribuição

dos sedimentos no espaço e no tempo, impactando, consequentemente, os processos costeiros (Ramalho et al. 2013). Nesse contexto, os resultados das taxas de produção de sedimentos correlacionados com as chuvas neste estudo indicam um importante processo de erosão subárea que afeta diretamente a evolução da Ilha da Trindade, contribuindo para a erosão das encostas e desempenhando um papel decisivo no ciclo de produção e transporte de sedimentos em direção à costa. A correlação entre os registros de campo obtidos durante as chuvas, os dados coletados pelo pluviógrafo digital e as medições da parcela experimental viabilizou a obtenção de dados preliminares sobre a geração de sedimentos. Os dados forneceram estimativas iniciais da taxa de erosão decorrente dos episódios de chuva, além de elucidar o papel no transporte de sedimento das drenagens efêmeras e locais de deposição. É essencial a continuidade deste estudo para possibilitar a coleta de dados da taxa de erosão em diferentes períodos do ano, inclusive em épocas de chuvas menos intensas. Ampliar o estudo para mais bacias hidrográficas da ilha é crucial para estimar a taxa de erosão anual de forma abrangente (p.ex., Hildenbrand et al. 2008; Boardman & Evans 2020; Carretta et al. 2021).

Além de fatores exógenos, como as chuvas, a formação de feições erosivas e as correspondentes taxas de erosão são influenciadas por uma variedade de outros elementos, incluindo a litologia, a tectônica, a vegetação e o impacto humano, conforme descrito por Lupia-Palmieri (2004). No presente estudo, a erosão diferencial é marcante no substrato rochoso da Formação Morro Vermelho, favorecendo os processos de erosão hídrica. Além disso, destaca-se que os resultados das análises dos materiais inconsolidados demonstraram pouca evolução pedogenética dos materiais devido a preservação de características das rochas fontes, estas provenientes principalmente da Formação Morro Vermelho.

Apesar do sedimento localizado na voçoroca submetido às análises geotécnicas revelar frações mais argilosas e maiores limites de liquidez, os sedimentos, em geral, possuem granulometria arenosa, altos teores de umidade, baixos limites de liquidez, não são plásticos e são escassos em argilominerais. A ausência de argilominerais pode ser atribuída a ausência de um intemperismo químico avançado ocasionado pelas altas taxas de erosão e declividade da área. Já os valores relativamente altos de umidade podem ser explicados pela presença de minerais amorfos no solo. Considerando estas características, a região estudada pode ser considerada muito suscetível a erosão hídrica.

6. Conclusões

No período investigado, constatou-se que o relevo da ilha está submetido a uma intensa fase de erosão hídrica, na qual o escoamento superficial das chuvas emerge como agente geológico de significativa

importância. Os eventos climáticos episódicos e de curta duração, marcados por chuvas classificadas como extremas, atuam no transporte e deposição dos materiais inconsolidados. A Formação Morro Vermelho exibe feições erosivas lineares, que abrangem desde estágios iniciais até erosões lineares profundas, como as voçorocas. Este cenário enfatiza a necessidade premente de implementar estratégias para conter o avanço da erosão nesta região, com especial atenção às camadas de tufo-brecha, com o objetivo de proteger as áreas habitadas contra possíveis movimentos de massa gravitacionais induzidos pela erosão hídrica. Por fim, o monitoramento realizado se demonstrou promissor e o período do ano escolhido foi o ideal para mensurar os impactos das tempestades oceânicas na dinâmica e evolução do relevo na região ocupada.

Agradecimentos

Agradecemos aos revisores pelos comentários construtivos. Ao Laboratório de Estudos Costeiros da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela infraestrutura e equipamentos. A Marinha do Brasil pela logística dos trabalhos de campo. Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPQ) e Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM) pelo apoio financeiro através dos projetos 557141/2009-5, 457714/2013-1, 442865/2015-5 e 443254/2019-2. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos da pesquisadora FAS (88882.382069/2019-01). Ao CNPQ pela bolsa de produtividade em pesquisa 311837/2022-0 de RJA e 314836/2023-3 de MCS, e a UFPR pela bolsa sênior de RJA. Ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME), pertencente ao Departamento de Construção Civil – UFPR pela infraestrutura para realizar os ensaios geotécnicos e ao Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR-UFPR) pelas análises químicas dos sedimentos.

Declaração de autoria

F. A. S.: Conceptualization, Data curation, Investigation, Methodology, Formal Analysis, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization

A. A. T.: Conceptualization, Supervision, Methodology, Writing – review & editing

L. V. Z.: Conceptualization, Supervision, Methodology, Writing – review & editing

R. M. S. P.: Methodology, Formal Analysis

R. J. A.: Conceptualization, Funding acquisition, Project administration, Supervision, Resources, Writing – original draft, Writing – review & editing

M. C. de S.: Conceptualization, Funding acquisition, Project administration, Supervision, Resources, Visualization

Referências

- 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 cenozóico no Atlântico Sul, in: Sítios Geológicos e Paleontológicos Do Brasil. pp. 369–377.
- 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 paleoniveis marinhas 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.
- 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 Pelée Volcano (Martinique, Lesser Antilles). *Bull. Soc. Geol. Fr.* 184 (1–2), 137–154. <https://doi.org/10.2113/gssgbull.184.1-2.137>
- BOARDMAN, J., EVANS, R. 2020. The measurement, estimation and monitoring of soil erosion by runoff at the field scale: Challenges and possibilities with particular reference to Britain. *Progress in physical geography: earth and environment*, 44(1), 31-49.
- 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 Martin Vaz e do Monte Columbia. Diário Oficial da União, Seção 1, nº54, ano CLV, 20 de março de 2018.
- CARRETTA, L., TAROLLI, P., CARDINALI, A., NASTA, P., ROMANO, N., MASIN, R. 2021. Evaluation of runoff and soil erosion under conventional tillage and no-till management: A case study in northeast Italy. *Catena*, 197, 104972.
- CASTILLO, C., GÓMEZ, J. A. 2016. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, 160, 300-319.
- CAVALCANTI, I.F.A., FERREIRA, N.J., DIAS, SILVA, M.G.A.J. DA, DIAS, M.A.F. Da. 2009. *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 13, 197-212.
- DHN - DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. 2011. Imagem aérea Escala 1:10.000.
- DRAUT, A. E., BOTHNER, M. H., FIELD, M. E., REYNOLDS, R. L., COCHRAN, S. A., LOGAN, J. B., STORLAZZI, C.D., BERG, C. J. 2009. Supply and dispersal of flood sediment from a steep, tropical watershed: Hanalei Bay, Kaua'i, Hawai'i, USA. *Geological Society of America Bulletin*, 121(3-4), 574-585.
- HILDENBRAND, A., GILLOT, P. Y., MARLIN, C. 2008. Geomorphological study of long-term erosion on a tropical volcanic ocean island: Tahiti-Nui (French Polynesia). *Geomorphology*, 93(3-4), 460-481.
- FERRIER, K. L., HUPPERT, K. L., & PERRON, J. T. 2013. Climatic control of bedrock river incision. *Nature*, 496(7444), 206-209.
- FIGUEIREDO, C. A., BONGIOLO, 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.
- FISHER, R. V. 1961. Proposed classification of volcaniclastic 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.
- 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.
- GOMES, D. J. C., DA SILVA, L. P., FERREIRA, N. S., DA COSTA LOBATO, R. R., DE OLIVEIRA SERRÃO, E. A., DE LIMA, A. M. M. 2021. Impactos climáticos na erosão hídrica do solo para a Amazônia ocidental. *Revista Brasileira de Climatologia*, 28, 242-265.
- KERGUILLEC, R., AUDÈRE, M., BALTZER, A., DEBAINE, F., FATTAL, P., JUIGNER, M., LAUNEAU, P., MAUFF, B. L.,

- LUQUET, F., MAANAN, M., POUZET, P., ROBIN, M., ROLLO, N. 2019. Monitoring and management of coastal hazards: Creation of a regional observatory of coastal erosion and storm surges in the pays de la Loire region (Atlantic coast, France). *Ocean & Coastal Management*, 181, 104904.
- IVERSON, R. M. 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water resources research*, 36(7), 1897-1910.
- LÓPEZ-SAAVEDRA, M., MARTÍ, J. 2023. 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 & New York.
- LUZ, F.R. 2019. Análise estratigráfica dos depósitos vulcânicos da Formação Morro Vermelho Ilha Trindade, Trindade, Brasil. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- NEL, W., HAUPTFLEISCH, A., SUMNER, P. D., BOOJHAWON, R., RUGHOOPUTH, S. D., DHURMEA, K. R. 2016. Intra-event characteristics of extreme erosive rainfall on Mauritius. *Physical Geography*, 37(3-4), 264-275.
- NGUYEN, H. T., WIATR, T., FERNÁNDEZ-STEEGER, T. M., REICHERTER, K., RODRIGUES, D. M., AZZAM, R. 2013. Landslide hazard and cascading effects following the extreme rainfall event on Madeira Island (February 2010). *Natural hazards*, 65, 635-652.
- MARENGO, J. A., CUNHA, A. P., SELUCHI, M. E., CAMARINHA, P. I., DOLIF, G., SPERLING, V. B., GONCALVES, D. 2024. Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18th–19th, 2023, in the city of São Sebastião, São Paulo, Brazil: from meteorological causes to early warnings. *Natural Hazards*, 1-28.
- MARINHA DO BRASIL. 2011. Boletim Climatológico Nº 14. Centro de Hidrografia da Marinha, relatório interno. pp. 15.
- MARINOS, V., PROUNTZOPOULOS, G., ASTERIOU, P., PAPATHANASSIOU, G., KAKLIS, T., PANTAZIS, G., LAMBOU, 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.
- MONTEIRO, L. G. P., DOS SANTOS, A. C., PIRES, G. L. C., BARÃO, L. M., ROCHA-JÚNIOR, E. R., BIANCINI, J. R. C., HACKSPACHER, P.C., JÚNIOR, H.I.A., JECK, I.K., SANTOS, J. F. 2022. Trindade Island: evolution of the geological knowledge. In *Meso-Cenozoic Brazilian Offshore Magmatism*, Academic Press, 337-389.
- MOSS, J. L., MCGUIRE, W. J., PAGE, D. 1999. Ground deformation monitoring of a potential landslide at La Palma, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94(1-4), 251-265.
- OSILIERI, P. R. G., DIAS, F. F., DA SILVA, A. L., CUNHA, A. 2013. Uso de modelos digitais de terreno no monitoramento da Praia do Forno, Armação dos Búzios, RJ, Brasil Use of digital terrain models in monitoring Forno beach, Armação dos Búzios, RJ, Brazil. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 4(1-2), 01-08.
- PASQUALON, N. G., DE LIMA, E. F., DOS SANTOS SCHERER, C. M., ROSSETTI, L. D. M. M., DA LUZ, F. R. 2019. Lithofacies association and stratigraphy of the Paredão volcano, Trindade Island, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 380, 48-63.
- 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.
- SANTOS, G. G., GRIEBELER, N. P., DE OLIVEIRA, L. F. 2010. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14, 115-123.
- 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.