

**CARACTERIZAÇÃO DOS FLUXOS DE DETRITOS E DOS
ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS NA BACIA DO RIO
JUQUEHY (SÃO SEBASTIÃO/SP) NO EVENTO DE 19 DE
FEVEREIRO/2023**

Luana Barbosa Damaceno ¹; Jefferson Picanço ²; Alessandra Cristina Corsi³, Marcio Andrade⁴,
Daniel Metodiev⁵, Harideva Marturano Egas⁶

Resumo – O evento pluviométrico extremo de São Sebastião, em fevereiro de 2023 desencadeou diversos escorregamentos translacionais rasos que acabaram por evoluir para fluxos de detritos. A bacia do rio Juquehy é uma bacia pequena, com forma alongada e irregular, com baixo índice de Melton, sendo uma bacia com alto potencial a erosão e com menor susceptibilidade a enchentes rápidas e intensas. No entanto, o inventário indica 753 escorregamentos identificados, com 2144.705 m² de área afetada. Foram descritas as zonas de nucleação, transporte e deposição. As zonas de nucleação são caracterizadas por escorregamentos translacionais rasos, que deixaram expostos um regolito raso e lajes de rocha. O transporte do material pelo fluxo de detritos, consistiu basicamente por solo, rochas e troncos de árvores, que aprofundaram e alargaram canais pré-existent. A deposição desse material ocorreu em zonas de menor declividade, com a deposição de blocos mais proximais, e depois sedimentos finos e troncos nas partes mais distais.

Abstract – The extreme rainfall event in São Sebastião in February 2023 triggered several shallow translational landslides that eventually evolved into debris flows. The Juquehy River basin is a small basin with an elongated and irregular shape, having a low Melton index, which makes it a basin with high erosion potential and less susceptibility to rapid and intense floods. The landslide inventory indicates 753 landslides, totaling 2,144,705 m² of affected area. The nucleation, transport, and deposition zones were described. The nucleation zones are characterized by shallow translational landslides exposing shallow regolith and rock slabs. The material transport by the debris flow consisted of soil, rocks, and tree trunks, which deepened and widened pre-existing channels. The deposition of this material occurred in areas of lower slope, with the deposition of more proximal blocks, followed by fine sediments and logs in the more distal parts.

Palavras-Chave – Eventos pluviométricos extremos; Escorregamentos Translacionais rasos; fluxo de detritos;

¹ Geol., mestranda, Unicamp, l209021@dac.unicamp.br

² Geol., Dr, Unicamp, jeffepi@unicamp.br

³ Geol., Dra, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), accorsi@ipt.br

Geol., Dr, CEMADEN, marcio.andrade@cemaden.gov.br

⁴ Geol., MsC, CEMADEN, daniel.metodiev@cemaden.gov.br

⁵ Geogr, MsC, CEMADEN, harideva.egas@unesp.br

⁶

1. INTRODUÇÃO

Escorregamentos do tipo fluxo são movimentos de massa, canalizados ou não, caracterizados pelo excesso de água, solo e detritos, incluindo árvores e blocos de rocha (Hungre, et al, 2014). Esses eventos causam significativas perdas de vida e danos em áreas afetadas por eventos hidrológicos. Na madrugada de 19 de fevereiro de 2023 um evento hidrológico extremo no litoral norte de São Paulo resultou em um desastre significativo para os municípios atingidos, causando 64 óbitos e perdas sociais e econômicas consideráveis (Defesa Civil de São Sebastião, 2023). A Figura 1 abaixo ilustra a localização da área de estudo, entre as localidades de Jaquehy e Vila Sahy, no município de São Sebastião (SP) com as cicatrizes de escorregamentos e sedimentos depositados pelos fluxos ocorridos em fevereiro de 2023.

O evento de fevereiro/2023 foi desencadeado pela ação de uma frente fria combinado com um Atlântico Sul mais quente do que o normal e o efeito orográfico da Serra do Mar. Uma frente fria que não conseguiu se deslocar mais ao norte devido à formação de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) no sul da região Nordeste do Brasil. Formou-se um frente fria semi-estacionária sobre a região Sudeste, provocando chuvas extremas, que geraram volumes superiores a 500 mm em várias estações pluviométricas, com um acumulado de 617 mm em 12 horas na praia de Barra do Una (Andrade et al., 2024).

A região é marcada pelo contraste entre as planícies costeiras e o relevo íngreme da Serra do Mar, com altitudes que chegam a 800 metros acima do nível do mar, com alto potencial para deslizamentos e fluxos de detritos (Vieira e Gramani, 2015).

No entanto, as características dos movimentos de massa gravitacionais (MMG) desencadeados pela chuva extrema nos colocam outras perguntas: quais as características destes escorregamentos? Como devemos construir os mapas de suscetibilidade e risco de eventos desta magnitude? Qual a sua frequência? Neste trabalho iniciamos com a análise preliminar dos MMG observados, procurando estabelecer suas características, como o inventário, a forma das bacias e as características geológico-geotécnicas do regolito.

A área selecionada para este estudo é a sub-bacia hidrográfica do rio Jaquehy, escolhida devido à grande ocorrência de fluxos de detritos no evento de 2023 e à ausência de intervenções humanas, preservando as características naturais da região.



Figura 1: Localização da área de estudo, entre as vilas de Jaquehy e Sahy, no município de São Sebastião, litoral norte do estado de São Paulo.

2. MÉTODOS EMPREGADOS

O presente trabalho consistiu numa fase de escritório e uma fase de campo. Inicialmente, foi realizado o inventário dos escorregamentos, contando com a análise de fotografia aérea, obtida no voo realizado por drone em 25 de fevereiro de 2023, logo após o evento, pós desastre, fornecido pelo IDE-SP em 2023, com resolução espacial de 10 cm, disponível no site do Programa de Infraestrutura de Dados Espaciais para o Estado de São Paulo, www.idesp.sp.gov.br.

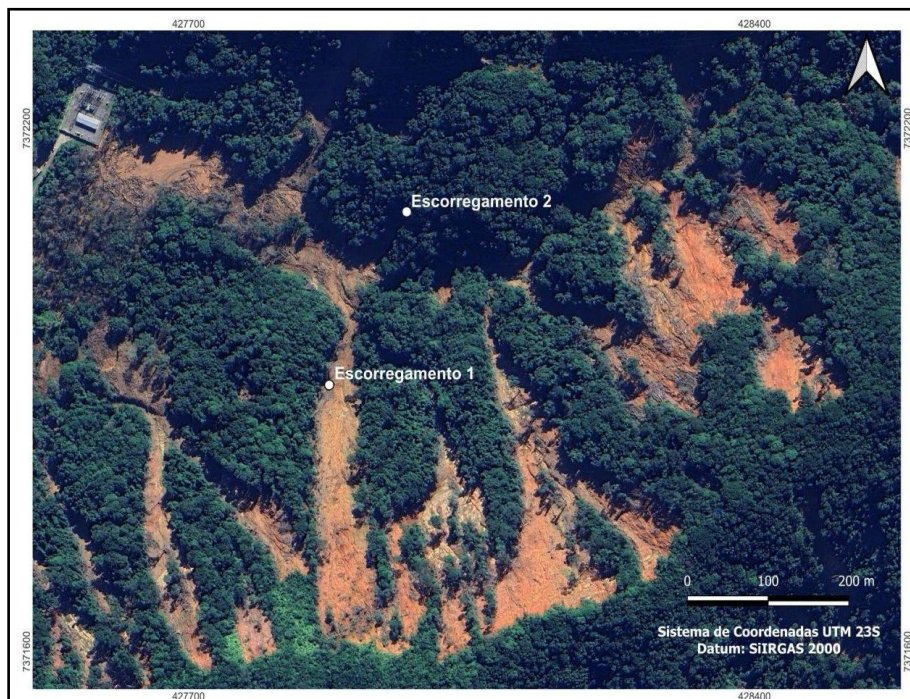


Figura 2: Localização dos pontos de escorregamento amostrados no vale do rio Juquehy.

O modelo digital de elevação utilizado foi o NASADEM, um reprocessamento dos dados da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), melhorados por algoritmos avançados e informações não disponíveis na versão original do SRTM. As lacunas presentes nos dados da SRTM foram refinadas e complementadas com informações de elevação do ASTER GDEM (Simard et al., 2024). O uso do NASADEM possibilitou a visualização detalhada da hipsometria do terreno, permitindo uma delimitação precisa da direção do escorregamento.

Foi realizada uma etapa de campo para reconhecimento e coleta das amostras de solo e sedimentos. Foram amostradas duas cicatrizes, o escorregamento 1 na vertente com caimento para noroeste e o afloramento 2 na vertente com caimento para sudeste (Figura 2, 3)



Figura 3. Apresentação dos pontos amostrados: 3a) Escorregamento 1; 3b) escorregamento 2, mostrando as trincheiras 1 e 2 onde foram coletadas as amostras para o ensaio de cisalhamento.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

3.1. Caracterização geológica/geomorfológica

O vale do rio Juquehy é encaixado, com vertentes maiores e mais íngremes na porção sudeste e menores na vertente noroeste. O maciço em sua parte sul tem uma direção geral alongada WSW - ENE.

A área tem como substrato gnaisses máficos migmatíticos de granulação média alternando com bandas quartzo-feldspáticas pegmatíticas. Existem na área pelo menos três famílias de fraturas, formando fraturas abertas retilíneas e subperpendiculares, delineando um retículo de blocos decimétricos em formato de paralelepípedo. O regolito na vertente com caimento para noroeste (escorregamento 1) é pouco espesso, variando de decímetros a cerca de 3 m de espessura. O saprolito mais profundo que compõe este regolito tem coloração ocre e textura silto-arenosa. O saprolito mais superficial tem textura argilo-siltosa avermelhada. Sobre este regolito temos a deposição de material areno-siltoso com pedregulhos e blocos, formando materiais coluvionares de pequena espessura, em geral decimétrica.

Na vertente analisada com caimento para sudeste (escorregamento 2), o regolito é profundo, tem cor avermelhada e é muito homogêneo. Nas áreas de fundo de vale ocorrem depósitos de sedimentos clasto-suportados nas porções mais proximais às cicatrizes, derivando para sedimentos arenosos a argilo-arenosos a jusante. Existem evidências de depósitos conglomeráticos mais antigos, além de depósitos matriz-suportados de lamas cinzentas com blocos decimétricos a métricos dispersos em seu interior.

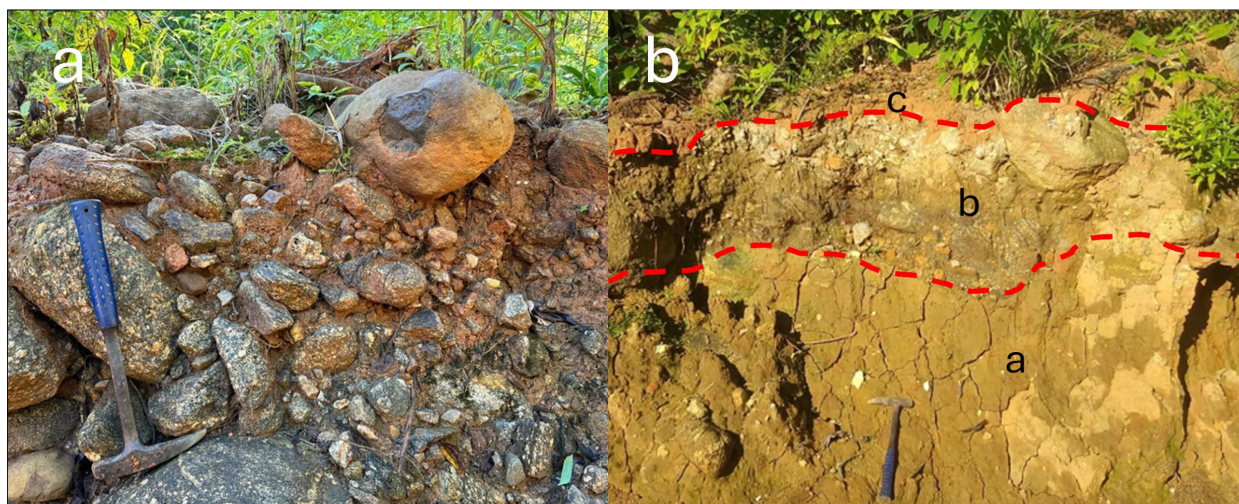


Figura 4. 4a) Depósito de material conglomerático clasto-suportado na zona de deposição do fluxo de detritos, na bacia do rio Juquehy; 4b) depósito na zona de deposição com a) material lamítico com blocos dispersos; b) depósito conglomerático com matriz areno-argilosa; c) solo neoflúvico.

3.2. Morfometria da bacia do Rio Juquehy

A bacia do rio Juquehy (Figura 5), no município de São Sebastião, é uma das bacias hidrográficas do Litoral Norte de São Paulo. Estas bacias são caracterizadas por uma densa rede de rios que nascem na Serra do Mar e deságuam diretamente no Oceano Atlântico. A bacia do rio Juquehy tem uma área de 4,04 km² com um comprimento de 3,01 km. Os demais dados morfométricos obtidos para a bacia estão sumarizados na tabela 1.

O índice de compacidade (Kc), que relaciona o perímetro da bacia com o perímetro de um círculo de mesma área foi de 1,41, indicando que a bacia tem uma forma alongada e irregular. Bacias com Kc > 1,0 tendem a ter um escoamento mais distribuído ao longo do tempo, o que reduz a probabilidade de picos de enchente, pois a água percorre uma distância maior até o exutório. No entanto, a forma alongada pode favorecer a retenção de sedimentos em algumas áreas, sugerindo

que a bacia estudada tem baixa suscetibilidade a inundações. O fator de forma (F_f), que é a relação entre a largura média da bacia e o seu comprimento axial, foi calculado em 0,44. Esse valor sugere que a bacia é mais comprida, o que aumenta o tempo de concentração (T_c) e reduz a intensidade dos picos de vazão. Valores de $F_f < 0,50$ indicam que a bacia não é sujeita a enchentes rápidas e intensas. Já o índice de conformação (F_c), que compara a área da bacia com a área de um quadrado cujo lado é igual ao comprimento axial da bacia, foi de 0,75. Esse valor reforça a característica de alongamento da bacia e sua menor susceptibilidade a enchentes rápidas e intensas.

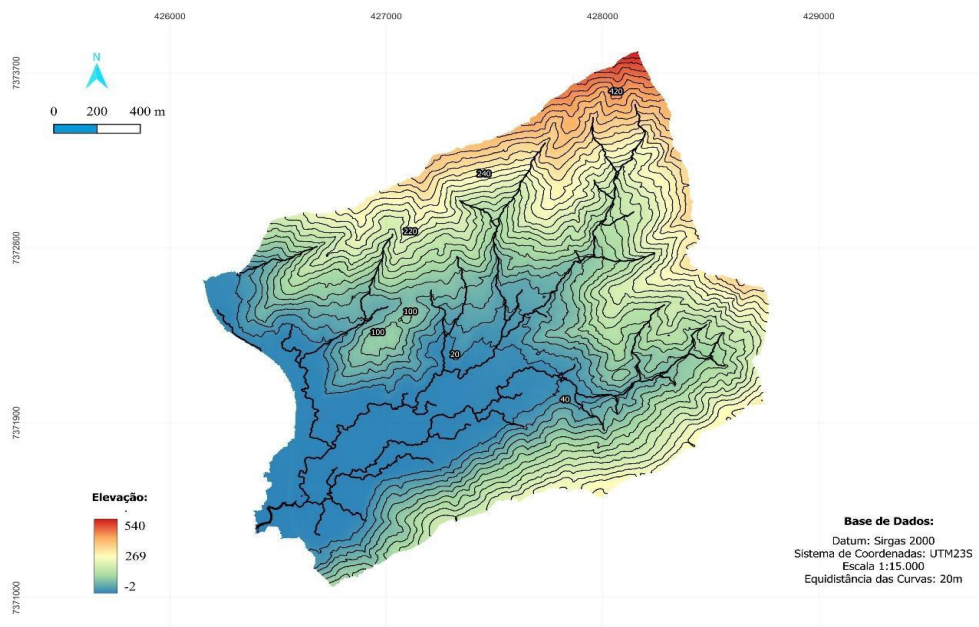


Figura 5: Delimitação da bacia hidrográfica do rio Juquehy.

Tabela 1. Dados morfométricos da bacia do rio Juquehy.

Área	4,04 km ²
Perímetro	10,07 km
Comprimento	3,01 km
Índice de Compacidade (K_c)	1,41
Fator de Forma (F_f)	0,44
Índice de conformação (F_c)	0,75
Gradiente altimétrico (ΔPI)	15,95%
Amplitude altimétrica	0,48 km
Índice de Melton	0,23

O gradiente altimétrico (ΔPI) é calculado como a razão entre a diferença de altitude (desnível) entre dois pontos e a distância horizontal entre esses pontos. Neste estudo, o ΔPI calculado foi de 15,95%, com uma amplitude altimétrica total de 480 metros (0,48km), indicando um relevo fortemente ondulado e muito sujeito à erosão. O índice de Melton calculado para a bacia foi de 0,23, indicando que a bacia apresenta baixa suscetibilidade a eventos extremos, como fluxos de detritos ou enchentes rápidas, sendo caracterizada predominantemente por enchentes normais (Wilford *et al.*, 2004).

3.3. Inventário de cicatrizes

No evento extremo de 18 -19 de fevereiro de 2023 ocorreram diversos tipos e tamanhos de MMG, como pode ser observado na figura 6. Para representar as diferentes zonas dos escorregamentos no mapa, foram adotadas as seguintes cores: azul para a nucleação (área de origem), amarelo para o escoamento (zona de transporte) e vermelho para a deposição (área de acumulação). As áreas de exposição rochosa foram representadas com a cor marrom. Conforme observado em campo, essas rochas tornam-se visíveis após a zona de ruptura (zona de nucleação), onde o regolito, geralmente pouco espesso, é removido.

Na fase de iniciação, foram identificados 762 escorregamentos, cobrindo uma área total de 233.561 m². Na fase de escoamento/transporte, houve 653 escorregamentos, ocupando 1.148.482 m². Já na fase de deposição, registraram-se 662 escorregamentos, com uma área de 762.662 m². No total, as três fases somam 2.144.705 m² de área afetada por movimentos gravitacionais de massa (Tabela 2).

Observa-se também que a concentração e mesmo o tamanho de cicatrizes no evento hidrológico extremo de fevereiro/2023 são maiores nas porções voltadas para o continente do que nas vertentes voltadas para o mar.

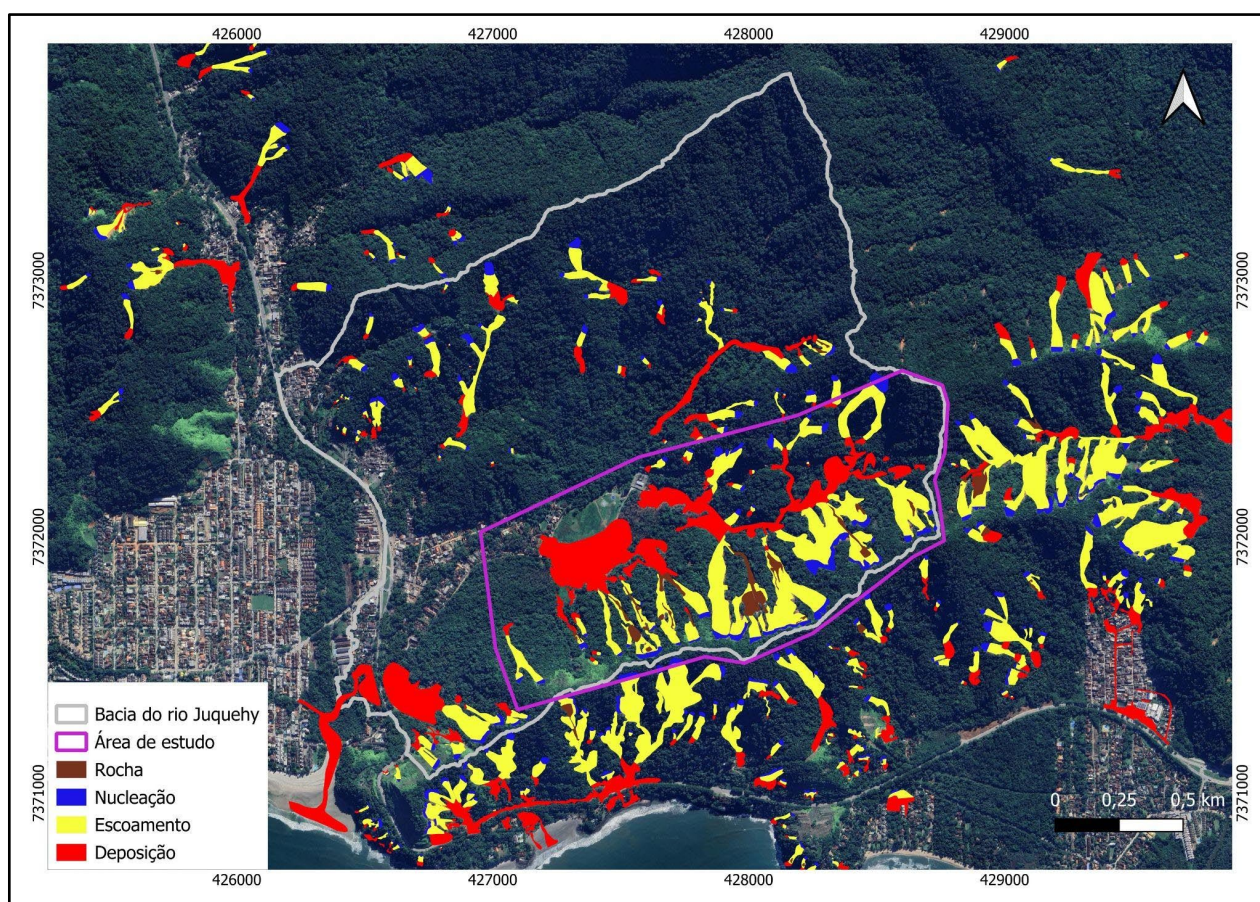


Figura 6: Inventário das cicatrizes do evento de fevereiro/2023, mostrando as zonas de nucleação, erosão e deposição dos movimentos gravitacionais de massa.

Tabela 2: Fases, quantidade e área dos escorregamentos de São Sebastião/SP no presente estudo.

Fases dos escorregamentos	Quantidade de escorregamentos (polígonos)	Área dos escorregamentos (m ²)
Iniciação	762	233.561,00
Escoamento/Transporte	653	1.148.482,00
Deposição	662	762.662,00
Total	-	2.144.705,00

3.4. Caracterização dos movimentos gravitacionais de massa na área da bacia

Os MMGs observados na bacia do rio Juquehy são em sua maioria escorregamentos translacionais rasos, alguns deles evoluindo para fluxos de detritos. Os fluxos de detritos podem ser diferenciados em: a) zona de nucleação, associados a escorregamento translacional raso (figura 7a); b) zona de transporte, com vales encaixados em forma de U (figura 7b) ou escavados em rocha (figura 7c); c) zona de deposição do material (figura 4d). Estas zonas foram delimitadas no inventário da Figura 6, com a delimitação das áreas de cicatrizes com ruptura em solo ou em rocha, demonstrando a zona de ruptura do regolito.

Na zona de ruptura, ocorreram escorregamentos translacionais rasos (figura 7a), transformando-se eventualmente em um fluxo de detritos (*debris flow*). Nas cicatrizes de escorregamentos rasos, na vertente sudoeste, observadas em campo e em imagens de satélite, o substrato dominante nas zonas de ruptura é um regolito arenoso ocre e muito raso. Na porção superior da cicatriz observada em campo (Figura 7a) verifica-se que o material escorregado removeu árvores e arbustos maiores deixando exposto o regolito raso e, nos locais de maior declividade, as cicatrizes expõem rocha sã. Os processos erosivos posteriores ao desastre, originam pequenos sulcos de dimensões decimétricas evoluindo para ravinas de dimensões métricas.

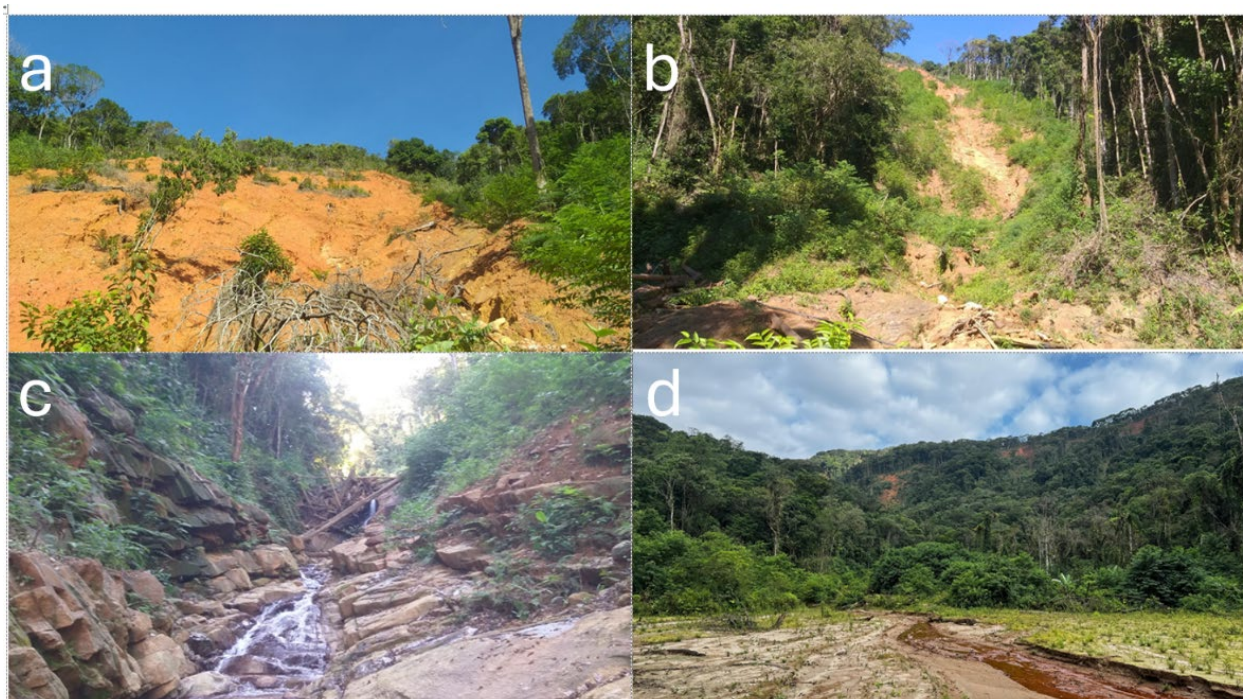


Figura 7. As zonas de nucleação, transporte e deposição na bacia do rio Juquehy: 7a) vista para montante da zona de nucleação; 7b) zona de transporte, expondo regolito e rocha sã; 7c) Vale em U com substrato em rocha, com dique de barramento formado por troncos a montante; 7d) zona de deposição, com a deposição de cascalhos, areias e depósitos argilosos nas áreas de baixa declividade.

Nas zonas de transporte de material houve intensa erosão ao longo do canal durante a passagem do fluxo, que se alargou e, em zonas mais encaixadas das drenagens, expôs a rocha sã, constituída

por um gnaiss por vezes bandado, por vezes com porfiroclastos de feldspato centimétricos. Numerosos barramentos locais, como observado em campo (figura 7c), devem ter contribuído para aumentar a energia do fluxo. À medida que o movimento continuou, a energia diminuiu gradualmente, gerando depósitos de *debris flood*, com a deposição de cascalhos areias e argilas (figura 7d). Os grandes troncos (*debris wood*), que se locomoveram na parte superior do fluxo, também foram depositados nesta área.

Na vertente oposta, com caimento para sudeste, foi observada a cicatriz de provável escorregamento rotacional em regolito de coloração avermelhada (figura 8a, b), mais espesso e homogêneo do que os da vertente noroeste. A rocha deste regolito é aparentemente uma rocha com muita biotita. Ocorre também uma fina camada de colúvio superpondo este regolito.

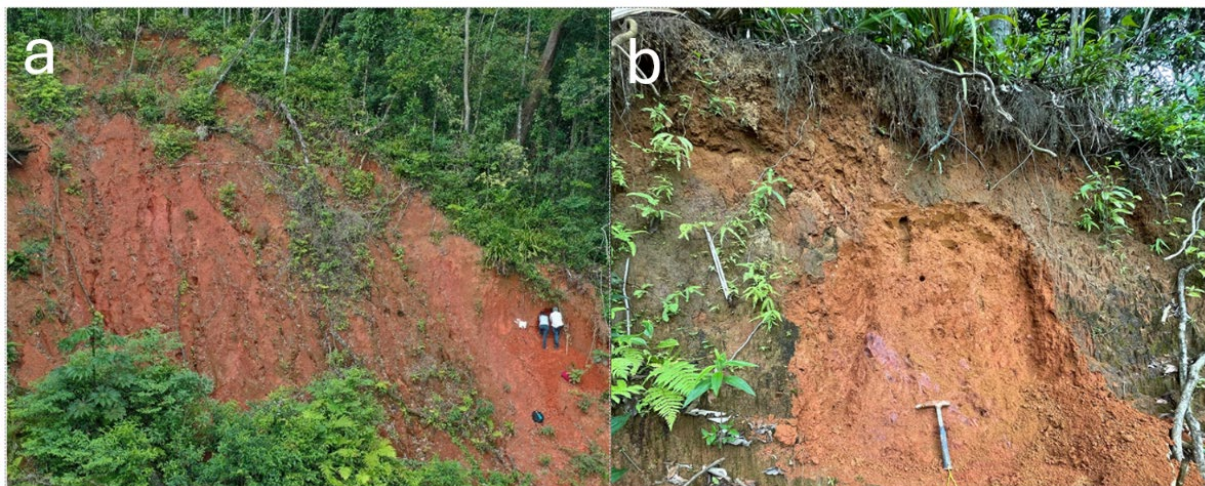


Figura 8. Cicatriz do Escorregamento 2, com caimento para sudoeste: 8a) imagem de drone do escorregamento; 8b) Detalhe do regolito na parte superior da cicatriz.

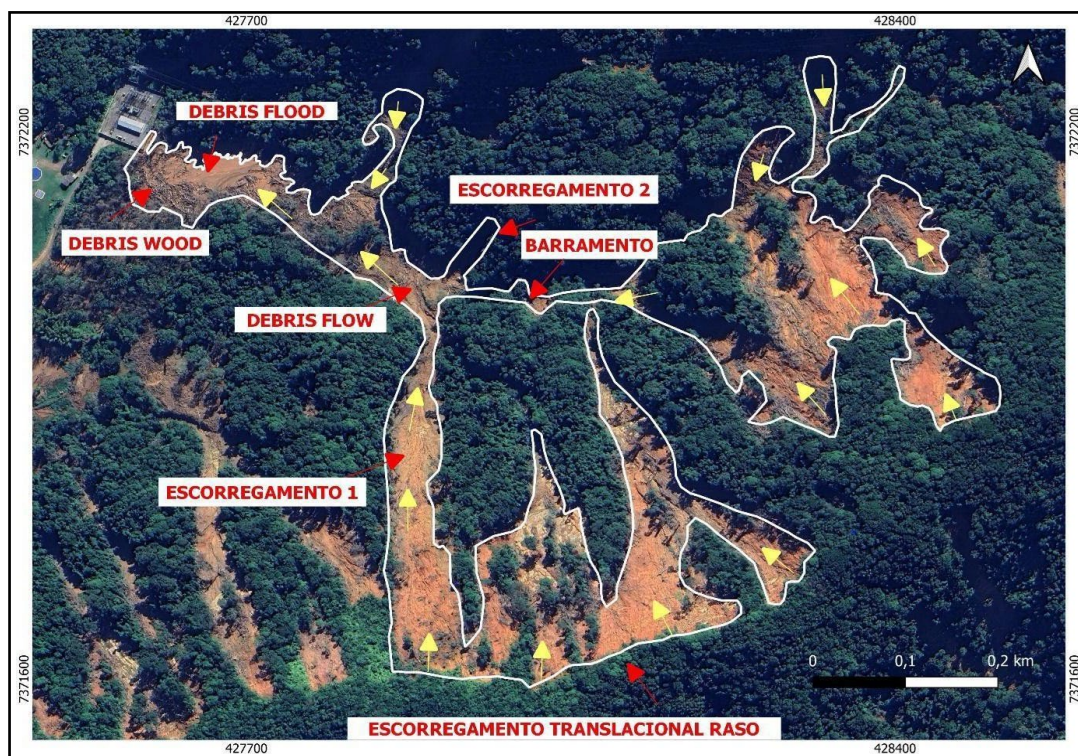


Figura 9. Área dos fluxos de detritos e de enchentes na bacia do rio Jaquehy, apresentando os pontos de amostragem (escorregamentos 1 e 2), as cicatrizes da área de nucleação, assim como as zonas de transporte e deposição do material.

Os movimentos gravitacionais de massa na bacia do rio Jaquehy (figura 9) são predominantemente escorregamentos translacionais rasos, que evoluíram, por coalescência, num fluxo de detritos,

conforme mostrado na figura 6. Este fluxo de detritos caracterizou-se por provavelmente diversas ondas de pico, potencializadas por barramentos formados por troncos. Estes troncos e os sedimentos mais finos formaram uma planície estreita, a partir da qual somente troncos e materiais de enchente puderam passar, alagando partes da vila Juquehy.

1. CONCLUSÕES

A bacia do rio Juquehy é uma bacia pequena, com forma alongada e irregular, com baixo índice de Melton, apesar de ter uma amplitude altimétrica de 480 m. Estas feições a caracterizam como uma bacia com alto potencial a erosão e com menor susceptibilidade a enchentes rápidas e intensas. No entanto, o inventário de escorregamentos realizado indica um total de 753 escorregamentos identificados, com um total de 2.144.705 m² de área afetada.

As zonas de nucleação são caracterizadas por escorregamentos translacionais rasos, que deixaram expostos um regolito raso e lajes de rocha. O transporte do material pelo fluxo de detritos, consistiu basicamente por solo, rochas e troncos de árvores, que aprofundaram e alargaram canais pré-existent. A deposição desse material ocorreu em zonas de menor declividade, com a deposição de blocos mais proximais, e depois sedimentos finos e troncos nas partes mais distais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio ao desenvolvimento deste trabalho, realizado no âmbito do projeto de mestrado da aluna Luana Barbosa Damaceno, bolsista CAPES (nº 88887.833525/2023-00), intitulado “Caracterização geológico-geotécnica dos escorregamentos translacionais rasos na bacia do rio Juquehy (São Sebastião/SP).”

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M.R.M., STABILE, R.A., EGAS, H.M., MENDES, T.S.G., METODIEV, D., & CAMARINHA, P. (2024). Spatial analysis of mass movements observed in the disaster of the northern coast of the São Paulo State, Brazil (2023). Proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE), and 2nd Latin-American Regional Conference of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), La Serena Chile, 2024.
- DEFESA CIVIL DE SÃO SEBASTIÃO (2023) Boletim Informativo sobre Chuvas em São Sebastião. Atualizado às 09h09, em 01/03/2023, in: https://www.saosebastiao.sp.gov.br/emergencia/boletim/012_BOLETIM_EMERGENCIA.pdf
- HUNGR, O., LEROUÉIL, S., & PICARELLI, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167-194.
- MARENGO, J. A., CUNHA, A. P., SELUCHI, M. E., et al. (2024). Chuvas intensas e desastres hidrogeológicos nos dias 18 e 19 de fevereiro de 2023, na cidade de São Sebastião, São Paulo, Brasil: das causas meteorológicas aos alertas precoces. *Natural Hazards*, 120, 7997–8024. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06558-5>
- SIMARD, M., DENBINA, M., MARSHAK, C., & NEUMANN, M. (2024). A global evaluation of radar-derived digital elevation models: SRTM, NASADEM, and GLO-30. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 129(11), e2023JG007672.
- VIEIRA B.C., GRAMANI M.F. (2015). Serra do Mar: The Most “Tormented” Relief in Brazil. In: Vieira B., Salgado A., Santos L. (eds.). *Landscapes and Landforms of Brazil*. World Geomorphological Landscapes Dordrecht: Springer.
- WILFORD, D. J., SAKALS, M. E., INNES, J. L., SIDLE, R. C., & BERGERUD, W. A. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, 1(1), 61-66.