

Mapeamento das Zonas de Transporte e de Deposição de Escorregamentos Rasos por Meio de Ferramentas Semiquantitativas

Mapping Transport and Deposition Zones of Shallow Landslides Using Semi-quantitative Tools

Camilla Pereira Capellaⁱ

Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil

José Eduardo Boniniⁱⁱ

Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil

Bianca Carvalho Vieiraⁱⁱⁱ

Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil

Resumo: A avaliação da suscetibilidade a escorregamentos vem sendo amplamente discutida na literatura. Entretanto, no Brasil, ainda são escassas pesquisas que diferenciam as zonas de ruptura, transporte e deposição decorrentes destes processos. Dessa forma, o objetivo central deste trabalho foi identificar as zonas de transporte e de deposição (*runout*) dos escorregamentos rasos na Serra do Mar, e sua correlação com a morfologia das encostas. Foi selecionada uma bacia hidrográfica, amplamente afetada por escorregamentos rasos, no município de Itaoca (SP), em janeiro de 2014, onde foram analisados, conjuntamente, o inventário de cicatrizes e dois parâmetros morfológicos (ângulo e curvatura da encosta), identificando-se, portanto, limiares entre as zonas de ruptura e transporte/deposição. Os resultados indicaram um maior volume do material transportado em 2014 e uma maior quantidade de zonas potencialmente deposicionais em eventos futuros. Esta avaliação permitiu um maior detalhamento da trajetória dos sedimentos a partir da ruptura, que pode ser usada como instrumento em áreas suscetíveis e densamente ocupadas.

Palavras-chave: Serra do Mar; Cicatrizes; Trajetória dos Sedimentos; Curvatura e Ângulo de Encosta.

ⁱ Graduanda em Geografia. camillacapella@usp.br. <https://orcid.org/0000-0003-4802-7731>

ⁱⁱ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia Física. jose.bonini@usp.br. <https://orcid.org/0000-0001-7060-2830>

ⁱⁱⁱ Professora Doutora II do Depto. de Geografia. biancacv@usp.br. <https://orcid.org/0000-0001-7060-2830>

Abstract: Landslide susceptibility and runout assessments have been widely discussed in the literature. However, there are few works identifying landslide runout zones (transport and deposition) arising from these processes in Brazil. Thus, the objective of this study is to evaluate transport and deposition dynamics of shallow landslides (runout) in the Atlantic Coastal Mountains and their relationship with the geometric characteristics of the slopes. A watershed that was widely affected by shallow landslides in January 2014 in the municipality of Itaoca (SP) was selected for study. Regarding the methodological procedures adopted, a ready-made scar inventory was used, which allowed the evaluation of the morphological parameters of curvature and slope angle, and the establishment of thresholds to produce a runout map for the 2014 event. This kind of evaluation permitted greater detailing sediment trajectory produced by the rupture, which can be used as a planning instrument in susceptible and densely occupied areas.

Keywords: Serra do Mar; Scars; Runout; Curvature and Slope Angle.

Introdução e Objetivo

Os escorregamentos translacionais rasos são movimentos de massa rápidos condicionados por superfícies de ruptura planares, em geral associadas a descontinuidades geológicas, geomorfológicas ou pedológicas em solos pouco espessos (SIDLE; PEARCE; O'LOUGHLIN, 1985; SUMMERFIELD, 2013). No Brasil, os escorregamentos rasos ocorrem de forma frequente sobretudo no compartimento geológico-geomorfológico da Serra do Mar, associados à interação entre eventos pluviométricos prolongados e de alta intensidade e às características geomorfológicas como altas declividades e solos pouco espessos. Destacam-se alguns destes eventos generalizados nos estados de São Paulo (TATIZANA et al., 1975; DE PLOEY; CRUZ, 1979; SELUCHI; CHOU, 2009; VIEIRA; FERNANDES; AUGUSTO FILHO, 2010; VIEIRA; GRAMANI, 2015; GOMES; VIEIRA, 2016; CERRI et al., 2017), Rio de Janeiro (COSTA NUNES, 1969; JONES, 1973; COELHO NETTO et al., 2011; AVELAR et al., 2013; MARQUES; COELHO NETTO; SATO, 2018), Santa Catarina (KOBİYAMA et al., 2011; MICHEL; KOBİYAMA; GOERL, 2014; SBROGLIA et al., 2018) e Paraná (MARTINS, et al., 2020; DIAS; MCDOUGALL; VIEIRA, 2022).

Apesar de os estudos para o entendimento desses processos terem avançado em áreas suscetíveis no Brasil, existem algumas lacunas quanto ao mapeamento e à diferenciação das zonas de ruptura, transporte e deposição das cicatrizes dos escorregamentos. Fato este que merece avaliações mais profundas, pois grande parte das áreas de risco está associada não exclusivamente à ruptura, mas à trajetória do material mobilizado, ou seja, as zonas de transporte e deposição (*runout*), que são controladas pela magnitude dos escorregamentos, pelos mecanismos de propagação, pelas características morfológicas da encosta e pelo material incorporado em seu percurso (VAN WESTEN; VAN ASCH; SOETERS, 2006; COROMINAS et al., 2014; MCDOUGALL, 2017; ZOU et al., 2017; DI NAPOLI et al., 2021)

A trajetória do material mobilizado e a probabilidade temporal de ocorrência de escorregamentos são componentes-chave das análises de perigo espacialmente explícitas (p. ex em escala local e de detalhe), que podem ser avaliados a partir de métodos

empíricos/estatísticos ou racionais/numéricos (RICKENMANN, 2007; COROMINAS et al., 2013; CHAE et al., 2017).

Métodos empírico/estatísticos podem ser: a) geomorfológicos, estimando a trajetória com base em mapeamentos de cicatrizes pretéritas. São mais apropriados para eventos de alta magnitude e baixa frequência que resultam em evidências persistentes de sua ocorrência na paisagem (COROMINAS et al., 2013); b) geométricos, baseados em relações geométricas entre as áreas de iniciação dos processos e deposição, tais como os métodos do ângulo de alcance (HSÜ, 1975) e do ângulo mínimo de sombra (EVANS; HUNGR, 1993); e c) métodos de mudança de volume, que relacionam volume mobilizado e extensão da zona de propagação mapeada, aplicáveis sobretudo a fluxos de detritos (FANNIN; WISE, 2001; COROMINAS et al., 2013).

Já os métodos racionais/numéricos podem ser discretos ou contínuos e variam sobretudo quanto à complexidade da simulação numérica dos diferentes mecanismos de deslocamento dos movimentos de massa (RICKENMANN, 2007). Modelos racionais/numéricos discretos são aplicáveis a movimentos de massa que se deslocam de maneira pontual e relativamente independente (por ex., quedas de blocos) (AGLIARDI; CROSTA, 2003; DORREN et al., 2013). Já modelos contínuos podem simular os mecanismos de deslocamento em duas ou três dimensões a partir de equações matemáticas, sendo, em geral, computacionalmente intensivos (COROMINAS et al., 2003; FELL et al., 2008). Portanto, considerando a importância da identificação desta trajetória e as diferentes abordagens metodológicas, o objetivo deste trabalho foi identificar as zonas de transporte e deposição dos escorregamentos rasos (*runout*), a partir da associação com as características morfométricas das encostas (ângulo e curvatura).

Área Experimental

A área experimental, bacia do rio Gurutuba (25Km²), se localiza no município de Itaoca, litoral sul do estado de São Paulo, sendo um dos principais afluentes do rio Palmital, inserido na bacia hidrográfica do rio Iguape (Figura 1).

O mês janeiro de 2014 registrou um aumento significativo da chuva acumulada, sobretudo entre os dias 9 e 14, com um total de 273mm (DAEE, 2022). Neste mês também se destacaram as chuvas diárias dos dias 11 (48,2mm), 12 (12,5mm) e 13 (63mm), que resultaram em um total de 123mm em 72 horas (DAEE, 2022). Este contexto pluviométrico deflagrou centenas de escorregamentos nas encostas e corridas de detritos (Figura 2) que causaram 25 vítimas fatais, 3 desaparecidos e 203 desabrigados ou desalojados, além da destruição de 100 moradias, estabelecimentos comerciais, estradas, pontes e plantações (BROLLO et al., 2015; MATOS et al., 2018).

A litologia é composta por rochas graníticas do período Neoproterozóico, que compõe o Batólito Itaóca, com uma área de mais de 200 km², circundado por rochas metassedimentares e metacarbonatos do subgrupo Lajeado (SALAZAR et al., 2008; CAMPANHA et al., 2016). Com relação às características geomorfológicas, a área se encontra na unidade morfoestrutural do Cinturão Orogenético do Atlântico, composta por unidades morfoesculturais de planaltos e serras, e possui três unidades morfológicas: O Planalto do Ribeira/ Turvo, O Planalto Rebaixado de Itaóca e a Serra de Apiaí.

O Planalto do Ribeiro/ Turvo possui, em sua maioria, relevos de morros com topos convexos e aguçados, com um entalhamento dos vales que varia entre 20 e 80m (ROSS; MOROZ, 1996). No geral, apresenta formas muito dissecadas, com vales entalhados e alta densidade de drenagem (ROSS, 2002). Predominam argissolos vermelho-amarelo que ocupam quase a totalidade do município e, nas áreas mais elevadas, são identificados neossolos litólicos, Cambissolos Háplicos e os afloramentos rochosos (ROSS; MOROZ, 1996). Estudos de maior detalhe foram realizados especificamente na bacia do Gurutuba, junto às cicatrizes de escorregamentos, indicando a presença de Neossolos Litólicos com predomínio de textura franco arenosa, com porcentagem acima de 60% de areia, compostas majoritariamente de feldspato, seguido de quartzo, biotita, poliminerálicos e poucos minerais acessórios (p. ex. hornblenda), com aumento significativo de biotita nas frações areia média até areia muito fina (CAROU, 2019; COELHO; GRAMANI; VIEIRA, 2022).

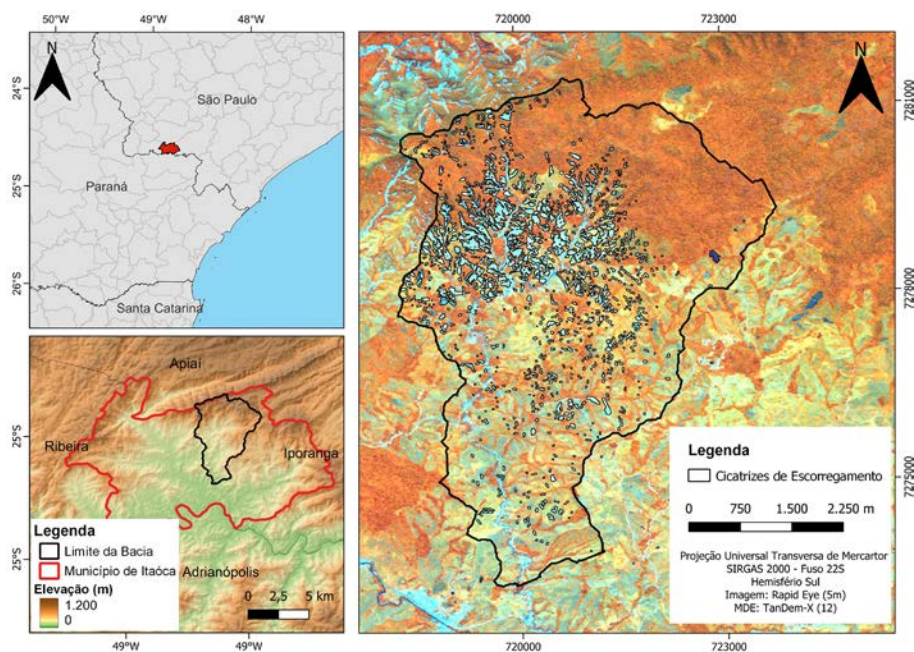


Figura 1 – Localização da bacia do Rio Gurutuba nos contextos do estado de São Paulo e do município de Itaóca.

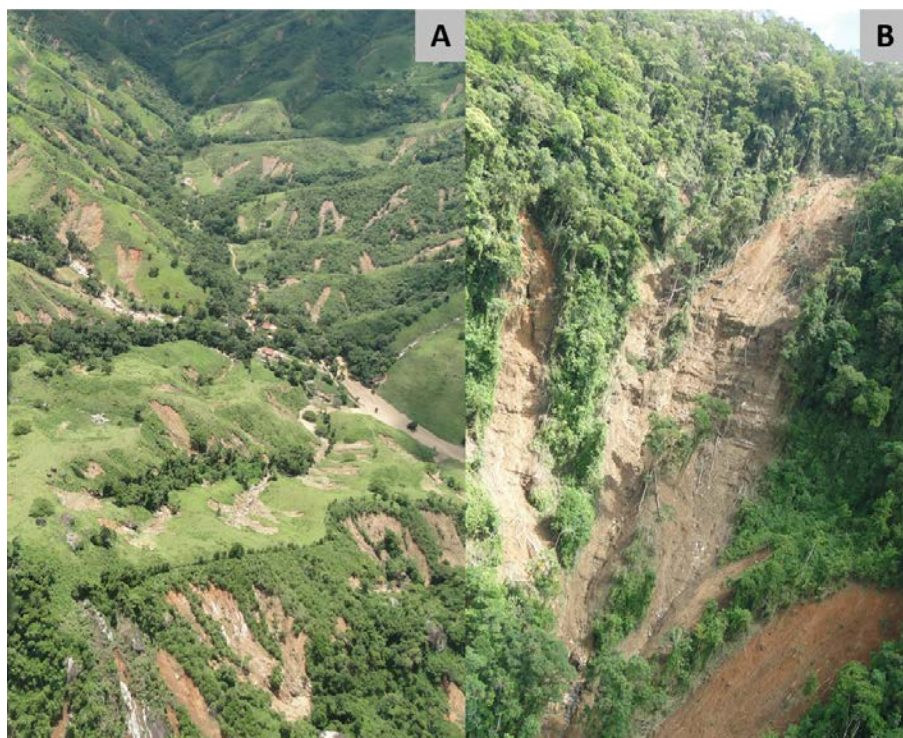


Figura 2 – Cicatrizes de escorregamentos no município de Itaóca após as fortes chuvas de janeiro de 2014. Fontes: Prefeitura do município de Itaóca.

Materiais e Métodos

Inventário de Cicatrizes

A primeira etapa deste trabalho consistiu na utilização do inventário de cicatrizes (Figura 3) produzido por Bonini et al. (2022) a partir de imagens multiespectrais dos satélites RapidEye (5m de resolução espacial) (PLANET TEAM., 2017) e considerando a diferença de NDVI (*Normalized Difference Vegetation*) entre imagens anteriores (10 de janeiro de 2014) e posteriores ao evento (30 de janeiro de 2014). Este mapa foi submetido a uma classificação não supervisionada utilizando o algoritmo ISODATA Clustering (SAGA GIS 2.3.2) (MEMARSADEGHI et al., 2007). Após essa etapa, foi realizada uma inspeção visual dos *clusters* correspondentes às cicatrizes, buscando identificar os falsos positivos e negativos, para correção manual das feições. Aquelas consideradas como cicatrizes de escorregamentos rasos, foram delimitadas em toda sua extensão e diferenciadas dos depósitos de fluxos de detritos e de outros processos hidrodinâmicos, com base em parâmetros morfométricos derivados de um MDE TanDEM-X (12m de resolução) (BONINI et al., 2022).

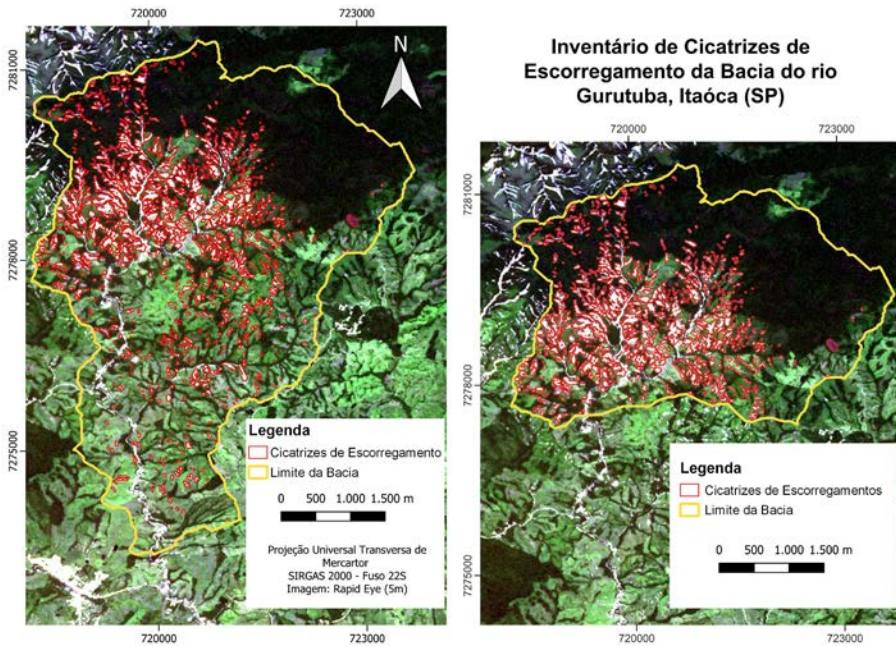


Figura 3 – Mapa das cicatrizes dos escorregamentos translacionais rasos ocorridos em janeiro de 2014 na bacia do rio Gurutuba (A). Sub-bacia do Alto Gurutuba (B).

Mapeamento da trajetória dos escorregamentos (Runout)

Primeiramente foi analisada a distribuição do ângulo e da curvatura das encostas, incluindo aqui as cicatrizes dos escorregamentos rasos de 2014, visando estabelecer um limiar entre as zonas de transporte e de deposição de cada cicatriz. Este mapeamento prévio foi feito apenas na sub-bacia do Alto Gurutuba, com a maior concentração das cicatrizes dos escorregamentos e que também apresenta maior similaridade quanto às características geomorfológicas da Serra do Mar.

Estes limiares, para cada zona da cicatriz, consideraram os valores de ângulos e curvatura das encostas mais frequentemente afetados por escorregamentos no contexto geológico-geomorfológico da Serra do Mar (MARTINS et al., 2017a; VIEIRA et al., 2018; BONINI et al., 2020). Desta forma, foram definidas como zonas de ruptura setores da encosta com curvaturas côncavas (CC), convexas (CX) ou retilíneas (R) e com intervalo de ângulos entre 30° e 40°. As zonas de transporte foram definidas por curvaturas côncavas e ângulos entre 20° e 30°. Por fim, as zonas de deposição correspondem às áreas com curvaturas côncavas e ângulo inferior a 20° (Figura 4).

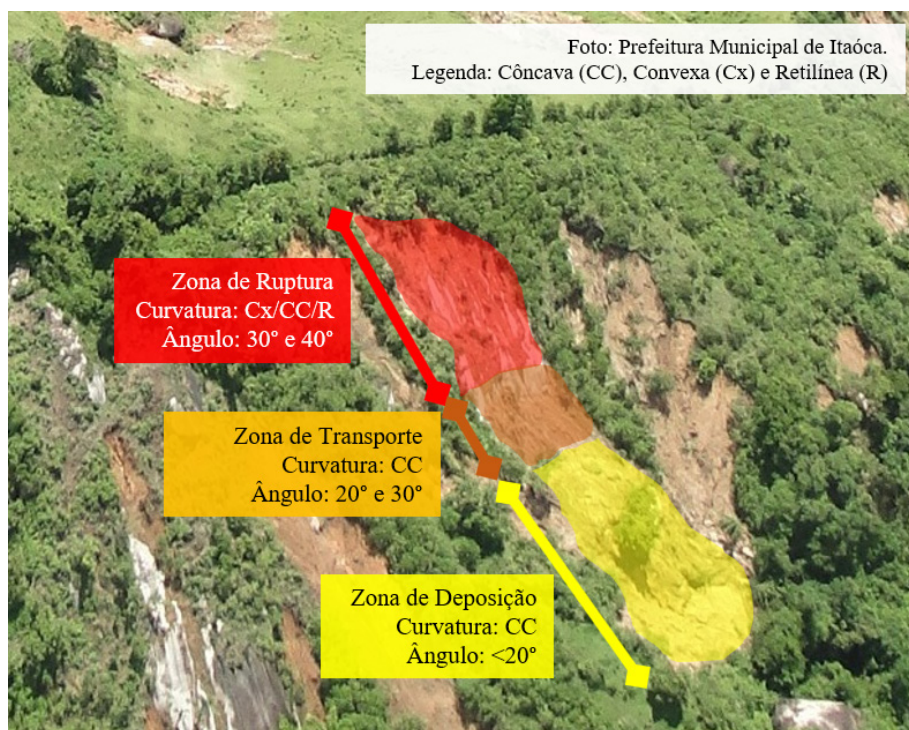


Figura 4 – Ilustração da definição das zonas de ruptura, transporte e deposição conforme a curvatura e o ângulo das encostas.

Os parâmetros morfométricos de ângulo e de curvatura das encostas foram obtidos por meio do mesmo MDE e pela ferramenta *morphometric features*, com um raio de 5 células (SAGA GIS 2.3.2). Para o mapa de ângulo de encosta foram adotadas as seguintes classes: 0°-10°, 10°-15°, 15°-20°, 20°-25°, 25°-30°, 30°-35°, 35°-40°, >40°. O mapa de curvatura em perfil foi classificado de acordo com limiares: côncava (< -0.0004); retilínea (-0.0004 a 0.0004); e convexa (> 0.0004).

Resultados e Discussões

A bacia do rio Gurutuba teve 12% (3km²) de sua área afetada por escorregamentos rasos no evento de 2014, sendo inventariadas 918 cicatrizes, com uma área média de 3215m². As maiores cicatrizes apresentaram uma área de 154.290m², e as menores cicatrizes 99,96m². Percentuais semelhantes, porém, pouco menores, foram identificados em trabalhos realizados na Serra do Mar após um único evento pluviométrico (GUIMARÃES et al., 2009; NERY; VIEIRA, 2015; VIEIRA; RAMOS, 2015). Vale ressaltar, entretanto, que estes trabalhos consideraram toda área das cicatrizes incluindo ruptura, transporte e deposição, não distinguindo as mesmas em seu mapeamento final.

Com relação à distribuição das classes de ângulo de encosta, verificou-se o predomínio de ângulos de 20° a 25° (23,8%) e 15° a 20° (23%). Quando consideradas as áreas afetadas por escorregamentos, nota-se que as cicatrizes se concentraram nas classes de 20° a 25° (28%) e 25° a 30° (22%), com menor concentração entre 35° e 40° (3%) e > 40° (0,1%) (Figura 5). Já em relação à curvatura predominam os setores côncavos (57%), onde também se concentram grande parte dos escorregamentos (66% das cicatrizes). Nos setores convexos, que correspondem a 35% da bacia do Gurutuba, foram mapeadas cerca de 25% do total de escorregamentos de 2014 (Figura 6). Foi possível observar o mesmo padrão de distribuição encontrados em outros trabalhos também na Serra do Mar, com aumento significativo a partir dos 20° até a classe de 30°/40° e posterior redução (FERNANDES et al., 2004; GOMES; VIEIRA, 2016; MARTINS et al., 2016).

Com relação à curvatura, foi possível observar que os setores côncavos estão associados a uma maior suscetibilidade a escorregamentos, conforme observado em outros trabalhos (MARTINS et al., 2017a; DIAS et al., 2018;). Tais resultados respondem às características de concentração de fluxos de água em superfície e subsuperfície, que podem aumentar a instabilidade das encostas durante eventos pluviométricos mais intensos (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994; MONTGOMERY; SULLIVAN; GREENBERG, 1998).

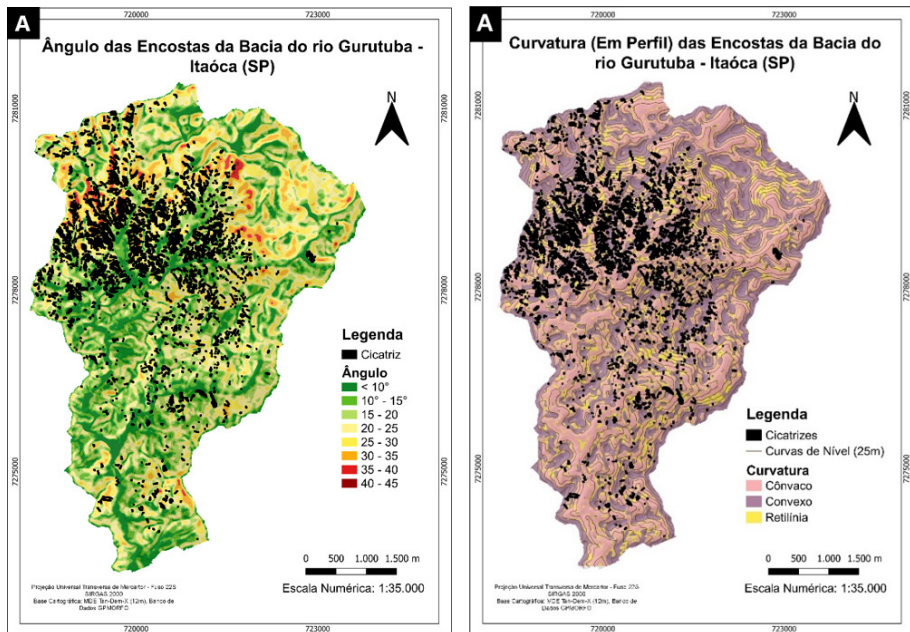


Figura 5 – (A) Mapa do Ângulo de encostas e (B) Mapa da Curvatura em perfil das encostas.

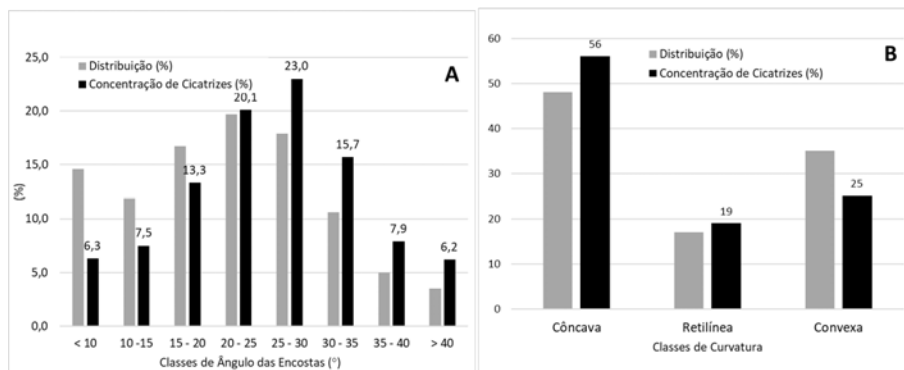


Figura 6 – Distribuição das classes de ângulo das encostas e concentração de cicatrizes (A). Distribuição das classes de curvatura e concentração de cicatrizes (B).

Em relação ao mapa da trajetória dos escorregamentos (*runout*) deflagrados em 2014, considerando apenas a sub-bacia do alto Gurutuba, quase metade das cicatrizes teve sua área identificada como zona de transporte (46%), seguida pela zona de deposição (34%) e pela zona de ruptura (21%) (Figura 7). Observa-se a presença de polígonos que não foram classificados, pois apresentaram características fora dos critérios usados para definição dos limiares, isto é, correspondem às áreas que não compõem a interseção de ângulos de 0 a 30° com curvatura côncava. A presença destes polígonos configura uma limitação do método aplicado neste artigo. No entanto, estes resultados são indicativos da possibilidade de utilizar uma classificação semiquantitativa para identificação das zonas de ruptura, em geral associadas em trabalhos anteriores ao terço superior das cicatrizes (CAROU et al., 2017; MARTINS et al., 2017). Estas zonas costumam ser aquelas consideradas na construção e validação de modelos de suscetibilidade elaborados a partir de diferentes métodos (ELENA; CEES; MAURO, 2017; DIAS et al., 2018; VIEIRA et al., 2018).

Com relação ao mapa final contendo potenciais zonas de transporte e de deposição de escorregamentos rasos de toda a bacia do rio Gurutuba, observou-se que mais da metade (64%) foi classificada como zona de deposição, e apenas 36% como zona de transporte. Resultado esperado, devido ao elevado percentual de setores côncavos da encosta com ângulos inferiores a 20°, limiar definido entre as zonas de transporte e de deposição, sobretudo nas proximidades dos canais de drenagem (Figura 8).

Embora sejam apenas duas características utilizadas neste trabalho para a definição da trajetória dos escorregamentos, é importante ressaltar que os resultados foram satisfatórios e corroboram com outras pesquisas realizadas. DI NAPOLI et al. (2021) avaliaram o potencial do uso de diversas variáveis morfológicas na definição da trajetória de escorregamentos, dentre elas a curvatura, que pode indicar a ocorrência de fluxos convergentes e divergentes, e o ângulo, cujos valores influenciam diretamente no grau de instabilidade das encostas. Cabe destacar que estas variáveis morfométricas são fundamentais para a aplicação de métodos racionais/numéricos, matematicamente mais sofisticados (COROMINAS et al., 2013).

O mapa contendo a trajetória do material mobilizado em escorregamentos é fundamental para posteriores avaliações de perigo e de risco (COROMINAS et al., 2003), contribuindo juntamente com os mapas de suscetibilidade para indicação da probabilidade espacial, ou seja, a área que será afetada, considerando as características intrínsecas da encosta, como curvatura e ângulo. Alguns autores também apontam que métodos empíricos/estatísticos e analíticos na avaliação do *runout* podem ser usados na estimativa do volume de sedimentos, previsão da velocidade do fluxo e no tipo de impacto causado por estes processos (VAN WESTEN; VAN ASCH; SOETERS, 2006; MCDOUGALL, 2017).

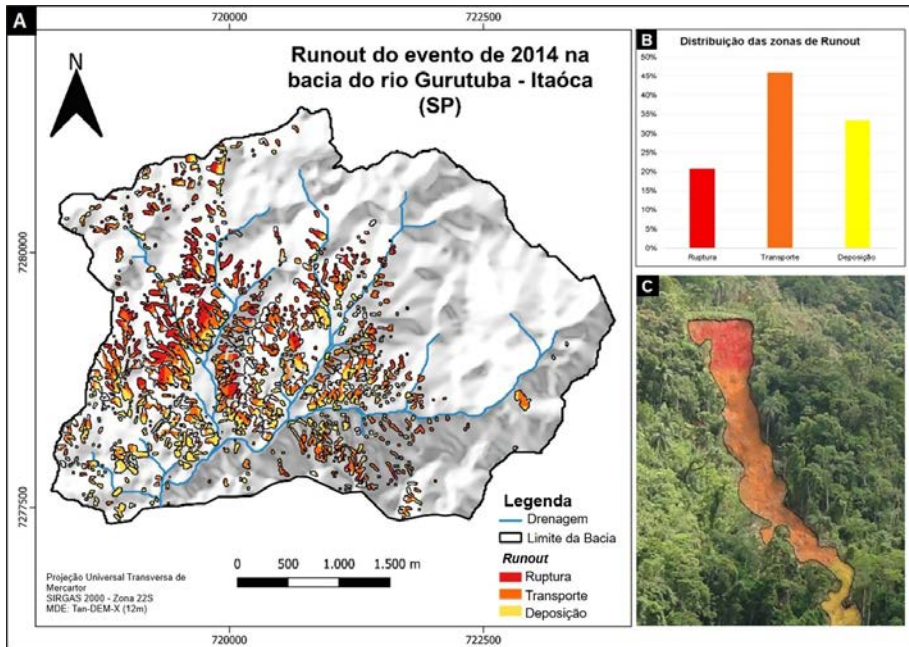


Figura 7 – Mapa da trajetória dos escorregamentos de 2014 na bacia do rio Gurutuba (A). Distribuição percentual das zonas de ruptura, transporte e deposição (B) e identificação destas zonas por meio de foto oblíqua (C). Fonte da Foto: Prefeitura municipal de Itaóca.

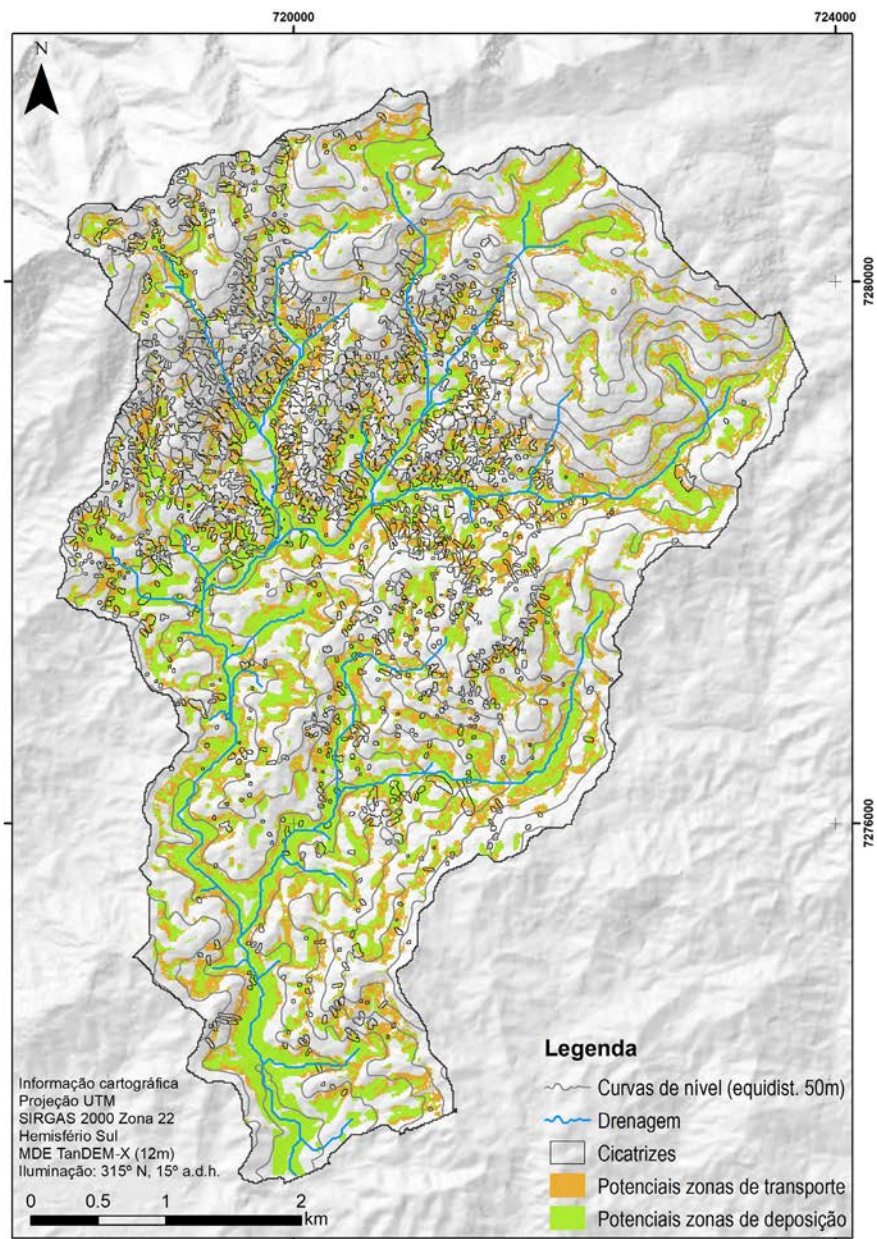


Figura 8 – Mapa de probabilidade de *Runout* (transporte e deposição).

Considerações Finais

O mapeamento do perigo a escorregamentos é fundamental como suporte ao planejamento urbano e às medidas de redução dos danos ambientais, sociais e econômicos gerados por estes processos. Neste sentido, a identificação da trajetória do material mobilizado por escorregamentos é componente básico da cartografia de perigo em escalas menores que 1: 25.000, integrando mapas de suscetibilidade e trajetória com o objetivo de indicar áreas que podem ser afetadas em eventos futuros.

A abordagem semiquantitativa aplicada, baseada na integração de conhecimento geomorfológico acerca dos escorregamentos rasos e da análise digital de dados de elevação, permitiu identificar de forma satisfatória as zonas de ruptura, que na literatura costumam ser associadas ao terço superior das cicatrizes. Trabalhos futuros podem mensurar o impacto da utilização destas zonas de ruptura sobre o desempenho de diferentes métodos de análise da suscetibilidade.

No Brasil, muitos estudos, em diferentes escalas, realizaram mapeamentos precisos da suscetibilidade a escorregamentos rasos, utilizando desde métodos heurísticos mais simples até modelos em bases estatísticas e físicas. Entretanto, ainda são escassas as pesquisas que identificam especificamente áreas de transporte e de deposição (*runout*) do material mobilizado. Escassez esta que pode estar associada à complexidade dos processos e às incertezas referentes à magnitude, por exemplo. Assim, a proposta deste trabalho foi apresentar uma ferramenta simples (semiquantitativa), baseada em apenas duas variáveis topográficas e na definição de seus limiares que compõem as zonas de transporte e de deposição.

A área experimental com mais de 900 cicatrizes de escorregamentos deflagrados, em apenas um período concentrado de chuvas, em uma área com pouco mais de 25km², permitiu uma correlação positiva entre as classes de curvatura e de ângulo de encostas, considerando, sobretudo, a dinâmica espacial dos escorregamentos rasos na Serra do Mar Paulista.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos editores da Revista e, sobretudo, aos revisores. Agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro. Processos: 2021/05872-2 e 2021/04621-6. Os autores agradecem também ao Departamento de Geografia e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo.

Referências Bibliográficas

AGLIARDI, F.; CROSTA, G. B. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 40, n. 4, p. 455-471, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00021-2).

AVELAR, A. S.; NETTO, A. L. C.; LACERDA, W. A.; BECKER, L. B.; MENDONÇA, M. B. Mechanisms of the Recent Catastrophic Landslides in the Mountainous Range of Rio de

Janeiro, Brazil. *Landslide Science and Practice*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 265-270. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31337-0_34.

BONINI, J. E.; BATEIRA, C. V. de M.; DIAS, V. C.; MARTINS, T. D.; VIEIRA, B. C. Suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir de parâmetros morfométricos e dos modelos SHALSTAB e do Valor Informativo. *Confins*, n. 46, 23 2020. DOI 10.4000/confins.30323. Disponível em: <http://journals.openedition.org/confins/30323>.

_____; VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D. Semiautomatic Inventory and Geomorphological Characterization of Mass Movements Using High-Resolution Images and Open Source Software in the Ribeira De Iguape Valley, Brazil. 2022. *Journal of South American Earth Sciences*.

BROLLO, M.; SANTORO, J.; ROSSINI-PENTEADO, D.; FERNANDES-DA-SILVA, P.; RIBEIRO, R. Itaoca (SP): Histórico de acidentes e desastres relacionados a perigos geológicos. 2015. *14º Simpósio de Geologia do Sudeste [...]*. Campos do Jordão: [s. n.], 2015.

CAMPANHA, G. A. C.; BASEI, M. S.; FALEIROS, F. M.; NUTMAN, A. P. The Mesoproterozoic to early Neoproterozoic passive margin Lajeado Group and Apiaí Gabro, Southeastern Brazil. *Geoscience Frontiers*, v. 7, n. 4, p. 683-694, jul. 2016. DOI 10.1016/j.gsf.2015.08.004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1674987115000936>.

CAROU, C. B. *Mineralogia do granito Itaóca e sua relação com a suscetibilidade a escorregamentos rasos da bacia do Rio Gurutuba*. 2019. 167 f. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

_____; VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D.; GRAMANI, M. F. Inventário dos Escorregamentos da Bacia do Rio Gurutuba, Vale do Ribeira (SP) Landslides Inventory of Gurutuba River Basin, Ribeira Valley (SP). *Revista do Departamento de Geografia*, v. Especial, p. 172-179, 2017. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.133377>.

CERRI, R. I.; REIS, F. A. G. V.; GRAMANI, M. F.; GIORDANO, L. C.; ZAINE, J. E. Landslides Zonation Hazard: relation between geological structures and landslides occurrence in hilly tropical regions of Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 89, n. 4, p. 2609-2623, 2017. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170224>.

CHAE, B. G.; PARK, H. J.; CATANI, F.; SIMONI, A.; BERTI, M. Landslide prediction, monitoring and early warning: a concise review of state-of-the-art. *Geosci J*, 2017. DOI 10.1007/s12303-017-0034-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0034-4>.

COELHO, R. D.; GRAMANI, M. F.; VIEIRA, B. C. Propriedades físicas do solo e a estabilidade das encostas na Serra do Mar, Sudeste do Brasil. *Revista do Departamento de*

Geografia, v. 42, p. e188406, 2022. DOI 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.188406. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/188406>.

COROMINAS, J.; VAN WESTEN, C.; FRATTINI, P.; CASCINI, L.; MALET, J.-P.; FOTOPOULOU, S.; CATANI, F.; VAN DEN EECKHAUT, M.; MAVROULI, O.; AGLIARDI, F.; PITILAKIS, K.; WINTER, M. G.; PASTOR, M.; FERLISI, S.; TOFANI, V.; HERVÁS, J.; SMITH, J. T. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 73, n. 2, p. 209-263, 2014. DOI 10.1007/s10064-013-0538-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>.

_____; COPONS, R.; VILAPLANA, J. M.; ALTIMIR, J.; AMIGÓ, J. Integrated Landslide Susceptibility Analysis and Hazard Assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards*, v. 30, n. 3, p. 421-435, 2003. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007094.74878.d3>.

COSTA NUNES, A. J. L. Landslides in soils of decomposed rock due to intense rainstorms. *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1969.

DAEE. Banco de dados Hidrológicos. 2022. Disponível em: <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>. Acesso em: 2020.

DE PLOEY, J.; CRUZ, O. Landslides in the Serra do Mar, Brazil. *CATENA*, v. 6, n. 2, p. 111-122, set. 1979. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(79\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0341-8162(79)90001-8).

DI NAPOLI, M.; DI MARTIRE, D.; BAUSILIO, G.; CALCATERRA, D.; CONFUORTO, P.; FIRPO, M.; PEPE, G.; CEVASCO, A. Rainfall-Induced Shallow Landslide Detachment, Transit and Runout Susceptibility Mapping by Integrating Machine Learning Techniques and GIS-Based Approaches. *Water*, v. 13, n. 4, p. 488, 13 fev. 2021. <https://doi.org/10.3390/w13040488>.

DIAS, H. C.; BATEIRA, C.; PISSATO, E.; MARTINS, T. D.; VIEIRA, B. C. Avaliação da Suscetibilidade a Escorregamentos Rasos com Base na Aplicação de Estatística Bivariada: Resultados Preliminares. *Revista do Departamento de Geografia*, p. 34-42, 2018. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.144537>.

DIAS, V. C.; MCDOUGALL, S.; VIEIRA, B. C. Geomorphic analyses of two recent debris flows in Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 113, p. 103675, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103675>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981121005204>.

DORREN, L.; DOMAAS, U.; KRONHOLM, K.; LABIOUSE, V. Methods for Predicting Rockfall Trajectories and Run-out Zones. *Rockfall Engineering*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013, p. 143-173. <https://doi.org/10.1002/9781118601532.ch5>.

ELENA, L.; CEES J., V. W.; MAURO, S. Assessment of landslide susceptibility for civil protection purposes by means of GIS and statistical analysis: lessons from the Province of Modena, Italy. *Revista de Geomorfologie*, v. 19, n. 1, p. 29-43, 2017. <https://doi.org/10.21094/rg.2017.009>.

EVANS, S. G.; HUNGR, O. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 30, n. 4, p. 620-636, 1993. <https://doi.org/10.1139/t93-054>.

FANNIN, R. J.; WISE, M. P. An empirical-statistical model for debris flow travel distance. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 38, n. 5, p. 982-994, 2001. <https://doi.org/10.1139/t01-030>.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Eng Geol*, 2008. DOI 10.1016/j.enggeo.2008.03.022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>.

FERNANDES, N.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. *CATENA*, v. 55, n. 2, p. 163-181, 2004. [https://doi.org/10.1016/s0341-8162\(03\)00115-2](https://doi.org/10.1016/s0341-8162(03)00115-2).

GOMES, M. C. V.; VIEIRA, B. C. Saturated hydraulic conductivity of soils in a shallow landslide area in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 60, n. 1, p. 53-65, 2016. <https://doi.org/10.1127/zfg/2016/0229>.

GRAMANI, M. F. A corrida de massa no córrego Guarda-Mão, município de Itaoca (SP): Impacto e observações de campo. 2015. *the 15º Brazilian Congress of Engineering and Environmental Geology, Proceedings [...]*. Bento Gonçalves: [s. n.], 2015. p. 1–10.

GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, S. N.; FERNANDES, N. F. Análise temporal das áreas susceptíveis a escorregamentos rasos no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (RJ) a partir de dados pluviométricos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39, p. 192-200, 2009.

HSÜ, K. J. Catastrophic Debris Streams (Sturzstroms) Generated by Rockfalls. *Geological Society of America Bulletin*, v. 86, n. 1, p. 129, 1975. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1975\)86<129:CDSSGB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1975)86<129:CDSSGB>2.0.CO;2).

JONES, F. O. *Landslides of Rio de Janeiro and the Serra das Araras escarpment, Brazil*. Washington: United States Government Printing Office, 1973.

KOBIYAMA, M.; DE ALMEIDA MOTA, A.; GRISON, F.; NERY GIGLIO, J. Landslide influence on turbidity and total solids in Cubatão do Norte River, Santa Catarina, Brazil. *Natural Hazards*, v. 59, n. 2, p. 1077-1086, 2011. DOI 10.1007/s11069-011-9818-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9818-4>.

MARQUES, M. C. de O.; COELHO NETTO, A. L.; SATO, A. M. Influência de floresta secundária e gramínea na deflagração de deslizamentos translacionais rasos em Nova Friburgo, Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19, n. 4, 2018. <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1479>.

MARTINS, T.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R. Assessment of Lidar-derived DTMs for landslide susceptibility mapping: Application in the Brazilian subtropical forest. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*, v. 3, p. 1389-1392, 2016. <https://doi.org/10.1201/b21520-170>.

MARTINS, T. D.; VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F.; OKA-FIORI, C.; MONTGOMERY, D. Application of the SHALSTAB model for the identification of areas susceptible to landslides: Brazilian case studies. *Revista de Geomorfologia*, v. 19, p. 136-144, 2017. <https://doi.org/10.21094/rg.2017.015>.

_____; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B. C.; CORREA, A. C. de B.; BATEIRA, C. V. M. Análise dos parâmetros morfológicos e os escorregamentos rasos na Serra do Mar, Paraná. *Caminhos de Geografia*, v. 18, n. 63, p. 223-239, 2017. <https://doi.org/10.14393/rcg186310>.

MARTINS, T. D.; VIEIRA, B. C.; BONINI, J. E.; BATEIRA, C. Implicações da resolução do MDT na modelagem de instabilidade de vertentes. *Confins*, n. 47, 2020. <https://doi.org/10.4000/confins.33083>.

MATOS, L. D. J.; FERREIRA, C. J.; BATEIRA, C. V. M.; VIEIRA, B. C. Avaliação das construções danificadas por corridas de detritos e inundações bruscas no Vale do Ribeira (SP) em 2014. *Revista do Departamento de Geografia*, p. 57-67, 2018. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.144423>.

MCDOUGALL, S. Canadian Geotechnical Colloquium: Landslide runout analysis – current practice and challenges. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 54, n. 5, p. 605-620, 2017. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0104>.

MEMARSADEGHI, N.; MOUNT, D. M.; NETANYAHU, N. S.; LE MOIGNE, J. A Fast Implementation Of The Isodata Clustering Algorithm. *International Journal of Computational Geometry & Applications*, v. 17, n. 01, p. 71-103, 2007. <https://doi.org/10.1142/S0218195907002252>.

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

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994. DOI 10.1029/93WR02979. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/93WR02979>.

_____; SULLIVAN, K.; GREENBERG, H. M. Regional test of a model for shallow landsliding. *Hydrological Processes*, v. 12, n. 6, p. 943-955, 1998. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(199805\)12:6<943::aid-hyp664>3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(199805)12:6<943::aid-hyp664>3.0.co;2-z).

NERY, T. D.; VIEIRA, B. C. Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 74, n. 2, p. 369-378, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0622-8>.

NETTO, A. L. C.; SATO, A. M.; DE SOUZA AVELAR, A.; VIANNA, L. G. G.; ARAÚJO, I. S.; FERREIRA, D. L. C.; LIMA, P. H.; SILVA, A. P. A.; SILVA, R. P. January 2011: The Extreme Landslide Disaster in Brazil. *Landslide Science and Practice*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 377-384, 2011. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31319-6_51.

PLANET TEAM. Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth. São Francisco, 2017.

RICKENMANN, D. Runout prediction methods. *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 305-324. https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_13.

ROSS, J. L. S. Ribeira do Iguape Basin Morphogenesis and the Environmental Systems. *GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)*, n. 12, p. 21, 2002. DOI 10.11606/issn.2179-0892.geosp.2002.123770. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/123770>.

_____; MOROZ, I. C. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. *Revista do Departamento de Geografia*, p. 41-58, 1996. <https://doi.org/10.7154/RDG.1996.0010.0004>.

SALAZAR, C. A.; ARCHANJO, C. J.; BABINSKI, M.; LIU, D. Magnetic fabric and zircon U-Pb geochronology of the Itaoca pluton: Implications for the Brasiliano deformation of the southern Ribeira Belt (SE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 26, n. 3, p. 286-299, 2008. DOI 10.1016/j.jsames.2008.08.007.

SBROGLIA, R. M.; REGINATTO, G. M. P.; HIGASHI, R. A. R.; GUIMARÃES, R. F. Mapping susceptible landslide areas using geotechnical homogeneous zones with different DEM resolutions in Ribeirão Baú basin, Ilhota/SC/Brazil. *Landslides*, v. 15, n. 10, p. 2093-2106, 2018. DOI 10.1007/s10346-018-1052-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1052-7>.

SELUCHI, M. E.; CHOU, S. C. Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 98, n. 1-2, p. 67-77, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0101-x>.

SIDLE, R. C.; PEARCE, A. J.; O'LOUGHLIN, C. L. *Hillslope stability and land use*. London: American Geophysical Union, 1985. DOI 10.1029/WM011. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/WM011>.

SUMMERFIELD, M. A. *Global geomorphology: an introduction to the study of Landforms*. Nova York: Routledge, 2013.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. D. S.; ROCHA, M. D. Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos–Serra do Mar, município de Cubatão. *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia*, p. 225-236, 1975.

VAN WESTEN, C. J.; VAN ASCH, T. W. J.; SOETERS, R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 65, n. 2, p. 167-184, 2006. DOI 10.1007/s10064-005-0023-0. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>.

VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F.; AUGUSTO FILHO, O. Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. *Natural Hazards and Earth System Science*, v. 10, n. 9, p. 1829-1837, 2010. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1829-2010>.

_____; _____; AUGUSTO FILHO, O.; MARTINS, T. D.; MONTGOMERY, D. R. Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 77, n. 6, p. 1-15, 2018. DOI 10.1007/s12665-018-7436-0. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7436-0>.

_____; GRAMANI, M. F. Serra do Mar: The Most “Tormented” Relief in Brazil. In: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. (Orgs.). *Landscapes and Landforms of Brazil*. [S. l.: s. n.], p. 285–297, 2015. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_26.

_____; RAMOS, H. Aplicação do modelo Shalstab para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). *Revista do Departamento de Geografia*, v. 29, p. 161, 2015. <https://doi.org/10.11606/rdg.v29i0.102087>.

ZOU, Z.; XIONG, C.; TANG, H.; CRISS, R. E.; SU, A.; LIU, X. Prediction of landslide runoff based on influencing factor analysis. *Environmental Earth Sciences*, v. 76, n. 21, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7075-x>.

Recebido em: 25/07/2022

Aceito em: 07/09/2022