

EROSÃO HÍDRICA EM TRILHAS GEOTURÍSTICAS NO LITORAL DO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA BOCAINA, RIO DE JANEIRO, BRASIL

Luana de Almeida Rangel¹
Guilherme Marques de Lima²
Antonio Jose Teixeira Guerra³

INTRODUÇÃO

Os processos erosivos da água causam a degradação do solo através da decomposição, transporte e deposição de partículas pela ação da água das gotas de chuva e do escoamento, o que corresponde a, aproximadamente, 72% das terras afetadas pela erosão do solo no mundo (CENTRI, 2022). A sua ocorrência está a intensificar-se devido às alterações climáticas e às ações humanas; portanto, é um dos principais desafios ambientais e socioeconômicos que a sociedade enfrenta hoje. Quando induzidos por ações antrópicas, esses processos, além de impactarem os ciclos biogeoquímicos, promovem a perda de biodiversidade, declínios na produtividade agrícola, armazenamento de carbono, aumento da fome, insegurança alimentar, pobreza e desigualdade social (BOARDMAN et al, 2022; FERREIRA et al, 2022; GUERRA et al, 2023; YIN et al, 2022).

O pisoteio do solo em trilhas de uso público, por exemplo, é uma atividade antrópica que provoca degradação do solo e ocorrência desses processos, principalmente quando essas ações são realizadas de forma intensa e desordenada. Essas atividades corroboram com a alteração das características físico-químicas e biológicas do solo e, que, por sua vez, modificam a dinâmica hidráulica e edáfica, pois, além de reduzirem os níveis de matéria orgânica, os valores de porosidade e as taxas de infiltração de água, provocam um aumento na densidade aparente, volume de escoamento e perda de solo devido à erosão (RANGEL et al, 2018, 2019a; LIMA et al, 2024).

Existem muitas redes de trilhas locais, regionais, nacionais e internacionais mantidas e construídas para oferecer oportunidades de lazer e recreação, especialmente em áreas protegidas, como unidades de conservação. Estes territórios têm registrado um crescimento considerável no número de visitantes, pois os seus trilhos são espaços que

¹ Professora Adjunta do IGEOG da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ luarangel24@gmail.com;

² Doutorando em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, guilhermelhp.lima@gmail.com;

³ Professor Titular do Departamento de Geografia, Pós-doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, antoniogtguerra@gmail.com.

permitem o acesso a zonas de lazer e beleza paisagística. Consequentemente, esses locais tornaram-se altamente suscetíveis à degradação do solo através de processos erosivos hídricos. (BHAMMAR et al., 2021; COSTA; OLIVEIRA, 2018; ZHANG et al, 2022).

Nesse contexto, este estudo tem como objetivo realizar um levantamento espacial das características físicas e químicas do solo em trilhas no litoral do Parque Nacional da Serra da Bocaina (PNSB) no município de Paraty, Brasil, além de avaliar a evolução espaço-temporal de processos de erosão hídrica através do monitoramento de associações entre microtopografia do solo e dados de precipitação. Essa unidade de conservação, localizada em uma das maiores extensões de florestas contínuas e conservadas da Mata Atlântica, possui inúmeros atrativos geoturísticos em seu território, o que, por sua vez, a torna cenário de grande demanda turística, com intenso fluxo de pessoas. em suas trilhas durante o verão e feriados. Suas trilhas e praias recebem em média cerca de oito mil pessoas por dia (ICMBIO, 2022), tornando a visitação um agente desencadeador da degradação ambiental das trilhas (RANGEL et al., 2019; ICMBIO, 2022b).

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

As duas trilhas estudadas estão inseridas no litoral do Parque Nacional da Serra da Bocaina (PNSB), município de Paraty. Essa unidade de conservação faz parte da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, uma rede mundial de implantação de áreas protegidas, que tem como principais objetivos a manutenção da conservação do Bioma, através da implementação de um corredor ecológico contínuo de Mata Atlântica e possui área de aproximadamente 104.000 hectares. As duas trilhas estudadas são a Cachoeira da Pedra que Engole (CPE) (vermelho) e a Piscina Natural Caixa D’Aço (PNCD) (laranja).

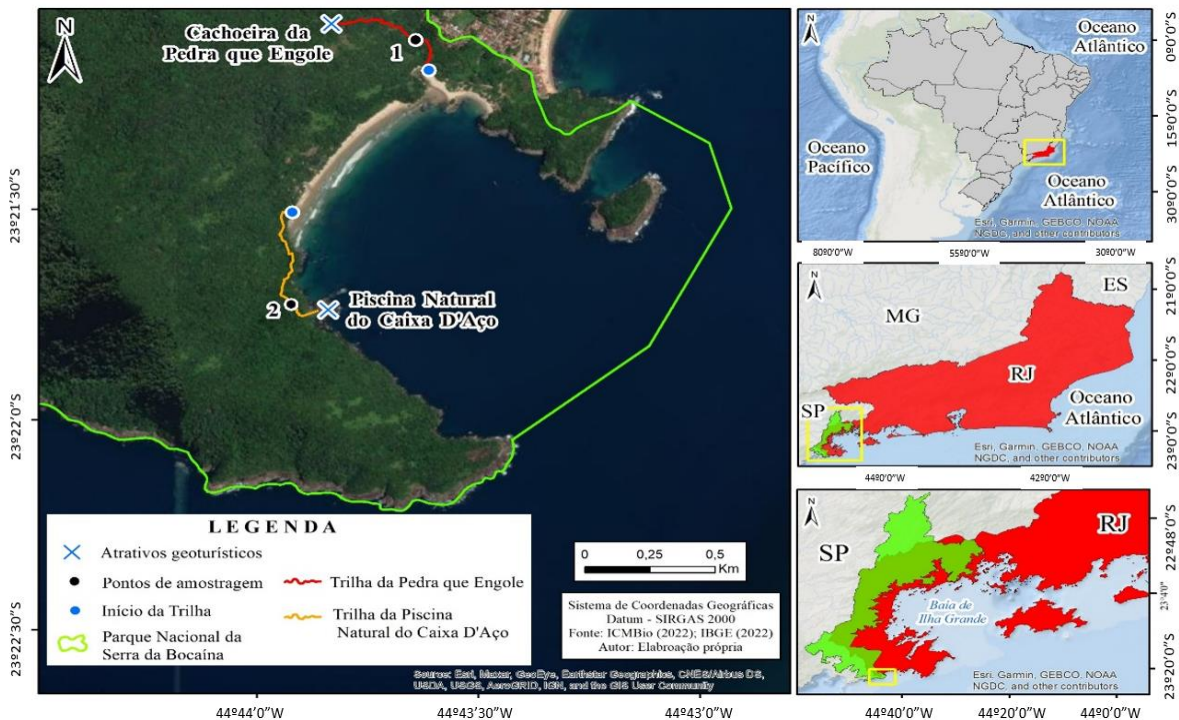


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo no Parque Nacional da Serra da Bocaina (PNSB). Elaborado por Lima (2023).

O clima da região é influenciado pela compartimentação regional do relevo e pelo desnivelamento altimétrico, que produzem discontinuidades no padrão de distribuição pluviométrica e de temperatura. Este fator reflete o efeito orográfico da Serra do Mar, que atua sobre o comportamento dos sistemas frontais, principais responsáveis pela pluviosidade regional. Logo, a classificação climática regional é tropical úmido de acordo com Köppen, onde os índices pluviométricos podem alcançar 2.200 mm anuais e a média atinge 1.700 mm. (ICMBIO, 2002a).

Com relação às características geológicas e geomorfológicas, o PNSB situa-se no Planalto da Bocaina (PONÇANO, 1981) e a área onde está localizada a trilha corresponde ao relevo de Montanhas e Morros (ICMBIO, 2002a). O arcabouço geológico é formado predominantemente por granitos e gnaisses do Complexo Gnáissico-Granitóide de idade proterozóica, os quais se associam sedimentos de idade cenozoica (ICMBIO, 2002;). Já o tipo de solo predominante é o Cambissolo Háplico Tb Distrófico, ocupando quase toda a escarpa da Serra do Mar (ICMBIO, 2002a; LIMA et al. 2024).

A área de estudo situa-se dentro dos domínios florísticos da Zona Neotropical e agrupa a seguinte diversidade vegetacional: Floresta Ombrófila Densa (Submontana, Montana e Alto Montana), expressão dominante na região, Floresta Ombrófila Mista Alto Montana e os campos de altitude (IBGE, 1992). Segundo o ICMBio (2002), na área onde

as trilhas estão localizadas há o predomínio de Floresta Ombrófila Densa secundária, em estágio médio e avançado de recuperação.

As trilhas estão localizadas no relevo das serras e morros, sob solos e resíduos superficiais, com afloramentos rochosos de granito Paraty-Mirim e sedimentos coluvionares. Em geral, apresentam saturação por bases inferior a 50%, o que, por sua vez, lhes confere caráter distrófico, além de elevada acidez e alto teor de alumínio.

Análises dos processos erosivos

As propriedades físico-químicas analisadas foram: granulometria, porosidade, densidade do solo, pH e teor de matéria orgânica. Elas foram escolhidas por estarem relacionadas à erodibilidade e ao uso e manejo do solo, visto que seus valores são influenciados pela intensa pisoteio do solo, principalmente pelo fluxo de turistas onde estão localizadas as trilhas pesquisadas (RANGEL et al., 2019b; LIMA et al. 2023).

Amostras de solo foram coletadas em quatro pontos, dois em cada trilha, em profundidades entre 0 e 20 cm em pontos estratégicos: em locais do leito das trilhas onde há feições erosivas, ou seja, áreas que sofrem pisoteio, e aquelas áreas imediatamente adjacentes (borda) ao trilhas, onde há não há passagem de visitantes (Figuras 2 e 3). Portanto, foi possível inferir o impacto do pisoteio humano e comparar espacialmente a qualidade do solo.



Figura 2 – Pontos de coleta de solo na Trilha da Pedra que Engole (A) e na trilha da Piscina Natural do Caixa D’Aço (B). Fonte: Lima et al. (2023)

Amostras indeformadas foram coletadas para determinar a densidade aparente e porosidade, e deformadas para determinar o pH, granulometria (textura) e teor de matéria

orgânica. Quanto à profundidade dessas coleções, estas se justificam por serem os principais fatores que sofrem o impacto do pisoteio durante as atividades de uso público.

A determinação da textura (granulometria) se deu com o destorroamento, peneiramento e mistura das amostras de solo com hidróxido de sódio e água destilada, enquanto a classificação se baseou no triângulo textural do *United States Department of Agriculture* (USDA, 2022). A matéria orgânica via úmida foi obtida com a mistura das amostras de solo com dicromato de potássio, sulfato de prata, ácido ortofosfórico, difenilamina e sulfato ferroso amoniacal. Já a densidade do solo foi obtida com a coleta em um cilindro com volume conhecido (100 cm^3), enquanto densidade de partículas se deu com a mistura das amostras com álcool etílico. Por fim, a porosidade foi determinada através da razão entre a densidade de partículas (g/cm^3) e a densidade do solo (g/cm^3), enquanto o pH foi obtido com a dissolução do solo em água destilada e a sua respectiva leitura após a calibração do equipamento. Todas as análises seguiram o manual de Análise de Solos da Embrapa (TEIXEIRA et al., 2017).

Obtenção dos dados pluviométricos

Os dados pluviométricos foram obtidos através de um pluviômetro manual instalado em um *camping* na imediação do PNSB (latitude $23^{\circ}21'5.28''\text{S}$ e longitude $44^{\circ}43'34.47''\text{O}$), numa altura de aproximadamente 1,5 m em uma base de madeira e afastado de obstáculos, visando armazenar e registrar o volume diário de precipitação da água ocorrida ao longo do monitoramento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os valores dos atributos físicos e químicos do solo, é possível identificar que os valores de porosidade total (%) e matéria orgânica (%) foram menores no leito da trilha, ante aqueles obtidos nas bordas, já que o valor médio destes parâmetros foi, respectivamente, de 36% e 0,9% no leito, e de 54% e 1,4% nas bordas (Tabela 1).

Trilha	Posição na trilha	Arranjo dos poros		Granulometria (%)					Análises químicas	
		Porosidade total (%)	Densidade do solo (g/cm ³)	Areia fina	Areia Grossa	Silte	Argila	Classificação textural	pH	Matéria Orgânica (%)
Pedra que Engole	Leito	39	1,6	8	52	16	24	Franco-argilo-arenoso	4,8	0,6
	Borda	51	1,2	8	60	19	14	Franco-arenoso	4,5	1,2
Piscina Natural do Caixa d'áço	Leito	33	1,8	14	41	16	29	Franco-argilo-arenosa	5,6	1,2
	Borda	56	1,1	9	30	26	36	Franco-argilosa	5,4	1,5
Média	Leito	36	1,7	11	46	16	27	-	5,2	0,9
	Borda	54	1,2	8	45	22	25	-	5,0	1,4
Desvio Padrão	Leito	4	0,1	3	8	0	3	-	0,6	0,4
	Borda	4	0,1	1	21	5	16	-	0,6	0,2

Tabela 1 - Valores dos atributos físico-químicos do solo obtidos nas trilhas estudadas. Fonte: Lima et al. (2023)

O predomínio dos maiores valores de porosidade total (51 e 56%) e matéria orgânica (1,2 e 1,5%) nas bordas das trilhas ante os valores obtidos no leito pode estar associado à ação da cobertura vegetal e ao baixo pisoteio neste local da trilha que, por sua vez, se concentra na porção central do leito da trilha pela visitaçào e pelo fluxo intenso de turistas que utilizam estes espaços para acessar os atrativos geoturísticos do PNSB. A adição de matéria orgânica pela cobertura vegetal, por exemplo, tende a aumentar a porosidade do solo, pois a ação mecânica das raízes, devido ao seu crescimento e retração, favorece o aumento de espaços vazios no interior do solo, isto é, aumentam a quantidade de espaços preenchidos por ar e água (GIWETA, 2020; SAYER et al., 2022).

Diferentemente das bordas, o leito das trilhas raramente apresenta cobertura vegetal e/ou matéria orgânica, tornando os valores de porosidade e matéria orgânica no solo mínimos ante as bordas que, ao contrário, apresentam valores máximos (Tabela 1). Como no leito das trilhas circulam centenas de pessoas diariamente, de forma intensa e desordenada rumo aos atrativos geoturísticos do PNSB, os valores destes parâmetros tendem a serem menores ante aqueles das bordas. Logo, não só o pisoteio, mas também a ausência de cobertura vegetal e matéria orgânica (serrapilheira) no solo para interceptar, reduzir o impacto da energia cinética das gotas de chuva e a compactação do solo, explicam as altas densidades do solo no leito e os menores valores nas bordas das trilhas.

Sobre o pH, apesar de todos valores terem apresentado caráter ácido (pH < 7), os maiores foram obtidos no leito das trilhas e os menores, por sua vez, nas bordas destas. Como as bordas possuem maior teor de matéria orgânica, é provável que as substâncias

excretadas, tanto pelas raízes como pela decomposição da matéria vegetal e animal, tenham contribuído para essa maior acidificação e para redução do pH.

Sobre a granulometria e a classificação textural do solo, as frações granulométricas do solo do leito das trilhas indicam uma textura média argilosa (franco-argilo-arenosa), isto é, onde predominam frações argila e areia. O predomínio de frações de areia grossa (2-0,2 mm), com baixa erodibilidade devido ao tamanho do seu diâmetro, peso de sua massa física e rápida velocidade de decantação que, por sua vez, dificulta sua remoção e transporte pela ação da água (NGUYEN et al., 2016),

Porém, frações de silte (0,002 – 0,050mm) e areia fina (0,2 – 0,05 mm), especialmente a quantidade da primeira no leito da trilha da Pedra que Engole e da segunda na trilha da Piscina Natural de Caixa d’Aço (Tabela 1), favorecem a formação de processos erosivos, como crostas e ravinas. Ainda, os solos do leito das trilhas apresentam não só baixa porosidade e alta densidade, seja pelo pisoteio de pessoas ou pela ausência de cobertura vegetal, mas também baixos teores de matéria orgânica ante os solos das bordas o que influencia negativamente na estabilidade de agregados.

Os dados diários de precipitação permitiram calcular os volumes mensais (Fig. 3).

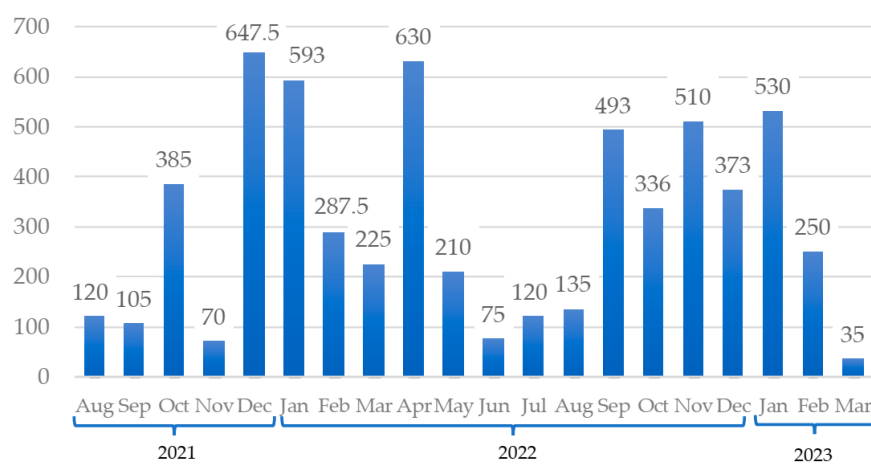


Figura 3 -Valores mensais de precipitação no litoral do PNSB. Fonte: Lima et al. (2024)

Além disso, as precipitações ocorreram em menos de metade do período total de monitorização (219 dias), sendo registados valores diários superiores à média total, que foi de 11 mm, em mais de metade destes dias. Também foi possível identificar que essa precipitação se concentrou em dezembro de 2021, janeiro, abril e novembro de 2022 e janeiro de 2023, que por sua vez foram os meses com maiores médias de precipitação, reforçando assim, um cenário mais propício nestes meses para a evolução das feições erosivas devido ao aumento do volume no *runoff* no leito das trilhas. Portanto, este comportamento pode estar associado com a evolução das feições erosivas observadas nas trilhas.

Como a erosão hídrica do solo é um processo de mobilização, transporte e deposição de sedimentos pela ação da água, as águas oriundas das precipitações pluviométricas possivelmente são as responsáveis por provocarem o rompimento dos agregados e o destacamento das partículas do solo no leito das trilhas, e conseqüentemente, desencadear a evolução das feições erosivas entre os períodos monitorados, já que o impacto da energia cinética de suas gotas, ao atingirem a superfície do solo, provocam a erosão por *splash* e a perda de solo pelo escoamento superficial (*runoff*) (NEARING *et al.*, 2017; PEREIRA *et al.*, 2022).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As características físico-químicas do solo também apresentaram associação com o processo de degradação, visto que a compactação, evidenciada pelos valores de densidade aparente, principalmente no leito das trilhas, contribui para a redução da infiltração de água e para o aumento da superfície escoamento. Isto, por sua vez, culmina na perda de solo ao longo das trilhas. O conteúdo de matéria orgânica também contribui para a dinâmica desse processo; todos os resultados foram superiores nas bordas das trilhas em relação aos obtidos nos respectivos canteiros, e esses teores afetam a erodibilidade do solo.

Fatores pedológicos e climáticos intrínsecos, como solos com textura grossa e chuvas intensas em períodos concentrados, também contribuem para a evolução dos processos erosivos monitorados. A presença de frações areia e silte e baixos teores de argila nos solos de o leito das trilhas, por exemplo, contribuem para a perda de solo, principalmente quando acompanhados de solos compactados e de chuvas concentradas em períodos específicos.

Palavras-chave: Processos Erosivos; Degradação do Solo; Unidades de Conservação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo financiamento do e ao Instituto Chico Mendes de Biodiversidade (ICMBio) pela autorização necessária para a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

BHAMMAR, H.; LI, W.; MOLINA, C.M.M.; HICKEY, V.; PENDRY, J.; NARAIN, U. Framework for Sustainable Recovery of Tourism in Protected Areas. *Sustainability*. v. 13, p. 2798–2808, 2021
BOARDMAN, J.; POESEN, J.; EVANS, M. Slopes: Soil erosion. In *The History of the Study of Landforms or the Development of Geomorphology*: v. 5: **Geomorphology in the Second Half of the Twentieth Century**; Geological Society of London: London, UK, 2022.

- BOTELHO, R. G. M.; BRILHA, J. Principles for Developing a National Soil Heritage Inventory. **Geoheritage**, v. 14, n. 7, p. 2-13, 2022.
- CENTERI, C. Soil Water Erosion. **Water**. v. 14, p. 447–501, 2022
- COSTA, N.M.C.; OLIVEIRA, F.L. Trilhas: “caminhos” para o geoturismo, a geodiversidade e a geoconservação. In: GUERRA, A.J.T., JORGE, M.C.O., (Org.) **Geoturismo, Geodiversidade e Geoconservação: Abordagens Geográficas e Geológicas**; ; Oficina de Textos: São Paulo, Brazil, 2018; pp. 201–223.
- FERREIRA, C.S.S.; SEIFOLLAHI-AGHMIUNI, S.; DESTOUNI, G.; GHAJARNIA, N.; KALANTARI, Z. Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences. **Science Total Environment**. 2022, p. 805-817.
- GRAY, M. **Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature**. Chichester: John Wiley & Sons, 2016.
- GUERRA, A.J.T.; BEZERRA, J.F.R.; JORGE, M.C.O. Recuperação de voçorocas e de áreas degradadas, no Brasil e no mundo—Estudo de caso da voçoroca do Sacavém—São Luís—MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, p. 1–20, 2023.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992.
- ICMBIO. INSTITUTO CHICO MENDES DE BIODIVERSIDADE. **Plano de Manejo do Parque Nacional da Serra da Bocaina**. 2002a. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/parnaserradabocaina/extras/62-plano-de-manejo-e-monitorias.html>. Acesso: 10 mar. 2015.
- ICMBIO. **ICMBio Realiza Operação de Ordenamento da Visitação nas Praias do Meio e Caixa D’áço em Trindade no Feriado de Carnaval de 2022**. Available online: <https://www.icmbio.gov.br/parnaserradabocaina/destaques/190-icmbio-realiza-operacao-de-ordenamento-da-visitacao-naspraias-do-meio-e-caixa-d-aco-em-trindade-no-feriado-de-carnaval-de-2022.html> (accessed on 20 July 2023).
- JORGE, M. C. O. ; GUERRA, A. J. T. Geodiversidade, Geoturismo e Geoconservação: Conceitos, Teorias e Métodos. **Espaço aberto**. v. 6, p. 151-174, 2016.
- LIMA, G.M.; RANGEL, L.A.; GUERRA, A.J.T. Monitoramento da microtopografia do solo em trilhas de uso público no litoral do Parque Nacional da Serra da Bocaina. **Revista Brasileira de Geomorfologia** v. 24, 1–17, 2023.
- LIMA, G. M. GUERRA, A.J.T.; RANGEL, L.D.A.; BOOTH, C.A.; FULLEN, M.A. Water Erosion Processes on the Geotouristic Trails of Serra da Bocaina National Park Coast, Rio de Janeiro State, Brazil. **Soil System** v. 8, n. 24, p. 1-18, 2024.
- NGUYEN, V. B.; NGUYEN, Q. B.; ZHANG, Y. W.; LIM, C. Y. H.; KHOO, B. C. Effect of particle size on erosion characteristics. **Wear**, v. 348-349, p.126-137, 2016.
- PONÇANO, W. L. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1981. 1 mapa. p. 94 .
- RANGEL, L.A.; GUERRA, A.J.T. Microtopografia e compactação do solo em trilhas geoturísticas no litoral do Parque Nacional da Serra da Bocaina—Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 19, 391–405, 2018
- RANGEL, L. A. JORGE, M. C.; GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. Geotourism and Soil Quality on Trails Within Conservation Units in South-East Braz. **Geoheritage**. v.11, p.1151–1161. 2019a
- RANGEL, L. A. JORGE, M. C.; GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A. Soil Erosion and Land Degradation on Trail Systems in Mountainous Areas: Two Case Studies from South-East Brazil. **Soil Systems**, v. 3, n. 3, p. 56-70, 2019b.
- SAYER, E. J.; RODTASSANA, C.; SHELDRAKE, M.; BRÉCHET, L. M.; ASHFORD, O. S.; LOPEZ-SANGIL, L.; KERDRAON-BYRNE, D.; CASTRO, B.; TURNER, B. L.; WRIGHT, S. J. Revisiting nutrient cycling by litterfall – Insights from 15 years of litter manipulation in old-growth lowland tropical forest. In: HOLZER, J. M.; BAIRD, J.; HICKEY, G. M. (Orgs.). **Advances In Ecological Research**. [S.L.]: Elsevier, 2022. p. 173-223.
- NEARING, M. A.; YIN, S. Q.; BORRELLI, P.; POLYAKOV, V. O. Rainfall erosivity: An historical review. **Catena**, v. 157, p. 357-362, 2017. DOI: 10.1016/j.catena.2017.06.004.
- PEREIRA, L. S.; RODRIGUES, A. M.; JORGE, M. C. O.; GUERRA, A. J. T.; BOOTH, C. A.; FULLEN, M. A. Detrimental effects of tourist trails on soil system dynamics in Ubatuba Municipality, São Paulo State, Brazil. **Catena**, [S.L.], v. 216, p. 1-15, set. 2022. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106431
- YIN, C.; ZHAO, W.; PEREIRA, P. Soil conservation service underpins sustainable development goals. **Global Ecology Conservation** v. 33, p.1–8, 2022.
- ZHANG, X.; ZHONG, L.; YU, H. Sustainability assessment of tourism in protected areas: A relational perspective. **Global Ecology Conservation**., v. 35, p. 1–14, 2022