

## **EROSÃO DOS SOLOS, DIFERENTES ABORDAGENS E TÉCNICAS APLICADAS EM VOÇOROCAS E EROSÃO EM TRILHAS**

***SOIL EROSION, DIFFERENT APPROACHES AND TECHNIQUES APPLIED TO  
GULLIES AND TRAIL EROSION***

***ÉROSION DU SOL, DIFFÉRENTES APPROCHES ET TECHNIQUES APPLIQUÉES  
AUX RAVINES ET À L'ÉROSION DE SENTIERS***

**ANTONIO JOSE TEIXEIRA GUERRA<sup>1</sup>  
MARIA DO CARMO OLIVEIRA JORGE<sup>2</sup>  
LUANA DE ALMEIDA RANGEL<sup>3</sup>  
JOSÉ FERNANDO RODRIGUES BEZERRA<sup>4</sup>  
HUGO ALVES SOARES LOUREIRO<sup>5</sup>  
FABRÍZIO DO NASCIMENTO GARRITANO<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Professor Titular do Departamento de Geografia da UFRJ e Coordenador do LAGESOLOS. E-mail: [antonioguerra@gmail.com](mailto:antonioguerra@gmail.com).

<sup>2</sup>Bolsista Pós-doutorado Nota 10 da FAPERJ e Pesquisadora Associada do LAGESOLOS.

<sup>3</sup>Professora do Ensino Fundamental do Município do Rio de Janeiro e Pesquisadora Associada do LAGESOLOS.

<sup>4</sup>Professor Adjunto do Departamento de Geografia da UEMA e Pesquisador Associado do LAGESOLOS.

<sup>5</sup>Doutor em Geografia pelo PPGG – UFRJ e Pesquisador Associado do LAGESOLOS.

<sup>6</sup>Doutorando do PPGG – UFRJ e Pesquisador Associado do LAGESOLOS.

Recebido 01/06/2020

Enviado para correção 15/05/2020

Aceito 24/06/2020

### **RESUMO**

Esse artigo aborda erosão dos solos, em áreas rurais e urbanas, bem como geoturismo e geodiversidade, especialmente erosão em trilhas. Aborda diversos aspectos da erosão dos solos, levando em conta conceitos, teorias e metodologias envolvidas. O artigo apresenta diferentes técnicas para monitorar erosão, desde as mais tradicionais, como estacas colocadas no solo, até as mais modernas, como VANTs e Laser Scanner Terrestre. Os resultados apontam para a necessidade de continuar as pesquisas em erosão dos solos, porque, uma vez que esse processo geomorfológico seja melhor entendido, pode auxiliar a evitar degradação ambiental no Brasil.

**Palavras-chave:** Erosão dos solos. Geoturismo. Geodiversidade. Monitoramento.

### **ABSTRACT**

This article regards soil erosion in rural and urban areas, and also geotourism and geodiversity, especially erosion on trails in those sites. It addresses several aspects of soil erosion, taking into account concepts, theories and methodologies involved. It shows different techniques to monitor erosion, since the most traditional ones, where stakes are placed into the soil, up to the most modern ones, where VANTs and Terrestrial Laser Scanners are used. The results point out towards the need to carry on investigation on soil erosion, since this geomorphological process is better understood, it may help to avoid environmental degradation in Brazil.

**Key Words:** Soil erosion. Geotourism. Geodiversity. Monitoring.

### **RÉSUMÉ**

Cet article concerne l'érosion des sols dans les zones rurales et urbaines, ainsi que le géotourisme et la géodiversité, en particulier l'érosion sur les sentiers de ces sites. Il aborde plusieurs aspects de l'érosion des sols, en tenant compte des concepts, théories et méthodologies impliqués. Il montre différentes techniques de surveillance de l'érosion, depuis les plus traditionnelles, où les piquets sont placés dans le sol, jusqu'aux plus modernes, où les VANT et les scanners laser terrestres sont utilisés. Les résultats soulignent la nécessité de poursuivre les recherches sur l'érosion des sols, puisque ce processus geomorphologique est mieux compris, il peut contribuer à éviter la dégradation de l'environnement au Brésil.

**Mots clés:** Érosion des sols. Géotourisme. Géodiversité. Surveillance.

## INTRODUÇÃO

Erosão dos solos vem sendo estudada por pesquisadores, no Brasil e no mundo, há muito tempo, e diversas são as abordagens, quando se trata de um tema com elevada complexidade, como abordado nesse artigo. O LAGESOLOS (Laboratório de Geomorfologia Ambiental e Degradação dos Solos), é o responsável por muitos dos trabalhos aqui apresentados, tendo sido criado em 1994, perfazendo 26 anos em 2020. Nesse período foram concluídas 33 monografias de graduação, 31 dissertações de mestrado, 28 teses de doutorado, sendo a grande maioria sobre erosão dos solos e movimentos de massa. Nesse período, mais de 100 artigos foram publicados, em periódicos nacionais e internacionais, mais de 40 capítulos de livros, 27 livros organizados, coorganizados, em autoria e co-autoria, versando sobre erosão dos solos, movimentos de massa, gestão ambiental e recuperação de áreas degradadas e, mais recentemente, temas relacionados ao geoturismo, geodiversidade e geoconservação. Nesse caso, a erosão em trilhas é abordada, numa perspectiva de se compreender o processo, bem como atuar preventivamente, e/ou para mitigar danos ambientais nessas áreas, como será visto nesse artigo.

Erosão dos solos é considerado um fenômeno natural. Dessa forma, todas as paisagens que possuam algum tipo de declividade, geralmente superior a 3°, podem sofrer esse processo. Ashman e Puri (2002) apontam que em algumas áreas, a erosão e a consequente deposição, são primordiais para a manutenção da fertilidade natural dos solos, como é o caso do delta do rio Nilo, no Egito, que recebe sedimentos erodidos, vindos da Etiópia. Esse processo natural, segundo os referidos autores, manteve a fertilidade desses solos por séculos, mas a construção de barragens para controlar o regime do rio Nilo, alterou esse equilíbrio.

Selby (1993) classifica erosão como um processo geomorfológico, que ocorre em encostas, devido à ação do *splash* e do escoamento superficial e subsuperficial. O autor denominou esse processo de *wash* (lavagem), um termo adotado por muitos autores (GERRARD, 1992; EVANS, 1993; GOUDIE; VILES, 1997; POESEN *et al.*, 2006; GOUDIE; BOARDMAN, 2010; BOARDMAN; FAVIS-MORTLOCK, 2013; GUERRA *et al.*, 2014, 2015, 2017).

Embora a erosão dos solos seja um processo físico de degradação, os seres humanos possuem papel relevante, na sua aceleração (VARNES, 1978; SMALL; CLARK, 1982; GERRARD, 1992; EVANS, 1993; SELBY, 1993; GUERRA, 1994; GOUDIE; VILES, 1997; FAVIS-MORTLOCK; GUERRA, 1999; FULLEN; CATT, 2004; CROZIER; GLADE, 2005; MORGAN, 2005; GOUDIE; BOARDMAN, 2010; BOARDMAN; FAVIS-MORTLOCK, 2013; KANUNGO; SHARMAS, 2014; GUERRA *et al.*, 2015; MONSIEURS *et al.*, 2015; GUERRA *et al.*, 2018). Dessa forma, a melhor maneira de se evitar a erosão dos solos é agindo preventivamente (MORGAN, 2005; GUERRA *et al.*, 2017).

A erosão acelerada remove a camada fértil do solo a elevadas taxas. A remoção da cobertura original para agricultura é um dos fatores que causam esse problema, consequentemente, os princípios gerais da erosão são aqui abordados, tais como erosão em lençol, ravina e voçoroca, com diversos exemplos brasileiros (GUERRA, 2016). Existem vários tipos de erosão, mas aquela provocada pelo escoamento superficial e subsuperficial, nas encostas, é a que possui a maior distribuição geográfica em diversos países.

A análise da degradação dos solos no Brasil, aponta para a erosão por voçorocas, em várias partes do país, sendo influenciada por processos geomorfológicos, climas variados, tipos de solos, e uso e manejo da terra inadequados (GUERRA *et al.*, 2018).

A degradação dos solos está diretamente relacionada a processos complexos que incluem a erosão (hídrica e/ou eólica), a desertificação, os movimentos de massa, a salinização e a acidificação (FULLEN; CATT, 2004; ARAÚJO *et al.*, 2013; GUERRA, 2010; GUERRA *et al.*, 2017). Dentro desses processos, a erosão hídrica se destaca como a maior responsável pela

perda de solo, e em contrapartida, os processos de formação do mesmo são lentos, o que prejudica a renovação desse recurso (MORGAN, 2005).

A intensa exploração dos solos no Brasil e a ausência de planos de conservação contribuíram para o forte processo de degradação, que atinge hoje muitas regiões no país, e vem causando drásticas consequências em muitas áreas, como a perda de solo em encostas, dada pelo aparecimento de feições erosivas como ravinas e voçorocas. Atualmente, os tipos de práticas mais empregadas nos solos brasileiros são as monoculturas e a pastagem, ambas realizadas, em muitos casos, com uso e manejo inadequados, que acabam por contribuir na intensificação dos processos de degradação, causando bruscas alterações na superfície terrestre, em intervalos de tempo consideravelmente inferiores aos que ocorreriam em um processo erosivo unicamente, ou majoritariamente natural (DEVIDE, 2013).

Erosão pode ser entendida como um dos processos que causa a degradação dos solos. Ao tratar do processo erosivo, deve-se, antes de tudo, mencionar um elemento físico com grande importância na composição da paisagem terrestre, atuando como agente modelador do relevo da superfície terrestre: a água. De acordo com Pereira *et al.*, (2016), esse agente atua tanto na superfície, gerando escoamento superficial, removendo e desagregando partículas de solo, ou de forma subsuperficial, dissolvendo minerais, gerando movimentos de massa e comprometendo a conservação do solo e da água, degradando a paisagem (SENSOY; KARA, 2014; GARRITANO, 2018).

Ao tratar a erosão, é necessário considerar que o uso e manejo corretos do solo apresentam grande importância, no que tange o controle do processo erosivo (GUERRA, 2016; ANTONELI *et al.*, 2018). Desta forma, esse artigo apresenta análises referentes às propriedades físicas e químicas dos solos, para compor um diagnóstico da degradação e apresentar técnicas de monitoramento, utilizando veículos aéreos não tripulados e geotecnologias.

A utilização de VANTs para estudos ligados à erosão dos solos ainda é uma inovação dentro do ramo da pesquisa geomorfológica, entretanto, ficam evidentes as diversas vantagens atribuídas ao uso deste veículo, onde pode-se citar como exemplos, a superação de obstáculos topográficos, fornecimento de imagens georreferenciadas de alta resolução, possibilidade de obter novas percepções de análise das encostas, através de fotografias aéreas e o curto intervalo de tempo necessário para obter as imagens (OLTMANN *et al.*, 2012; SALGADO, 2016; GARRITANO *et al.*, 2018; GARRITANO, 2020).

Vale ressaltar que a precisão de medição fornecida por imagens aéreas, obtidas através dos VANTs, é suficiente para compreender a dinâmica evolutiva do processo erosivo, em curto prazo de tempo, pois permite a análise das imagens obtidas e a forma como a feição se desenvolve (OLTMANN *et al.*, 2012). O uso desta tecnologia possibilita aprofundamento nas pesquisas de campo, na qual é possível determinar, através do processamento das imagens, características próprias da voçoroca e mapear a feição e seu entorno, para entender a dinâmica dos processos que ocorrem na área de interesse (REGO *et al.*, 2015).

Wild (1993) destaca que os principais fatores que influenciam a erosão são o desmatamento, a construção de rodovias que provoca impermeabilização do solo, a agricultura e pecuária, sem adoção de práticas conservacionistas, o cultivo e pecuária em encostas com elevada declividade, trilhas abertas por homens e animais, que geram a compactação do solo, e atividades econômicas que deixam o solo desprotegido, como a mineração.

Diversos autores (FULLEN; CATT, 2004; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010; GUERRA *et al.*, 2014), destacam que a erosão hídrica é a forma mais ativa de degradação dos solos, principalmente nos climas úmidos, sendo um processo natural influenciado por diversos fatores como chuva, solo, topografia, cobertura vegetal, manejo e pelas práticas conservacionistas.

Diversos processos que ocorrem na superfície do solo, como retenção superficial (VIDAL VÁZQUEZ *et al.*, 2010), infiltração, escoamento superficial, transporte sólido (DARBOUX; HUANG, 2005; CASTRO *et al.*, 2006; VOLK; COGO, 2009), o encrostamento da superfície e as trocas de calor do solo com a atmosfera (PRICE *et al.*, 1998) são influenciados pelas feições micro topográficas. Rangel e Guerra (2018a) destacam que:

Para uma análise precisa dos processos que ocasionam a erosão hídrica é necessária informação detalhada sobre a microtopografia da superfície do solo, com precisão e resolução elevada, destacando, principalmente, a modelagem dos processos relacionados com a erosão em ravinas, como a iniciação e o desenvolvimento da rede de microrravinas (RANGEL; GUERRA, 2018a, p. 392).

Sobre a influência da cobertura vegetal nos processos de erosão, Gyssels *et al.* (2005) ressaltam que a vegetação pode controlar a erosão, por meio da interceptação - através da densidade de sua copa, raízes, e folhas - alterando a distribuição do tamanho das gotas de chuva. Portanto, há necessidade de conservar a vegetação natural, principalmente as áreas florestadas, que influenciam diretamente na conservação e qualidade dos solos.

Para isso, a criação de Unidades de Conservação (UCs) e o incentivo às atividades de baixo impacto ambiental se tornaram extremamente relevantes. Uma dessas atividades é a utilização de trilhas geoturísticas, que permitem acesso a um ambiente, ou atrativo com características geológicas, ou geomorfológicas de valor significativo.

O geoturismo tem se apresentado como um segmento promissor da atividade turística, que tem características específicas e essenciais à conservação do patrimônio geológico e geomorfológico, ao desenvolvimento econômico local das comunidades envolvidas (NASCIMENTO *et al.*, 2015; JORGE; GUERRA, 2016; BRILHA, 2016; RANGEL *et al.*, 2019a).

Porém, com o crescimento dessa atividade, as trilhas geoturísticas podem sofrer impactos significativos, se não forem bem planejadas e manejadas. Diversos autores (TAKAHASHI, 1998; MAGRO, 1999; COSTA, 2008; RANGEL; BOTELHO, 2017; RANGEL *et al.*, 2019b) destacam que o pisoteio das trilhas compacta os solos, alterando sua porosidade, em razão da redução do volume de macroporos, o que eleva a resistência mecânica do solo, aumenta o escoamento superficial, e sua susceptibilidade à erosão e a perda de matéria orgânica.

Neste sentido, a avaliação dos processos erosivos em trilhas geoturísticas, em Unidades de Conservação, é fundamental para redução dos impactos negativos e degradação dos solos em ambientes protegidos.

O crescimento urbano, sem planejamento também corrobora para a degradação ambiental e diversos processos erosivos. Um exemplo é a ilha do Maranhão, que desde 1612 até os dias atuais, vem passando por uma significativa evolução, apresentando fases diferenciadas de crescimento urbano, influenciada por fatos relevantes da história da cidade. Como fases mais importantes do crescimento urbano, cabe ressaltar o surto industrial que se deu em São Luís, a partir da segunda metade do século XVIII, época em que a maioria das fábricas existentes no Maranhão localizava-se na cidade. Outro período de grande crescimento populacional ocorreu nas décadas de 1950 e 1960, devido à migração de famílias vindas do Sertão Nordeste, expulsas da grande seca de 1950. Nas décadas de 70 a 90 o contingente populacional de São Luís aumentou, em face dos projetos industriais (FERREIRA, 1989).

No sistema urbano maranhense, a cidade de São Luís situa-se no ápice da hierarquia, por possuir maior número e diversidade de funções, e por sua população urbana ser superior às demais. Convém ressaltar que, embora São Luís tenha limites político-administrativos com os municípios de São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa, em termos econômicos esses

são totalmente dependentes da capital. Portanto, uma análise da aglomeração urbana de São Luís requer uma abordagem extensiva a toda a ilha, já que as áreas ainda não totalmente integradas no espaço construído se constituem em reservas de expansão, tanto do crescimento habitacional, como aquele destinado a fins industriais, e demais atividades a serem induzidas (FERREIRA, 1989).

Dos agentes causadores dos processos erosivos em São Luís, foram observadas as ações conjugadas de diversos agentes, predominando a ação da chuva (erosão pluvial), dos ventos (erosão eólica), e ação antrópica. A interferência humana, na aceleração do processo de degradação dos solos, na maioria das vezes, está relacionada ao inadequado uso do solo.

A erosão dos solos possui vasto debate na literatura nacional e internacional, mas isso não impede que haja lacunas a responder, sobre interações de processos naturais e antrópicos, taxas, escalas, técnicas e estratégias, no intuito de reduzir e prevenir o processo erosivo (POESEN, 2018; MUSHI *et al.*, 2019). Dessa forma, faz-se necessária a realização de monitoramentos, experimentos, modelagem e ampla disseminação de métodos e dados na comunidade científica (GARCÍA-RUIZ *et al.*, 2015; CASTILLO; GÓMEZ, 2016; POESEN, 2018). Nesse sentido, há diversos meios de monitorar e investigar os processos erosivos, para determinar a perda de solos (GUERRA *et al.*, 2017).

Ireland *et al.* (1939), por exemplo, são pioneiros no uso de pinos de erosão (PE) para monitorar o recuo das paredes de voçorocas (RICHTER *et al.*, 2020). A técnica acabou popularizada para monitorar margens de rios (WOLMAN, 1959; LAWLER, 1993, 2008; CUNHA, 1996; CASTRO *et al.*, 2019). Seu uso, nos estudos de erosão em encostas tornou-se comum para medir a variação da superfície pela erosão laminar (HAIGH, 1978; GUERRA, 2005; HANCOCK; LOWRY, 2015). Seus prós e contras são, principalmente: a simplicidade, o baixo custo e a fácil adaptação a variados ambientes, enquanto qualidades; a perturbação para instalação, a demanda de trabalho e tempo para seu uso, enquanto deficiências (GUERRA, 2005; PLENNER *et al.*, 2016; LOUREIRO, 2019; BOARDMAN, 2020).

Nos últimos anos ganha campo o uso de instrumentos com tecnologia *LiDAR* – *Light Detection and Ranging*, que com densa nuvem de pontos permitem quantificar a morfologia do terreno, funcionando para sensoriamento remoto e modelagem 3D, em alto nível de detalhe (VINCE *et al.*, 2015; GOODWIN *et al.*, 2016; KRENZ *et al.*, 2019; EAGLESTON; MARION, 2020). O Laser Scanner Terrestre (LST) é um desses equipamentos de *LiDAR*, capazes de monitorar voçorocas. Como vantagens: a rapidez de aquisição de dados, menor esforço em campo, recobre milhões de pontos, e escala no nível da encosta (maior detalhe que levantamentos aéreos); como desvantagens: a necessidade de acesso às feições, por conseguinte, a dependência das condições de campo, e o elevado custo do conjunto (BONILLA, 2008; GOODWIN *et al.*, 2016; ETCHELAR, 2017; LOUREIRO, 2019).

As trilhas são áreas onde também acontecem processos erosivos, e constituem um elemento cultural presente nas sociedades humanas, desde os tempos remotos e serviram, durante muito tempo, como via de comunicação, reconhecimento de novos territórios e necessidade de deslocamento. Nas últimas décadas, as trilhas têm sido cada vez mais utilizadas como via de condução a ambientes naturais, seja para contemplação da natureza, recreação, prática de esportes radicais e atividades ecoturísticas e mais recentemente, geoturísticas (TAKAHASHI 1998; MAGRO, 1999; LEUNG; MARION, 1999; LYNN; BROWN, 2003; FIGUEIREDO *et al.*, 2010; RANGEL, 2014; JORGE *et al.*, 2016; JORGE, 2017).

No entanto, ao mesmo tempo que as trilhas são necessárias por fornecer acesso às áreas, as atividades desenvolvidas sobre elas têm sido consideradas como um dos impactos de lazer mais comum sobre os ecossistemas naturais, culminando na degradação das mesmas (Leung e Marion, 1996). As consequências advindas da má utilização das trilhas levam à degradação dos

solos, que de acordo com Lal (1997), pode ser definida como um declínio da qualidade do solo e na sua capacidade de regulador ambiental.

A respeito da degradação, é crescente o número de trabalhos que reportam o uso de trilhas e os impactos negativos resultantes do pisoteio, que podem levar à degradação física, como à compactação do solo e processos erosivos de diversas magnitudes, a degradação química, com perda de nutrientes e a degradação biológica, com redução do teor de matéria orgânica, e diminuição da atividade e diversidade da fauna do solo (COLE; SCHREINER; 1981; BRIGHT, 1986; COLE; LANDRES, 1995; MARION; COLE, 1996; TAKAHASHI, 1998; MAGRO, 1999; KUTIEL *et al.*, 1999; NEPAL, 2003; NEPAL; AMOR-NEPAL, 2004; BARROS, 2013; RANGEL; GUERRA, 2014).

Variados indicadores ambientais têm sido usados para analisar os diferentes impactos em trilhas, e apontam inúmeras alterações nas condições bióticas e abióticas do ambiente. Tabarelli *et al.* (2012) destacam que a abertura e o uso de trilhas, provocam variações de temperatura, exposição direta do solo à radiação solar e aumento do grau de exposição aos ventos. Outro fator ecológico negativo ao ambiente é a entrada de espécies exóticas (BARET; STRASBERG, 2005).

Mensuração a respeito dos possíveis sinais de estresse da vegetação têm sido analisados, por meio da comparação entre a vegetação adjacente e vegetação mais distante da trilha, dentro da mesma formação vegetal. Siles (2009) realizou um estudo experimental de pisoteio, para avaliar a resposta da vegetação em áreas de Floresta Pluvial Tropical Atlântica, em três Unidades de Conservação no Estado de São Paulo. As variáveis analisadas foram: cobertura vegetal total, riqueza de tipos vegetais, e quantidade de solo exposto. As três áreas estudadas tiveram respostas diferentes, duas mostraram-se pouco resistentes e resilientes e outra apresentou resistência moderada e recuperação após um ano. Ainda a respeito de resiliência, vegetação com alta resistência ao pisoteio, e/ou resiliência, pode sustentar o uso da trilha com pouca degradação (COLE, 1988).

Os impactos de recreação podem variar entre os tipos de florestas, devido as diferenças na estrutura dos solos e condições dos nutrientes, que por sua vez, conduzem a diferenças na resistência do solo e vegetação (TORN *et al.*, 2009; BARROS *et al.*, 2013). É importante destacar as inter-relações entre solos e plantas, pois nutrientes adequados são necessários às plantas (primários e secundários) e às atividades microbianas. Porém, alterações que possam vir a ocorrer na estrutura física do solo, principalmente pela compactação, podem levar à diminuição da atividade microbiana e disponibilidade de nutrientes (MAGRO, 1999).

A largura da trilha também é um elemento importante a ser investigado, pois tem implicações ecológicas e estéticas. Dependendo da largura da trilha e da situação do fragmento em questão, efeitos próximos, ou tão sérios quanto os efeitos de borda, podem ser notados (EISENLOHR, 2011).

Com relação à compactação dos solos em trilhas, atividades como caminhadas, trânsito de cavalos, ciclistas e veículos tem sido comparados. Wilson e Seney (1994) Pickering *et al.* (2010), Hawkins e Weintraub (2011), seguindo essa linha de pesquisa, constataram que atividades de caminhada e ciclismo apresentaram menor degradação relacionada à atividade erosiva, quando comparada a trilhas onde há presença constante de cavalos e veículos *offroad*.

Índices de compactação do solo no leito da trilha e com as áreas laterais, paralelas ao leito, também têm sido usadas como parâmetros de análise. Figueiredo *et al.* (2010), Saraiva (2011), Rangel e Guerra (2014), quantificaram índices de compactação no leito da trilha, quando comparados com as áreas laterais. Para a análise dos graus de compactação dos solos e degradação dos solos em trilhas, parâmetros físicos como densidade, textura e porosidade foram usados por Rangel e Guerra (2014), Jorge (2017). Dessa forma, visando contribuir para o entendimento da dinâmica e os diferentes graus de impactos advindos do uso em trilhas, são

aqui utilizados parâmetros físicos e químicos, como densidade dos solos, pH, textura e matéria orgânica de amostras de solos coletadas no leito da trilha (TR) e talude (TA).

Como esse artigo aborda erosão dos solos, levando em consideração diferentes áreas de estudo, embasamento teórico-conceitual, técnicas, metodologias e formas de abordar o tema central, o mesmo é aqui destacado, apontando a localização de cada uma delas, bem como os métodos utilizados e os principais resultados alcançados, com suas respectivas conclusões. É apresentada também uma vasta lista de referências bibliográficas, desde as mais clássicas, até as mais atuais, tanto nacionais, como internacionais.

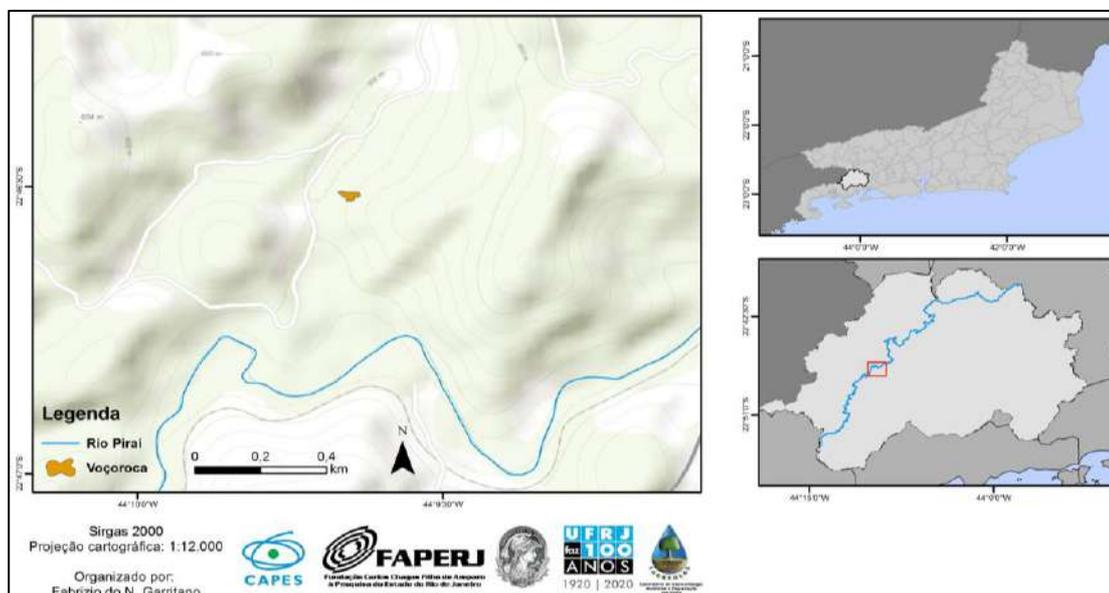
## ESTUDOS DE CASO E LOCALIZAÇÃO

### Voçorocas

#### a) Voçoroca monitorada por VANT, em Rio Claro (RJ)

A área de estudo está localizada no alto curso da bacia hidrográfica do rio Piraí, município de Rio Claro – RJ, que está inserida no médio vale do rio Paraíba do Sul (Figuras 1 e 2). O histórico de uso e ocupação desta área, acompanhou os ciclos econômicos que agiam em paralelo ao desenvolvimento do Brasil. Houve desmatamento generalizado do bioma nativo de Mata Atlântica, ao longo dos anos, o qual reflete o atual cenário dos poucos fragmentos remanescentes deste bioma no vale do Paraíba (PEREIRA *et al.*, 2016; GARRITANO *et al.*, 2019; GARRITANO, 2020). Dentre as atividades que intensificaram o desmatamento, a produção de cana-de-açúcar, café e uso para pecuária apresentam grande relevância.

Figura 1 - Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado por Fabrizio Garritano.

Figura 2 - Voçoroca monitorada.



Foto: Fabrizio Garritano.

Essas transformações que ocorreram ao longo do vale do Paraíba, no decorrer dos anos, intensificaram o processo de degradação ambiental, ocasionado pela ação antrópica e, hoje, nota-se a grande quantidade de municípios ao longo do vale que apresentam extensa quantidade de áreas degradadas pela erosão dos solos (DIAS, 2005; PINTO *et al.*, 2015; GARRITANO, 2018; 2020). A erosão hídrica dos solos é caracterizada como um processo natural, que é intensificado pela ação antrópica, e compromete os principais recursos naturais, ou seja, o solo e a água superficial (GUERRA *et al.*, 2017; ETCHELAR; GUASSELLI, 2018).

#### **b) Voçoroca do Sacavém em São Luís**

A voçoroca em estudo localiza-se na porção centro-oeste do município de São Luís, mais especificamente no bairro do Sacavém. Essa feição situa-se na margem direita do rio das Bicas que compõe a bacia do rio Bacanga. A área apresenta afloramentos da Formação Barreiras, com encostas íngremes e pouca vegetação, com intensa atividade de extração mineral, inclusive pela própria população local.

De acordo com o monitoramento, constatou-se uma significativa evolução de suas cabeceiras, colocando em risco as torres de transmissão de energia da ELETRONORTE e as residências circunvizinhas. Quanto ao uso do solo na área de entorno da voçoroca do Sacavém, pode-se definir as seguintes categorias: área urbanizada e aproveitamento econômico.

A categoria área urbanizada se caracteriza por espaços com intensa ocupação populacional, predominando usos residenciais padronizados, ou áreas residenciais consolidadas, e áreas com atividades terciárias (MARANHÃO, 1998). Esta categoria está mais evidenciada nas proximidades da voçoroca do Sacavém, o que pode acarretar perdas materiais e humanas, em face do maior potencial de risco ambiental da área.

A categoria de uso aproveitamento econômico relaciona-se com as atividades basicamente ligadas ao setor primário, tais como: granjas, áreas de material de empréstimo para construção civil e estabelecimentos agropecuários (MARANHÃO, 1998). Na voçoroca do Sacavém, essa categoria está representada essencialmente pela extração mineral, com grandes

prejuízos econômicos e ambientais, sendo realizada pela comunidade, para atendimento local e das indústrias de construção civil.

Ambas categorias de uso e ocupação estão intrinsecamente relacionadas com o aparecimento e aceleração dos processos erosivos locais. Na área urbanizada, a partir da impermeabilização do solo, ocorre a diminuição das taxas de infiltração, o que contribui para o início de processos erosivos nas áreas desprovidas de vegetação.

A categoria aproveitamento econômico, em que se destaca a extração de silte e argila, caracteriza-se pela forte retirada desses minerais na base das voçorocas. A constante extração dos minerais nas bases das feições erosivas, ocasiona o colapso do material adjacente, interferindo diretamente na sua evolução, além de apresentar risco potencial para os habitantes da localidade.

### **c) Macaé – RJ**

Macaé situa-se no Norte Fluminense e sua área serrana tem as encostas degradadas pela erosão, com intenso uso agropecuário, de pisoteio excessivo do solo e alta demanda de recursos hídricos, devido ao crescimento da cidade pela atividade petrolífera. Característica da região da Serra do Mar, a área apresenta período seco no inverno, e chuvoso no verão. Mapeamentos de Neves (2011), na sub-bacia do rio São Pedro, apontaram 40,32% de cobertura agropecuária e 125 feições erosivas, sendo 50% delas voçorocas. A paisagem geomorfológica do leste da Serra do Mar muda de barreira montanhosa para o conjunto de serras paralelas, cortadas pelos vales dos principais rios. Dominam os Cambissolos, seguidos por Latossolos Vermelho-amarelos. A vegetação encontra-se devastada em grande parte, com fragmentos e florestas secundárias sofrendo pressão.

### **d) Rio Claro – RJ**

Rio Claro faz a conexão entre a Costa Verde e o Médio Vale do rio Paraíba do Sul, pela RJ-155, ligando Angra dos Reis à Via Dutra. Situado no reverso da escarpa da Serra do Mar, o clima tropical de altitude confere médias anuais entre 1.507 e 1.786 mm de chuva, registrados pelas estações de Lídice e Barragem de Tócos (INEA, 2015). Ravinas e voçorocas estão presentes na paisagem, porém em menor proporção do que na Serra Macaense. Os solos predominantes são Cambissolos, nas encostas íngremes, associados a Latossolos Vermelho-amarelos, no terço inferior das encostas e fundos de vale, enquanto a vegetação apresenta fragmentos florestais isolados de Mata Atlântica, nos topos do relevo, com colinas e planícies cobertas por pastagens e agricultura pouco expressiva (LOUREIRO, 2019).

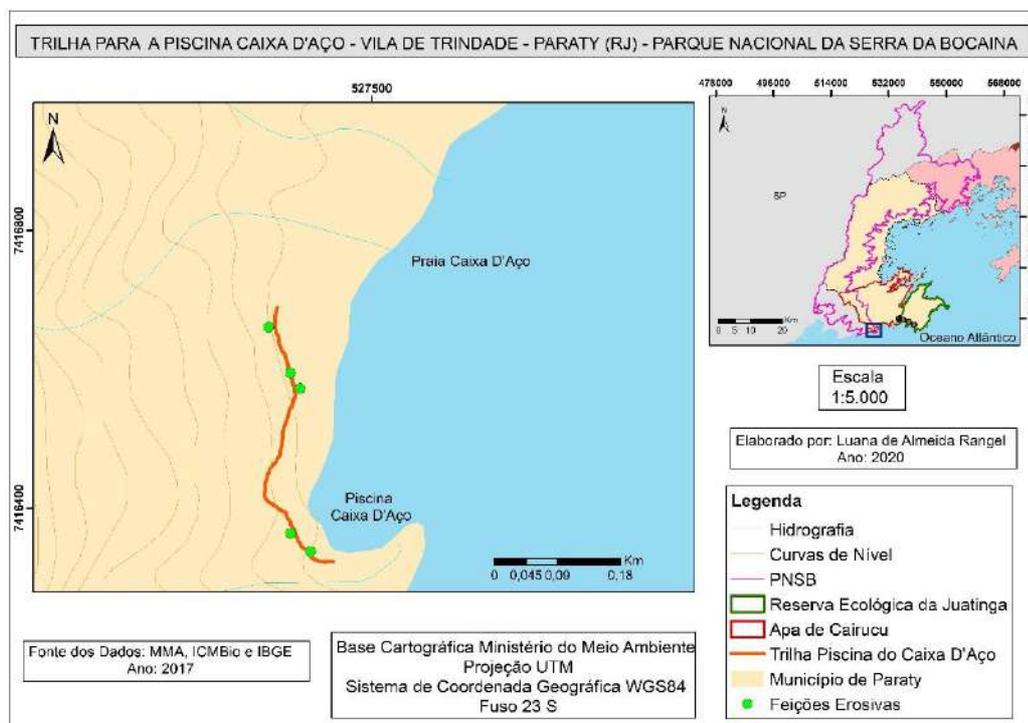
## **Erosão em trilhas**

### **a) Erosão em trilha no Parque Nacional da Serra da Bocaina**

A trilha estudada está inserida em Unidade de Conservação (UC), localizada no município de Paraty, no litoral sul do estado do Rio de Janeiro. Essa UC foi escolhida por estar inserida na Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, que tem como principais objetivos a manutenção da conservação do Bioma, através da implementação de um corredor ecológico contínuo de Mata Atlântica, ao longo da costa brasileira, unindo os fragmentos florestais existentes. O Parque Nacional da Serra da Bocaina (PNSB) possui área de aproximadamente 104.000 hectares, da qual cerca de 60% localiza-se no Estado do Rio de Janeiro (municípios de

Angra dos Reis e Paraty) e 40% no Estado de São Paulo (municípios de São José do Barreiro, Ubatuba e Cunha) (Figura 3).

Figura 3 - Localização da área de estudo.



Elaborado por Luana A. Rangel (2020).

O clima da região é o tropical úmido, influenciado pelo efeito orográfico da Serra do Mar, que atua sobre o comportamento dos sistemas frontais, principais responsáveis pela pluviosidade regional (ICMBIO, 2002). 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, 2002). O arcabouço geológico é formado predominantemente por granitos e gnaisses do Complexo Gnáissico-Granitóide, de idade proterozóica, os quais se associam sedimentos de idade cenozóica (GUERRA *et al.*, 2013).

O tipo de solo predominante é o Cambissolo Háptico Tb Distrófico, ocupando quase toda a escarpa da Serra do Mar (ICMBIO, 2002). Na área onde a trilha está localizada há o predomínio de Floresta Ombrófila Densa secundária, em estágio médio e avançado de recuperação (ICMBIO, 2002).

A vila de Trindade, onde está situada a trilha estudada, está inserida parcialmente nos limites do PNSB, e tem se destacado como um dos principais destinos do turismo na área de inserção desta UC (CONTI; IRVING, 2014; RANGEL; GUERRA, 2018b). Além disso, em função da beleza cênica dos vários pontos geoturísticos, várias trilhas têm sido exploradas, destacando-se a que permite acesso ao sítio de geodiversidade: Piscina Natural do Caixa D'Aço. A expansão da atividade turística vem desencadeando inúmeros impactos sobre as trilhas e sobre a conservação dos ambientes naturais, principalmente da piscina natural que é o principal atrativo geoturístico da Vila.

### c) Erosão em trilhas em Ubatuba – SP

O município de Ubatuba está localizado entre 23º 26' 13" Latitude sul e 45º 04' 08" Longitude Oeste. Possui área de 712 Km<sup>2</sup> e a população total é de 90.799 habitantes, de acordo com estimativas do IBGE de 2018. A área de estudo está situada na parte sul do município e sua área total é de 80 Km<sup>2</sup>. As principais atividades econômicas são turismo, construção e pesca. Seu território tem forma alongada, com direção sudoeste-nordeste, com 60 km de extensão. Sua largura varia de 5 a 17 km, da costa ao interior. Segundo Cruz (1974), a Serra do Mar comanda a direção do litoral em Ubatuba, dependendo de quão próximas as praias estejam das montanhas.

Em relação à geologia, granitos e gnaiss sustentam o esporão cristalino (Proterozóico-Eopaleozóico e Mesozóico), e os sedimentos cenozóicos estão distribuídos por toda a planície costeira (HASUI *et al.*, 1993). Os principais solos são os Inceptissolos, Latossolos, Entisóis e Histossolos. Os Entisols são os principais tipos de solos na área de estudo, associados a relevo colinoso a montanhoso e nas planícies fluviais, enquanto os Entisols ocorrem principalmente nas encostas íngremes da Serra do Mar (SMA / FF, 2006). O clima típico é o tropical quente e úmido, com temperaturas médias de 19º C e maior precipitação anual em torno de 4.000 mm, com 2.500 mm em média (MONTEIRO, 1973; JORGE *et al.*, 2003). Esses altos índices de chuvas, segundo Monteiro (1973), são causados pela umidade trazida pelos ventos originários do Oceano Atlântico, que se condensam quando atingem a barreira orográfica, causada pela Serra do Mar. Sob essas características físicas, existe a Mata Atlântica, onde é possível encontrar ecossistemas associados. Essa floresta é considerada um dos 34 hotspots mundiais, sendo uma prioridade para sua conservação, devido sua alta biodiversidade e ao grande número de espécies endêmicas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Como esse artigo aborda erosão dos solos, levando em consideração diversos estudos de caso, conseqüentemente, os materiais e métodos aqui adotados, estão separados em tópicos, para que o leitor possa entender as formas como foram abordadas essas áreas no território nacional, levando em conta diferentes metodologias, apropriadas a cada uma dessas áreas.

### Voçorocas

#### a) Monitoramento de feições erosivas com uso de veículo aéreo não tripulado e geotecnologias

Foi feito um levantamento bibliográfico e treinamentos com o VANT modelo “*Phantom 4 pro obsidian*” para que os voos e processamento das imagens seguissem o padrão determinado pela circular técnica publicada pela EMBRAPA (2018). A etapa seguinte foi a realização dos trabalhos de campo em março de 2018 e janeiro de 2020. Nestes trabalhos de campo, voos pré-programados foram realizados (BARRY; COAKLEY, 2013), através do *software* “DroneDeploy”, para que fossem obtidas as imagens aéreas.

Com as imagens aéreas obtidas, o processamento digital foi realizado utilizando os *softwares* “pix4dmapper” e “dronedeploy”, que possibilitaram mensurar área, comprimento e largura da voçoroca, bem como elaborar perfis transversais e longitudinais, para compreender a forma como o interior da feição evoluiu, através da concentração do escoamento superficial (GUPTA *et al.*, 2018; TSCHIEDEL *et al.*, 2018; GARRITANO, 2020).

Este VANT possui uma câmera RGB (*red, green and blue*), que atribui um espectro tridimensional de cores a cada pixel das fotos, fazendo uma diferenciação do tipo de material que compõe a superfície do solo (BARBOSA *et al.*, 2016). Com a câmera RGB do VANT, foi possível obter imagens que permitiram realizar diagnóstico da área mapeada, no que diz respeito à cobertura vegetal, pois cada tipo de cobertura (solo exposto, ou com vegetação) responde de diferente forma aos espectros fotocromáticos da câmera do VANT.

#### **b) Monitoramento dos processos erosivos na voçoroca do Sacavém, São Luís - MA**

A ocorrência dos processos erosivos envolve uma série de fatores que segundo Guerra (1998), são fatores controladores que determinam as variações nas taxas de erosão e podem ser subdivididos em: erosividade (causada pela chuva), erodibilidade (proporcionada pelas propriedades dos solos), características das encostas e natureza vegetal.

De acordo com Oliveira (2005), a erosão por voçoroca é causada por vários mecanismos que atuam em diferentes escalas temporais e espaciais, podendo ser entendidas por: deslocamentos de partículas, transporte por escoamento superficial difuso, transporte por fluxos concentrados, erosão por quedas d' água, solapamentos, liquefação, movimentos de massa e arraste de partículas.

Dos agentes causadores dos processos erosivos na voçoroca do Sacavém, em São Luís, foram observadas as ações conjugadas de diversos agentes, predominando a ação da chuva (erosão pluvial), dos ventos (erosão eólica), e ação antrópica. Quanto ao trabalho das chuvas, percebeu-se a atuação de vários mecanismos, dando origem a diferentes feições erosivas, que ocorrem nas voçorocas, tais como: pedestais, alcovas, sulcos, filetes, dutos, marmitas, quedas de areia, quedas de torrões, costelas, fendas, movimentos de massa, entre outros, descritos por Oliveira (1999).

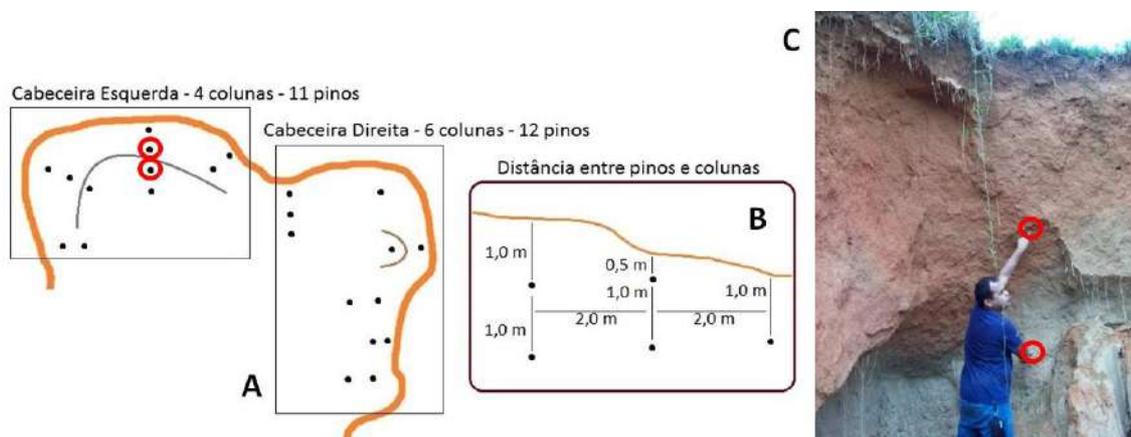
A voçoroca do Sacavém localiza-se na porção centro-oeste do município de São Luís, mais especificamente no bairro do Sacavém. Essa feição está disposta na cabeceira de drenagem na margem direita do rio das Bicas que compõe a bacia do Bacanga, possuindo ~35 m de comprimento e ~75 m de largura. A área apresenta afloramentos da Formação Barreiras, com encostas íngremes e pouca vegetação (floresta secundária mista e capoeira), com intensa atividade de extração mineral.

O monitoramento da referida feição erosiva foi realizado segundo o método proposto por Guerra (1996), que utiliza: estacas colocadas ao redor da voçoroca; trena, para fazer as mensurações das distâncias das estacas até a borda da voçoroca e bússola de geólogo (Brunton), para se obter a orientação das medidas. Utilizou-se o papel milimetrado para visualizar a evolução das cabeceiras.

#### **c) Monitoramento de processos erosivos em Macaé - Pinos de Erosão (PE)**

Foram instalados pinos de erosão nas paredes da voçoroca (IRELAND *et al.*, 1939), conforme a figura 4A, setorizando a voçoroca em cabeceira esquerda (CE) e cabeceira direita (CD). A figura 4B mostra as regras de Loureiro (2013) para dispor os PE. O primeiro PE de cada coluna é posto alternadamente a 0,5 e 1,0 metro da superfície. Cada coluna distante 2,0 metros (medida horizontal) e cada pino distante 1,0 metro (medida vertical). Na figura 4C, Bezerra aponta PE nº 2 e 3 (de cima para baixo), da 2ª coluna da CE (em vermelho nas figuras 4A, 4B e 4C).

Figura 4 - Croquis (A) do grid de pinos na cabeceira e (B) das regras para pinos e colunas; em (C) Bezerra aponta para PE da 2ª coluna de CE.



Fonte: Croquis e Foto de Hugo Loureiro, 2011.

A distribuição dos PE gera um grid, que permite realizar cálculos geométricos e estimar taxas de massa e volume de solo erodido. O tamanho dos PE (40 cm), representa a exposição máxima destes (profundidade), e as distâncias verticais e horizontais entre eles a altura e a largura. Aplicam-se fórmulas matemáticas que levam ao chamado “prisma erodido” (LOUREIRO, 2013). Este representa o volume estimado de solo retirado daquele setor da voçoroca. Os valores da média de densidade do solo (DONAGEMMA, 2011), da feição e do volume erodido, levam à massa de solo retirado da malha de pinos, através da fórmula  $D = \frac{m}{V}$  onde D é densidade do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), m é massa de solo erodido (g); e V é volume do “prisma erodido” ( $\text{cm}^3$ ). Por último são calculadas as proporções destes valores com a área da feição ( $245 \text{ m}^2$  ou  $0,025 \text{ ha}$ ), estimando a taxa de erosão em  $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  (LOUREIRO, 2013). O foco dos resultados dos PE, neste artigo, é voltado à análise quantitativa a partir destes cálculos. Por isso, os valores mensais da exposição dos PE não será objeto de discussão.

#### d) Laser Scanner Terrestre (LST) – Rio Claro/RJ

Foi realizada uma ida a campo para a varredura com o LST modelo *Leica ScanStation C10*, cedido pelo GeoCart – Laboratório de Cartografia do Departamento de Geografia/UFRJ. As condições de campo (27 de fevereiro de 2018) não permitiram o uso no interior da voçoroca, devido a 95,6 mm de chuva, no dia anterior. Foram realizados três ângulos de varredura (A1, A2 e A3) na superfície, pelas bordas da voçoroca. A cada ângulo escaneado, os demais recebiam os alvos (pontos de controle) de calibração do LST (Figura 5) e geração das nuvens de pontos (Figura 6).

Figura 5 - Calibração do LST para varredura laser.



Foto: Diego Janoti (2018).

Figura 6 - nuvem de pontos unificada dos três ângulos de varredura.

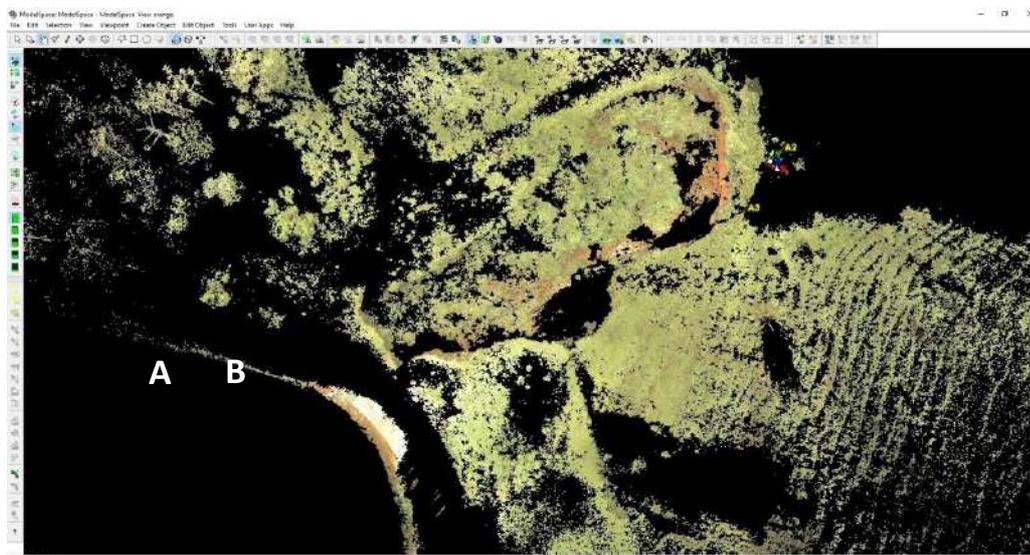


Foto: Diego Janoti (2018). Processamento: Hugo Loureiro (2019).

A varredura A2 (realizada primeiro) teve alta resolução (5 cm de precisão), durando 26 minutos. Para A1 e A3 foi definida resolução média (10 cm de precisão), pois se aproximava chuva, o que fez o tempo de varredura cair para, respectivamente, quatro e seis minutos. O campo de visão do LST foi de  $90^\circ \times 90^\circ$ , sendo o máximo do LST de  $360^\circ$  horizontal x  $270^\circ$  vertical. No *software* Leica Cyclone os dados de cada varredura são unificados, gerando uma única nuvem de pontos a tratar. Foram gerados modelos 3D e mensurações, resultando em curvas de nível, hipsometria, extensão, área e volume da voçoroca. O uso do LST teve caráter experimental, pois é preciso mais pontos de varredura, para evitar áreas não escaneadas, o que

ocorreu pelas dificuldades em campo. Os modelos apresentaram vazios que prejudicam a precisão. Contudo, o LST apresentou resultados potenciais a serem explorados.

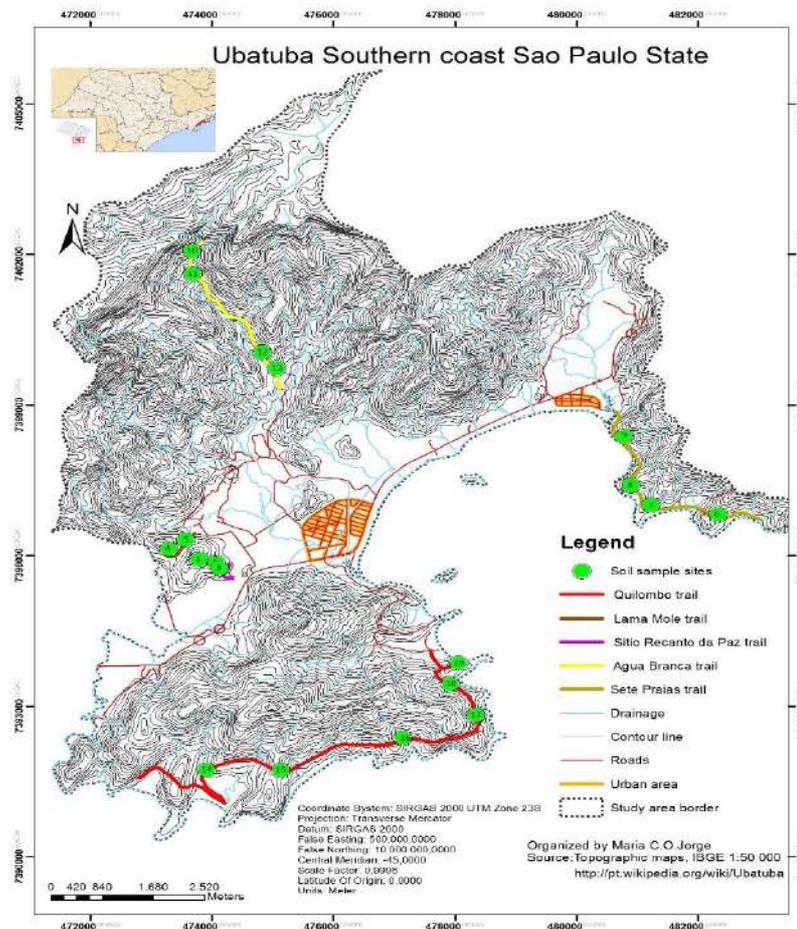
## Processos erosivos em trilhas

### a) Erosão dos solos em trilhas geoturísticas no litoral do Parque Nacional da Serra da Bocaina

A pesquisa foi realizada a partir da adaptação da metodologia de Leung e Marion (1996), onde são avaliadas características da trilha, como a presença de feições erosivas, afundamentos no leito, acúmulo de água e de áreas degradadas. Já a segunda metodologia utilizada foi o Manejo de Impacto de Visitação (MIV), que prioriza o estudo dos impactos do uso da visitação, visando o controle, ou redução desses impactos. Partindo do princípio, que todo tipo de visitação causa impacto, o MIV não busca o impacto “nulo”, mas sim, o impacto em níveis aceitáveis (GRAEFE *et al.*, 1990).

Para o mapeamento dos processos erosivos foram coletados em campo, com o GPS GARMIN 60, os pontos onde havia a presença de algum tipo de erosão, como ravinas, ou pequenos movimentos de massa, e foi gerado um mapa da localização das mesmas, através da utilização do software ArcGis 10 (Esri). Além disso, as feições foram ilustradas através de fotos.

Figura 7 - Mapa da região sul de Ubatuba-SP, com localização das trilhas e seus respectivos pontos de coleta



Fonte: os autores.

## b) Erosão em trilhas em Ubatuba – SP

As amostras indeformadas foram usadas para determinação da densidade do solo. As amostras deformadas foram secas *in natura* e usadas para determinar a textura, densidade real, porosidade e teor de matéria orgânica, usando o Manual da EMBRAPA (2011). Foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas, a uma profundidade de 10 cm, em pontos do leito de trilhas (TR) e taludes (TA), localizados em cinco trilhas na região sul do município de Ubatuba: Trilha Sitio Recanto da Paz (extensão 907 metros e 3 pontos de coletas), Trilha Sitio Lama Mole (extensão 750 metros e 3 pontos de coletas), Trilha das Sete Praias (extensão 4,5 km e 4 pontos de coletas), trilha Água Branca (extensão 4,5 km e 4 pontos de coletas) e Trilha do Quilombola (extensão 9,5 km e 5 pontos) (Figura 7).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Assim como nos itens anteriores desse artigo, os resultados e discussões estão divididos em subitens, que correspondem a algumas das áreas estudadas pelo LAGESOLOS, ao longo de 26 anos de sua história. Não foi possível incluir todas as áreas que têm sido analisadas nesse período, porque envolveria um espaço bem maior da presente Revista. Mas, com esses estudos de caso, espera-se que o leitor possa ter uma visão de parte do que tem sido pesquisado por parte dos membros do Laboratório.

### Voçorocas

#### a) Monitoramento e resultados, com uso de VANT, em Rio Claro (RJ)

A partir do uso de VANT, no município de Rio Claro, durante quase dois anos, foi possível monitorar a evolução de voçorocas e de suas feições.

O perfil longitudinal em amarelo apresenta a altitude máxima e mínima e o comprimento da voçoroca, que correspondem a aproximadamente 538 m, 506 m e 61 m, respectivamente. Desta forma, é possível determinar a amplitude altimétrica da feição que apresenta o valor de 32 m (Figura 8). Através da análise deste perfil, é possível observar a forma que a voçoroca se desenvolve ao longo da encosta, e como varia a partir do momento em que o saprolito fica exposto, indicado no perfil, pela ruptura de desnível mais acentuada.

O perfil transversal, em azul, indica um trecho da largura da voçoroca, com valor de 25 metros, que apresenta característica determinante, para afetar o comportamento do escoamento superficial no interior da feição. A partir deste ponto, o escoamento superficial tende a se desenvolver por dois caminhos de diferentes profundidades. O sulco à esquerda, mais raso, apresenta algum fator ligado à topografia, ou presença de cobertura vegetal, que interfere, dispersando o escoamento, direcionando-o para o caminho preferencial da água, caminho da direita, de pedofoma côncava, indicado pelo sulco mais profundo, que concentra maior convergência de escoamento superficial, onde a erosão age com mais intensidade (SILVA NETO, 2013; SENSOY; KARA, 2014; CÁRCELES-RODRÍGUEZ *et al.*, 2017).

O perfil transversal, em vermelho, indica a largura máxima da voçoroca, que corresponde a aproximadamente 29 metros. O resultado do desenvolvimento do escoamento superficial concentrado, atuando de maneira mais efetiva no caminho da direita, fica evidente neste perfil, pois o sulco erosivo apresenta profundidade significativamente maior, em comparação ao outro lado na mesma altitude. Além disso, é possível observar, neste perfil, que a erosão chega a atingir o saprolito, indicado pelo ponto mais baixo da concavidade do perfil.

A análise dos perfis permitiu identificar que a erosão atingiu o saprolito, delimitado pela linha tracejada de cor branca. É possível também notar a presença de terracetes na área, que são indicadores da compactação do solo, causada pelo pisoteio constante do gado, que abre rotas para passagem e deixa essas feições na encosta (OLIVEIRA *et al.*, 2015; FUSHIMI; NUNES, 2017; ANTONELI *et al.*, 2018).

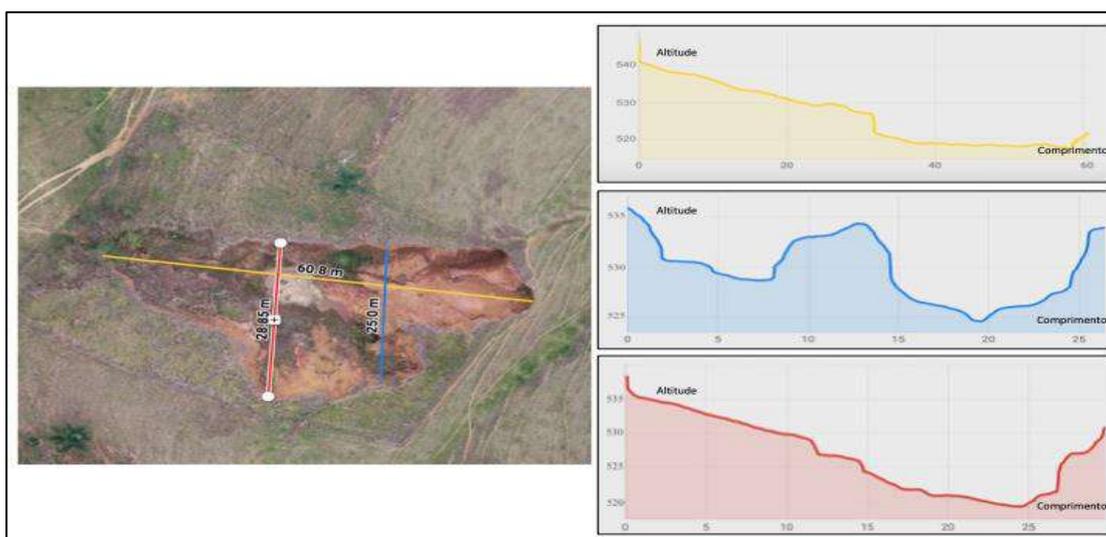
Ao realizar a comparação entre os dois monitoramentos, pode-se observar que a voçoroca cresceu aproximadamente 2,4 metros em direção à cabeceira e 1,15 metros na maior largura (Figuras 8 e 9; Tabela 1). Este fato corrobora que este ponto está com o processo erosivo ativo e é necessário realizar algum tipo de intervenção para minimizar esta evolução.

Figura 8 - Perfis transversais e longitudinais do monitoramento em 2018.



Garritano, 2018.

Figura 9 - Perfis transversais e longitudinal, do monitoramento de 2020.



Garritano, 2018.

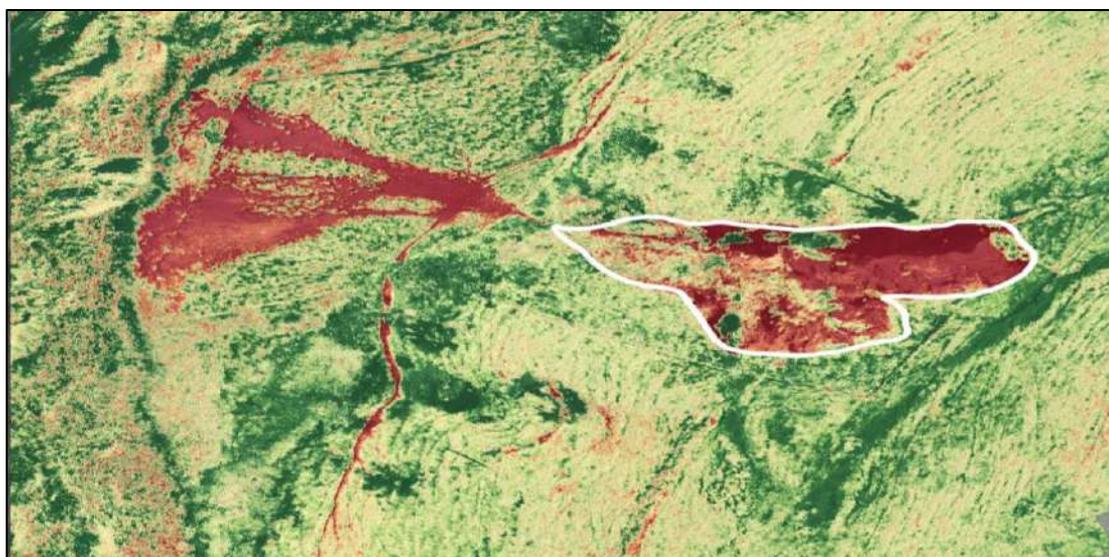
Tabela 1 - Medidas da feição nos anos de 2018 e 2020.

	Comprimento	Largura 1 (azul)	Largura 2 (vermelho)
2018	60,8m	25m	28,85m
2020	63,2m	25,12m	30,22m

Garritano, 2020.

O produto do processamento digital das imagens, que fazem referência à diferenciação da superfície do solo, está disposto conforme a figura 9. As cores indicam o tipo de cobertura vegetal presente na área: verde escuro – área com cobertura vegetal densa; verde claro – área com gramíneas; vermelho – solo exposto; linha branca – contorno da feição (GARRITANO, 2020).

Figura 10 - Tipo de cobertura do solo.



Garritano, 2020.

A partir da análise desta figura, pode-se observar de forma clara a geometria da voçoroca, assim como seu entorno, podendo diagnosticar de forma mais eficaz e rápida, as áreas que estão sofrendo com o processo erosivo.

#### **b) Monitoramento e reabilitação de processos erosivos acelerados na voçoroca urbana do Sacavém, área urbana de São Luís (MA)**

O regime de chuvas da ilha contribui fortemente para o aumento das taxas de evolução, verificando que os maiores recuos da voçoroca do Sacavém, de acordo com os dados do monitoramento, foram observados nas coletas dos índices pluviométricos durante, ou após o período chuvoso. O constante desmatamento e a queima da vegetação da área expõem o solo ao impacto direto das gotas da chuva, causando o processo de encrostamento, tendo como consequência baixas taxas de infiltração e aumento do escoamento superficial, favorecendo a evolução da erosão (Figura 11).

Figura 11 - Vista parcial da voçoroca do Sacavém.



Foto: Fernando Bezerra, 2011.

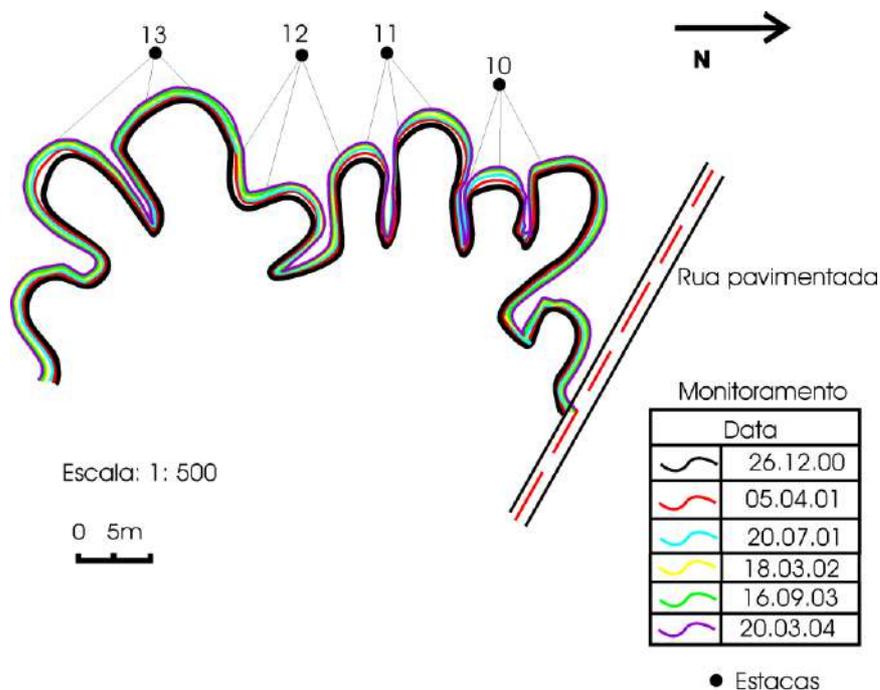
A análise dos dados de monitoramento das cabeceiras da voçoroca do Sacavém revelou pouca evolução durante quatro anos de monitoramento, porém a remoção de suas bases é causada pela extração ilegal, principalmente de areia fina, utilizada para a construção civil. Os maiores recuos observados foram nas estacas 10 e 13 (Tabela 2, Figura 12), que ocorreram devido aos pequenos movimentos de massa, nas cabeceiras da voçoroca, com alto grau de compactação e incipiente cobertura vegetal. A evolução desse processo pode colocar em risco as torres de transmissão de energia da ELETRONORTE e as residências circunvizinhas.

Tabela 2 - Dados do monitoramento da voçoroca do Sacavém.

LOCALIZAÇÃO		MEDIDAS						
ESTACAS	Rumo	1 <sup>a</sup> 26.12.00	2 <sup>a</sup> 05.04.01	3 <sup>a</sup> 20.07.01	4 <sup>a</sup> 18.03.02	5 <sup>a</sup> 16.09.02	6 <sup>a</sup> 04.10.03	7 <sup>a</sup> 20.03.04
Estaca 10	188°	13,50	13,40	13,17	13,10	13,05	13,03	13,03
	192°	13,40	13,40	12,58	11,56	11,50	11,50	11,49
	203°	11,03	11,00	9,55	9,54	9,54	9,52	9,52
Estaca 11	191°	14,85	14,14	13,58	13,56	13,40	13,35	13,32
	196°	13,93	13,65	13,33	13,16	13,16	13,14	13,10
	205°	14,35	13,45	13,29	13,25	13,00	13,00	12,58
Estaca 12	195°	17,15	16,78	16,60	16,60	16,60	16,57	16,57
	208°	19,30	18,00	17,95	17,20	17,20	17,18	17,15
	224°	19,80	19,37	19,28	19,13	18,60	18,55	18,55
Estaca 13	200°	19,35	18,80	18,70	17,90	17,90	17,87	17,87
	240°	7,63	7,22	7,10	7,03	7,00	6,56	5,54
	250°	13,40	12,80	12,50	12,45	9,50	9,30	9,28

Fonte: os autores.

Figura 12 - Monitoramento da voçoroca do Sacavém, em diversos períodos.



Fonte: Bezerra, 2004.

A reabilitação da área degradada por voçorocamento com técnica de bioengenharia foi dividida em três etapas: reconstrução dos taludes; aplicação dos insumos e geotêxteis; e manutenção das obras. A reconstrução dos taludes da voçoroca foi executada a partir da utilização de uma retroescavadeira e manualmente pelos trabalhadores contratados, resultando em diferentes declividades e comprimentos de encostas com as seguintes características (Figura 12): Ponto A = 28° e 4 m; Ponto B = 33° e 6,5 m; Ponto C = 25° e 2,80 m; Ponto D = 24° e 2,60 m; Ponto E = 28° e 3,4 m; Ponto F: 40° e 6 m.

Figura 13 - Área com aplicação da técnica de bioengenharia de solos.



Foto: Fernando Bezerra, 2011.

Os taludes foram reconstruídos com o objetivo de diminuir a alta declividade, que em alguns pontos chegavam até 90°, como também diminuir o comprimento da rampa, evitando o aumento da velocidade do escoamento superficial. No final das rampas foram fixadas paliçadas de madeira para ancorar o material inconsolidado e o substrato do adubo de palmeira. As paliçadas de madeira também foram colocadas acima das rampas reconstruídas, servindo como quebra da velocidade do escoamento superficial. A drenagem foi feita com sacos de estopa preenchidos com areia do próprio local, sementes de braquiária e adubo de palmeira.

O adubo de palmeira é oriundo da decomposição do tronco de diversos tipos de palmáceas, depois ensacados e comercializados. Para a recuperação de 2000 m<sup>2</sup> foram necessários 400 sacos desse adubo. O capim braquiária (*Brachiaria brizantha*) proporciona boa proteção ao solo, e sistema radicular com tamanho variado, atingindo até um metro de profundidade.

Os geotêxteis foram aplicados após essa fase, com auxílio de grampos de madeira com 20 cm de comprimento. Para facilitar o trabalho, os geotêxteis de buriti foram unidos em grupos de 4 e 8 para cobrir uma área maior e diminuir o uso das estacas. Essas telas ancoram os sedimentos, adubo de palmeira e sementes (servindo para sua germinação), diminuem a velocidade do escoamento superficial, retêm a umidade, diminuem a insolação direta na superfície, fornecem matéria orgânica ao solo, conforme resultados obtidos por Bezerra (2006). Os geotêxteis oferecem proteção ao solo, até a encosta ficar estabilizada com a cobertura vegetal. Os índices pluviométricos, durante o período de execução das atividades corretivas, foram mínimos.

A manutenção das obras de intervenção constitui importante etapa nos projetos de reabilitação das áreas degradadas, uma vez que determinadas características (como elevado índice pluviométrico e solos com alta suscetibilidade à erosão, como no caso do Sacavém) podem comprometer todo o trabalho. A manutenção foi realizada com a construção de mais pontos de drenagem (Figura 14).

Figura 14 - Área com aplicação da técnica após um mês.

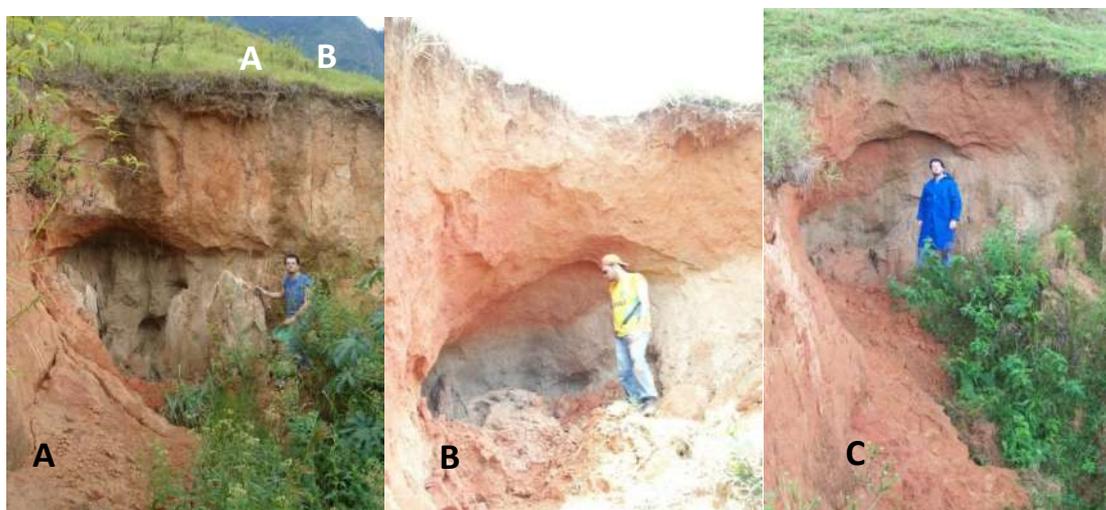


Foto: Fernando Bezerra, 2011.

### c) Pinos de erosão em Macaé - RJ

Com um modelo geométrico criado de acordo com o grid dos PEs e suas mensurações de exposição, ou remoção, Loureiro (2013) estimou as taxas de erosão. O volume de solo erodido foi de 1,73 m<sup>3</sup> na CE – alcova de regressão (Figuras 14A, 14B e 14C). Com densidade do solo da voçoroca em 1,44 g/cm<sup>3</sup>, a massa de solo removido foi de 2,49 t. A área da feição em 245 m<sup>2</sup>, equivale a 0,025 ha, que extrapolada para 1 ha, representaria uma taxa de 100 t·ha<sup>-1</sup>.

Figura 15 - Alcova de regressão ativa: (A) em março de 2011, antes do monitoramento com PE; (B) em janeiro de 2012, com remoção dos pinos nº 1 e 2 da 2ª coluna da CE; (C) em maio de 2012, último monitoramento de PE, após 12 meses.



Fotos: Hugo Loureiro (2012).

Há limitações no método dos PE, referentes à baixa representação espacial, aos distúrbios causados ao solo, e até à experiência do operador, possibilitando erros de dados (PLENNER *et al.*, 2016; NADAL-ROMERO; GARCÍA-RUIZ, 2018). Fora a remoção dos pinos, ainda que isto não tenha sido problema na elaboração do modelo geométrico do monitoramento de Loureiro (2013). Embora os PEs apresentem menor precisão, Vince *et al.* (2015) encontraram correspondência, em termos de forma e dimensão de seções entre PE e LST. Por serem medidas pontuais, os PEs revelam taxas de erosão tidas como razoáveis e destinadas a pequenas áreas (BOARDMAN *et al.*, 2015; KRENZ; KUHN, 2018). Por isso, não significa que os PEs devam ser abandonados. Entende-se que seu uso pode ser didático e, inclusive, complementar as novas tecnologias. Basta compreender que a natureza de seus dados é manual e serve para determinados fins, em especial onde não haja recursos financeiros para uso de técnicas mais modernas.

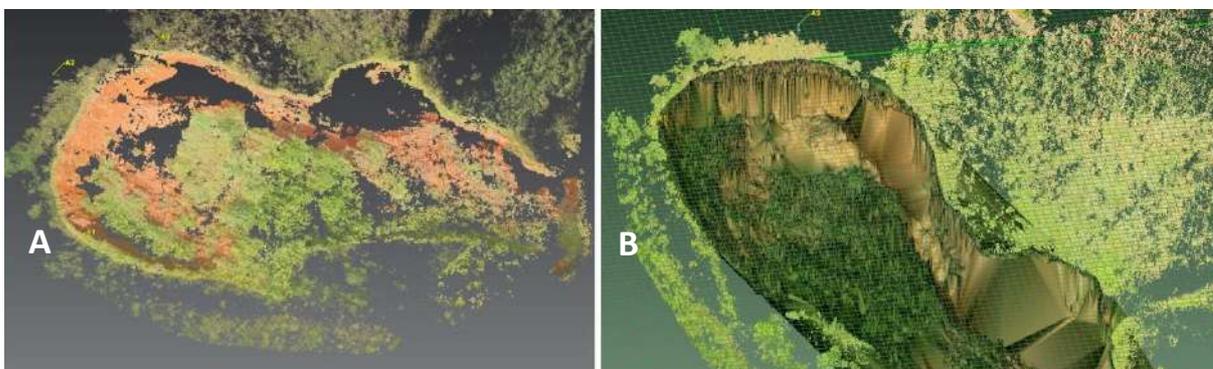
### d) Laser Scanner Terrestre (LST) – Rio Claro/RJ

O uso experimental do LST revelou seu maior potencial, enquanto gerador de dados quantitativos. Com as condições de campo, a grande deficiência do método, foram resultados positivos. As diferentes etapas de processamento da nuvem de pontos geraram diversos

produtos (Figuras 16A e B). Foram calculados 2.240,34 m<sup>2</sup> de área da voçoroca, a partir de suas bordas, com um volume de solo removido de 20,34 m<sup>3</sup>. Para este valor, o modelo tridimensional considerou uma superfície hipotética, derivada da nuvem de pontos, como se fora a superfície original pré-erosão, todo o material depositado no interior da feição e suas reentrâncias.

Dos dados disponibilizados pela modelagem, incluídos aos cálculos de Loureiro (2013), a área da voçoroca equivale a 0,22 ha. A densidade do solo determinada em Loureiro (2019) foi de 1,59 g/cm<sup>3</sup>, que aplicada à fórmula  $D = \frac{m}{V}$  resulta em 32,34 t de massa de solo erodido. Portanto, segundo os cálculos, chega-se a taxas de 147 t·ha<sup>-1</sup> e, considerando 17 anos de atividade da feição (entre 2001 e 2018), 8,65 t·ha<sup>-1</sup>·ano.

Figura 16 - (A) Ortoimagem gerada a partir da nuvem de pontos; (B) TIN gerado a partir da ortofotografia. Os “vazios” em (A) são imprecisões de áreas não escaneadas, que são automaticamente preenchidos em (B).



Fonte: os autores.

Outros trabalhos com LST indicam os bons resultados acima. Etchelar (2017) monitorou por 12 anos voçoroca, no Rio Grande do Sul, que cresceu 9.188,08 m<sup>2</sup>, sendo 765,67 m<sup>2</sup> por ano. Ramos *et al.* (2011) também utilizaram LST em voçoroca no Médio Paraíba do Sul (RJ), chegando a 6.735 m<sup>3</sup> de volume. Já Ercole (2019) e Aquino da Cunha *et al.* (2020) estimaram volumes em uma superfície de referência, porém, com uso de VANT. O primeiro registrou 68.195,5 m<sup>3</sup> e 49.409,7 m<sup>3</sup> para 1,516 ha e 0,708 ha de duas voçorocas. Os segundos chegaram a volumes de 149,99 m<sup>3</sup> e 189,99 m<sup>3</sup> de solo erodido.

## Processos erosivos em trilhas

### a) Erosão dos solos em trilhas geoturísticas no litoral do Parque Nacional da Serra da Bocaina

A trilha estudada apresenta processos erosivos bastante evoluídos, com presença de ravinas, afundamentos no leito e erosão da borda crítica. Diversos pontos de degradação, devido à erosão hídrica, podem ser observados (Figura 17).

Figura 17 - Trechos da trilha com ravinas ocasionadas pela concentração do escoamento superficial (seta em vermelho). (a) Afundamento do leito formando degraus; (b) acúmulo de serapilheira após degrau (círculo amarelo).



Foto: Luana A. Rangel (2016).

Ademais, ficam evidentes estruturas de manejo instaladas a fim de facilitar a visitação, porém, alguns pontos com erosão da borda e estreitamento do leito representam risco para os usuários, bem como, esses trechos mais erodidos podem condicionar o caminho do fluxo de água, agravando ainda mais, os processos erosivos (Figura 18).

Figura 18 - Erosão da borda crítica da trilha (setas em vermelho), indicando processo erosivo avançado e estreitamento do leito da trilha.



Foto: Luana A. Rangel (2016).

Diversos autores, em suas pesquisas (COSTA, 2006; KROEFF; VERDUM, 2011; JORGE, 2016; RANGEL; GUERRA, 2018a; RANGEL *et al.*, 2019b) observaram em seus estudos sobre trilhas, que a perda da borda crítica - área do lado oposto ao talude superior (COSTA, 2006) – pode ser ocasionada pela concentração do fluxo de água; pela presença de materiais friáveis no solo, e ausência de partículas agregadoras, como matéria orgânica e argila; e pelo corte inadequado para a abertura da trilha, isto é, quando a mesma não acompanha as curvas de nível, sendo perpendiculares à encosta.

Ademais, verifica-se que a microtopografia do solo está sofrendo alterações, devido à intensidade do pisoteio e ao regime pluviométrico, que facilita a concentração do fluxo de água convergindo para as ravinas, contribuindo para o surgimento de novos processos erosivos, o que aumenta ainda mais a erodibilidade do solo. Somado a isto, a ausência de vegetação e de matéria orgânica, no leito, expõe o solo aos efeitos de erosividade da chuva, o que acentua o aporte de sedimentos retirados (Figura 19).

Figura 19 - Fluxo superficial de água, sedimentos e serapilheira durante evento chuvoso na trilha.



Foto: Hugo Alves (2017).

## b) Erosão em trilhas em Ubatuba – SP

Fullen e Catt (2004) consideram valores de densidade dos solos elevados, quando acima de  $1,5 \text{ g/cm}^3$  e média de  $1,0$  a  $1,4 \text{ g/cm}^3$ . As médias das cinco trilhas para o talus, variaram de  $1,08 \text{ g/cm}^3$  a  $1,41 \text{ g/cm}^3$  e para o leito da trilha,  $1,19 \text{ g/cm}^3$  a  $1,58 \text{ g/cm}^3$ . Apenas a média do Sítio Lama Mole e Sete Praias ultrapassaram valores acima de  $1,5 \text{ g/cm}^3$ , sendo  $1,58 \text{ g/cm}^3$  e  $1,53 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. Valores inversos à densidade dos solos condizem com os aqueles encontrados para a porosidade (Tabela 3), cujos menores valores, 34.58% e 42.38%, correspondem ao leito da trilha Lama Mole e Sete Praias e maior valor para o talus Água Branca (55.51%). Trabalhos de Figueiredo *et al.* (2010), Maganhotto *et al.* (2010), Saraiva (2011), Rangel (2014), Jorge *et al.* (2016), mostram elevados índices de compactação dos solos no leito da trilha, quando comparados com as bordas, normalmente alterada pela pressão do pisoteio.

No que se refere à textura (Tabela 3), cada trilha tem como características serem franco (Sítio Recanto da Paz), franco-argilo-arenoso (Lama Mole e Sete Praias), franco arenoso (Água Branca) e franco argiloso (Quilombo). A heterogeneidade da textura entre as trilhas evidencia os diferentes graus de permeabilidade a que estão sujeitas. A análise mostra elevados teores de

areia, sendo a fração areia grossa predominante, com exceção da trilha do Quilombo, o que resulta na maior resistência do material de origem ao intemperismo.

Tabela 3 - Média dos pontos de coleta: talude (TA) e leito da trilha (TR).

Trilhas	Densidade dos solos (g/cm <sup>3</sup> )		Porosidade (%)		pH		Matéria Orgânica		Textura (%)								Classificação	
	TA	TR	TA	TR	TA	TR	TA	TR	Areia grossa		Areia fina		Silte		Argila		TA	TR
									TA	TR	TA	TR	TA	TR	TA	TR		
Sítio Recanto da Paz	1,15	1,24	55,31	49,51	4,51	4,73	6,47	6,25	36,92	35,84	12,10	16,19	29,89	27,23	20,94	20,39	Franco	Franco
Lama Mole	1,41	1,58	44,13	34,58	4,38	4,48	2,44	3,27	36,40	44,79	9,17	9,68	22,20	20,97	31,95	24,98	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso
Sete Praias	1,31	1,53	47,42	42,38	4,37	4,30	2,72	2,55	42,48	40,90	15,40	14,80	16,70	20,48	25,42	23,83	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso
Água Branca	1,08	1,19	55,51	49,78	3,71	3,69	7,34	8,55	45,05	50,05	13,39	11,99	26,73	26,87	14,83	11,09	Franco arenoso	Franco arenoso
Quilombo	1,31	1,39	49,73	46,26	4,75	4,74	2,88	2,96	30,01	27,82	8,73	7,85	24,44	20,66	36,82	37,01	Franco argiloso	Franco argiloso

Valores de silte mais elevados do que argila foram encontrados para a trilha Sítio Recanto da Paz (29,89% /27,23%) e Água Branca (26,73%/ 26,87%). Inversamente, maiores valores de argila foram para a trilha Sítio Lama Mole (31,95%/ 24,98%), e Quilombo (36,82%/27,01%). Destaca-se o papel da argila na retenção, ou na infiltração da água e esta, por sua vez irá promover reações químicas no solo. Ambas as trilhas apresentaram trechos bem encharcados e muito compactados (Figuras 20a e 20b), provavelmente este solo, pelo alto teor de argila, está atuando como dreno (NOVAIS; SMITH, 1999).

Lal (1988) ressalta a textura do solo como fator importante que influencia a erodibilidade, por afetar os processos de desagregação e transporte, uma vez que, enquanto grandes partículas de areia resistem ao transporte, solos de textura fina (argilosos) também resistem à desagregação, sendo a areia fina e o silte as texturas mais suscetíveis à desagregação e ao transporte. É possível constatar-se que as trilhas mais vulneráveis aos processos erosivos correspondam à trilha Sítio Recanto da Paz e Água Branca, por apresentarem elevado teor de silte e areia fina. O silte em específico atua principalmente na desagregação do solo e, na reduzida capacidade de retenção de água.

A trilha Água Branca e Sítio Recanto da Paz (Figuras 21a e 21b) possuem menores teores de argila entre as trilhas, o que as tornam mais susceptíveis a erosão, principalmente a trilha Água Branca, pela alta declividade, porém, o que se observa é uma baixa densidade dos solos e elevada porosidade. A elevada presença de matéria orgânica (Tabela 3) é um bom indicador da qualidade desse solo.

Figura 20 - a) Ponto de coleta no leito da trilha do Quilombo, presença de solo bem argiloso e úmido; b) Área próxima ao ponto de coleta no leito da trilha Sítio Lama Mole, com retenção de água. Em ambas, nesse trecho, a trilha é bem escorregadia.



Foto: Maria Jorge (2014).

Com relação ao pH (Tabela 3), os valores foram muito semelhantes entre TA e TR para as cinco trilhas, cujos menores de pH, trilha Água Branca, foi de 3,69 (TR) e 3,71 (TA) e maiores valores para a trilha Quilombo 4,75 (TA) e 4,74 (TR). Volkweiss (1989) classifica solos extremamente ácidos com  $\text{pH} < 5,0$ . De maneira geral, a formação dos solos ácidos é o resultado da combinação de muitos fatores, com grande importância para as condições climáticas, em termos de alta temperatura e quantidade de chuvas, acima de 2 000 mm anuais, como é o caso onde estão situadas as trilhas. Estas condições favorecem a rápida decomposição da rocha, com a lixiviação de bases trocáveis e a consequente intemperização do solo, com elevada acidez (MEURER, 2012).

Sato (2007) encontrou pH variando de 3,5 a 3,7, próximo à superfície, em floresta alta e baixa de restinga em Ubatuba. A autora fez coleta em diversas profundidades do solo (0 cm até 0,6m de profundidade), cujo pH da camada de 0-20 cm foi significativamente inferior ao da camada de 20-40 cm. Pode-se dizer que há um gradual aumento do pH com a profundidade. A intensa lixiviação potencializa a acidez mais elevada na superfície.

Valores elevados de matéria orgânica (Tabela 3) estão presentes na trilha Água Branca (7,34% e 8,55%) e Sítio Recanto da Paz (6,47% e 6,25%), respectivamente (Figuras 21a e 21b). Esses valores correspondem com o que foi observado em campo, como o de apresentar vários trechos com raízes, folhas e serapilheira. Essas duas trilhas têm em comum, o fato de serem pouco frequentadas. Sato (2007), encontrou teores elevados de matéria orgânica em floresta alta de restinga em Ubatuba, em solos de 0-20 cm, indicando elevado teor de matéria orgânica na superfície, não havendo diferença entre as camadas de 20-40 e 40-60 cm de profundidade.

Figura 20 - Presença de serapilheira em a) Trecho do leito da trilha Água Branca b) Sítio Recanto da Paz.



Fotos: Maria Jorge (2014).

Os processos resultantes do intemperismo nos TAs e TRs, corroboram na avaliação da susceptibilidade dos solos à erosão, juntamente com outros fatores controladores, como por exemplo, a relação de matéria orgânica e argila, atuando nas trilhas. Relações são encontradas nas trilhas Água Branca e Sítio Recanto da Paz, com ocorrência de menores teores de argila e maiores concentrações de matéria orgânica. Essas duas trilhas apresentam as menores densidades do solo e maiores porosidades, o que lhes confere menores compactações. As demais trilhas, Quilombo, Sete Praias e Lama Mole, cujos valores de argila foram maiores, os teores de matéria orgânica foram baixos. No leito dessas trilhas, os solos encontram-se bem compactados, com densidade do solo elevada e baixa porosidade. A formação de ravinas em diferentes estágios é o processo mais atuante em determinados trechos dessas trilhas (Figuras 22a e 22b).

Figura 21 – a) Trecho da trilha do Quilombo, com solo matiz amarelada. b) Trecho da trilha Sete Praias apresentando matiz avermelhada. Ambos situados em terreno declivoso e com processo de ravinamento.



Fotos: Maria Jorge (2014).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões desse artigo seguem o mesmo formato dos itens anteriores, ou seja, aqui são destacadas algumas considerações, a respeito de parte do trabalho que o LAGESOLOS vem desenvolvendo, ao longo de 26 anos, nesse caso, com ênfase tanto na erosão rural e urbana, como em trilhas, situadas em áreas de conservação e/ou que tenham apelo turístico.

No caso da trilha localizada no litoral do Parque Nacional da Serra da Bocaina, em Paraty, que permite acesso ao principal atrativo geoturístico local, denominado Piscina Natural do Caixa D'Aço, conclui-se que essa trilha não é planejada e manejada inadequadamente, impactando negativamente na qualidade dos solos.

A maioria das feições erosivas encontradas surgiu a partir da implementação da trilha, já que o traçado da mesma não acompanha as curvas de nível, o que provoca diversos impactos, como a concentração do fluxo de água. Portanto, a utilização da trilha está aumentando essa feição.

Constatou-se a dificuldade de resiliência desses ambientes, pela baixa concentração de matéria orgânica, limitando o crescimento de vegetação espontânea, devido à intensidade e continuidade do pisoteio. Logo, as trilhas, são áreas que necessitam de intervenção para restabelecer a qualidade do solo.

Nos pontos onde foram constatadas a presença de ravinas, pode-se afirmar que o escoamento superficial e subsuperficial é ineficiente, convergindo para o leito da trilha de forma concentrada. Sendo assim, a recuperação das áreas mais degradadas, a instalação de canaletas de drenagem e o nivelamento da trilha se tornam essenciais para a resolução do problema. Logo, com a realização dessas sugestões e dessas análises, as trilhas podem ter seu grau de dificuldade reduzido.

No caso do uso do VANT, ele traz nova forma de entendimento de como os processos atuam e modelam as encostas. No caso específico da voçoroca monitorada, o VANT possibilitou entender a diferenciação da evolução do processo erosivo em seu interior, para a elaboração futura de diagnóstico da área, tendo em vista sua possível recuperação.

Ainda, com base nestes estudos é possível afirmar que o uso de VANTs no mapeamento geomorfológico apresenta muitas vantagens, no sentido de auxiliar a pesquisa, e através dele há obtenção dos dados quantitativos, cujo papel é o de solidificar as teses propostas num determinado estudo. Outra característica positiva dos drones está na facilidade de alcançar pontos de difícil acesso aos pesquisadores.

Foi possível observar o sucesso da tecnologia de veículos aéreos não tripulados no mercado, que atualmente têm conseguido substituir a necessidade de tripulações das aeronaves, e ainda, em curtos períodos, surgem atualizações responsáveis por gerar novas possibilidades de uso destas aeronaves, durante um voo.

Com a utilização do VANT, foi possível diagnosticar de forma rápida e eficiente, resultados da voçoroca e encosta, que seriam difíceis de obter de outra maneira. Desta forma, esse equipamento, em conjunto com técnicas de sensoriamento remoto, e da aerofotogrametria, permitem um novo e completo entendimento da área de interesse. O uso de VANTs na pesquisa geomorfológica apresenta diversos benefícios e, apesar de ser uma inovação, recomenda-se cada vez mais o uso deste equipamento por profissionais e pesquisadores ligados à área ambiental, no presente caso à geomorfologia.

A elaboração dos mapas, do ortomosaico e das imagens processadas permitiram estabelecer relações entre características pedogeomorfológicas, com o processo erosivo estabelecido na área. O VANT é uma ferramenta que vem se mostrando cada vez mais eficiente dentro da pesquisa geomorfológica, seja para a captura de imagens georreferenciadas, sendo possível determinar ângulo, área e quantidade de fotos, ou até mesmo para produzir mapas

temáticos, com alta precisão e resolução. Desta forma, recomenda-se o uso desta ferramenta que apresenta grande potencial de contribuição para os estudos geomorfológicos e ambientais.

No caso da voçoroca urbana do Sacavém, em São Luís, o estudo dos processos erosivos torna-se cada vez mais importante, na medida em que busca a elaboração de projetos de controle e reabilitação, a partir da identificação dos seus mecanismos determinantes, assim como, de que forma a ação antrópica pode interferir nesses processos, seja de maneira positiva, ou negativa, pois suas consequências, no caso dos impactos negativos, envolvem não apenas perdas materiais, mas também humanas.

Devido ao alto estágio erosivo que se encontra a voçoroca do Sacavém, a utilização de geotêxteis biodegradáveis pode ser a melhor solução, de acordo com os resultados alcançados e bibliografia levantada. Visto que a utilização da engenharia tradicional, onde são usados materiais pesados como concreto, ferro e máquinas de grande porte, além de causar maior impacto aos aspectos naturais e estéticos do ambiente, requerem um elevado investimento de capital, bem como não dá margem à participação da comunidade no processo.

No presente caso, os geotêxteis garantiram uma proteção inicial, formando uma barreira contra o efeito *splash*, escoamento superficial e remoção de partículas. Os geotêxteis também impediram a remoção das sementes de braquiária da encosta recuperada, por ocasião das chuvas torrenciais, que caíram logo após o processo de recuperação, servindo como suporte para o seu desenvolvimento sustentável, já que as fibras vegetais utilizadas, são do buriti, que é uma palmeira bastante comum nessa parte do Maranhão.

No que se refere aos monitoramentos na bacia do rio Macaé, e no município de Rio Claro, ambos os métodos permitem a quantificação das taxas de erosão, ainda que representem estimativas mais ou menos precisas. Nesse caso, seja pela capacidade de representação dos PEs, seja pelo caráter experimental da aplicação do LST, que demanda melhorias. Quando se compara, a partir do que cada método se utiliza para quantificar a erosão, entende-se que são dados de naturezas diferentes. Enquanto os PEs são medidas pontuais limitadas, com capacidade de gerar dados por uma representação geométrica, a nuvem de pontos do LST vai além, e cria uma representação da própria morfologia da feição. Ou seja, enquanto os PEs estabelecem medidas através de retas, sem quaisquer angulações (medidas de altura, largura e profundidade), o LST considera em sua representação todas as rugosidades do terreno, devido à densidade da nuvem de pontos, impossível de ser assemelhada à malha de PE. Reafirma-se, que os métodos não são excludentes. Fazem parte do desenvolvimento do conhecimento geomorfológico e têm cada qual sua utilidade.

As análises das propriedades químicas e físicas do solo, como os da trilha Sete Praias e trilha do Quilombo, como baixos teores de matéria orgânica (2,72% TA e 2,55% TR) e (2,88% TA e 2,97% TR), respectivamente, e maiores taxas de densidade dos solos (1,31 g/cm<sup>3</sup> e 1,53 g/cm<sup>3</sup>) e (1,31 g/cm<sup>3</sup> e 1,39 g/cm<sup>3</sup>) corroboram com o que foi observado em campo durante a coleta. Trata-se de trilhas que apresentam trechos com feições erosivas mais desenvolvidas e, portanto, mais degradadas. A compactação do solo, associada à topografia do terreno e a conformação do traçado (geometria) da trilha, tendem a potencializar a ocorrência de processos erosivos do tipo linear e laminar.

O Sítio Lama Mole, apesar de não apresentar feições erosivas, como ravinas profundas, foi o que apresentou o maior valor de densidade dos solos, entre as cinco trilhas (1,41 g/cm<sup>3</sup> e 1,58 g/cm<sup>3</sup>) e baixa matéria orgânica (2,44% e 3,27%); esses índices tem ligação com o uso da trilha, no qual é comum o uso de motocicletas, o que tem influenciado no grau de compactação.

Já as trilhas Recanto da Paz e Água Branca foram as que apresentaram maiores taxas de matéria orgânica (6,47% e 6,25%) e (7,35% e 8,55%) e menores densidade do solo (1,15 g/cm<sup>3</sup> e 1,24 g/cm<sup>3</sup>) e (1,08 e 1,19), que condizem com as observações feitas em campo. São trilhas com muita serrapilheira, vegetação densa no seu entorno e uso menos frequente que as demais

trilhas. Os valores obtidos entre TA e TR corroboram para mostrar que existe uma diferença entre ambos e embora o leito da trilha (TR) esteja mais susceptível a processos erosivos, por apresentarem maior densidade dos solos e compactação, os solos dos taludes (TA), com ausência de cobertura vegetal e baixa concentração de matéria orgânica., quando associados a elevados índices pluviométricos, também estão susceptíveis à erosão.

A partir desses estudos de casos, em paralelo com o arcabouço teórico-conceitual e metodológico aqui apresentado, espera-se ter apontado como a erosão dos solos pode ser abordada, sob diferentes pontos de vista, quando se está diante de um problema que acontece em diversas encostas brasileiras, sob diferentes tipos de solos, condições climáticas, uso e manejo da terra. As referências bibliográficas, apresentadas nesse artigo, podem ser utilizadas pelos leitores, para aprofundarem na temática aqui abordada.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPERJ, CNPq e CAPES/EMBRAPA, pelas bolsas concedidas, bem como pelo auxílio financeiro, sem o qual não teria sido possível a realização desse artigo.

## REFERÊNCIAS

ANTONELI, V.; REBINSKI, E. A.; BEDNARZ, J. A. COMINO, J. R.; KEESSTRA, S. D.; CERDA, A.; FERNANDEZ, M. P. Soil Erosion Induced by the Introduction of New Pasture Species in a Faxinal Farm of Southern Brazil. **Geosciences**, [s.l.], v. 8, n. 5, p. 166-177, maio 2018.

AQUINO DA CUNHA, A.; ALIXANDRINI JÚNIOR, M. J.; FERNANDES, V. de O. Avaliação de erosão por imagens de Aeronave Remotamente Pilotada a baixa altura de voo. **Geografia (Londrina)**, v. 29. n. 1, p. 191-210, 2020. DOI: 10.5433/2447-1747.2020v29n1p191.

ARAÚJO, G. H. de S.; ALMEIDA, J. R. de; GUERRA, A. J. T. **Gestão Ambiental de Áreas Degradadas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 332p., 2013.

BARRY, P.; COAKLEY, R. Field Accuracy Test of RPAS PHotogrammetry. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Rostock: Baseline Surveys Ltd, p. 27 – 31, 2013.

ASHMAN, M. R.; PURI, G. **Essential Soil Science – A Clear and Concise Introduction to Soil Science**. Blackwell Publishers, Oxford, Inglaterra, 198p., 2002.

BARET, S.; STRASBERG, D. The effects of opening trails on exotic plant invasion in protected areas on La Réunion Island (Mascarene Archipelago, Indian Ocean). **Revue d Ecologie - La Terre et La Vie**, Vol. 60, p. 325-332, 2005.

BARROS, A.; GONNET, J.; PICKERING, C. Impacts of informal trails on vegetation and soils in the highest protected area in the Southern Hemisphere. **Journal of Environmental Management**, Vol. 127, p. 50-60, 2013.

BEZERRA, J. F. R. **Avaliação de geotêxteis no controle da erosão superficial a partir de uma estação experimental, Fazenda do Glória – MG**. Dissertação de Mestrado.

Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Geociências, Programa em Pós-Graduação em Geografia, 104p., 2006.

BEZERRA, J. F. R. **Geomorfologia e Reabilitação de Áreas Degradadas por Erosão com Técnicas de Bioengenharia de Solos na Bacia do Rio Bacanga, São Luís – MA.** Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em Geografia, 249p., 2011.

BEZERRA, J. F. R.; GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A. Caracterização geomorfológica da bacia do rio Bacanga, Ilha do Maranhão. **Revista Geonorte**, v. 10, p. 64-69, 2014.

BEZERRA, J. F. R.; Guerra, A. J. T. ; FULLEN, M. A. Granulometria por difração à laser dos sedimentos superficiais nas áreas degradadas por voçorocamento na bacia do rio Bacanga. *In*: CASTRO, Cláudio Eduardo de; MASULLO, Yata Anderson Gonzaga. (Org.). **Gestão ambiental: uma diversificada ferramenta na consolidação de paradigma ecológico inovador.** 1ed.São Luís: EDUEMA, v. 1, p. 5-22, 2016.

BEZERRA, J. F. R.; GUERRA, A. J. T. RODRIGUES, S. C. Análise dos índices pluviométricos aplicada à geração do escoamento superficial em estações experimentais com geotêxteis, Uberlândia, MG. *In*: RIBEIRO, Iris Maria Porto. (Org.). **Geografias em questão.** 1ed.São Luís: EDUEMA, v. 1, p. 90-104, 2016.

BEZERRA, J. F. R.; FULLEN, M. A.; GUERRA, A. J. T. E. Análise do índice de cobertura vegetal em parcelas experimentais com geotêxteis, município de São Luís, Maranhão. *In*: **XVI Simpósio Brasileiro de Geografia Física e Aplicada**, 2015, Teresina. Anais do XVI SBGFA, 2015.

BOARDMAN, J. A 38-year record of muddy flooding at Breaky Bottom: learning from a detailed case study. **Catena**, 189, 12p., 2020. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104493.

BOARDMAN, J.; FAVIS-MORTLOCK, D.; FOSTER, I. A 13-year record of erosion on badland sites in the Karoo, South Africa. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 40, p.1964–1981, 2015. DOI: 10.1002/esp.3775.

BONILLA, E. A. F. Terrestrial Laser Scanning study of gully erosion at West Bijou Creek, Arapahoe Conty, Colorado: an investigation on field acquisition and data processing. **Conference...** AGU Fall Meeting, Puerto Rico: UNAVCO. 2008. 23 p.

BRIGHT, J. A. Hiker impact on herbaceous vegetation along trails in an evergreen woodland of Central Texas. **Biological Conservation**, Vol. 36, p. 53-69, 1986.

BRILHA, J. Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: a Review. **Geoheritage**, v.8, p. 119–134, 2016.

BERTOLANI, F. C.; PAZ GONZÁLEZ, A.; LADO LIÑARES, M.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; MIRANDA, J. G. V. Variabilidade espacial da rugosidade superficial do solo medida com rugosímetros de agulhas e laser. **Bragantia**, v.59, n.2, p. 227-234, 2000.

CÁRCELES-RODRÍGUEZ, B.; GÁLVEZ-RUIZ, B.; FRANCIA-MARTÍNEZ, J. R.; TAVIRA, S. C.; PLEGUEZUELO, C. R. R.; DURÁN-ZUAZO, V. H. Vegetation Cover and Furrow Erosion due to Extreme Rain Events in Semiarid Environments. **Ciencias Ambientales**, v. 51, n. 1, p. 51-61, 2017.

CASTILLO, C.; GÓMEZ, J. A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. **Earth-Science Reviews**, v. 160, p. 300–319, 2016. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.07.009.

CASTRO, W. de S.; CAMPOS, A. B. de; ZANCOPE, M. H. de C. A influência dos materiais das margens e da vegetação ciliar na erosão de meandros: o caso do rio Claro, afluente do rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia (Online)**, São Paulo, v. 20, n. 3, p. 623-640, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i3.1584.

CASTRO, L. G.; COGO, N. P.; VOLK, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.2, p.339-352, 2006.

COLE, D. N.; LANDRES, P. B. Threats to wilderness ecosystems: impacts and research needs. **Ecological Applications**, Vol. 6, p.168–184, 1996.

COLE, D. N.; SCHREINER, G. S. **Impacts backcountry recreation: site management and rehabilitation – an annotated bibliography**. General Technical Report INT-121. U. S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, p. 58, 1981.

CONTI, B. R.; IRVING, M. A. Desafios para o ecoturismo no Parque Nacional da Serra da Bocaina: o caso da Vila de Trindade (Paraty, RJ). **Revista Brasileira de Ecoturismo**, São Paulo, v.7, n.3, p. 517-538, 2014.

COSTA, N. M. C. da. Ecoturismo: abordagens e perspectivas geográficas. *In*: COSTA, N. M. C. da; NEIMAN, Z.; COSTA, V. C. da. (Org.). **Pelas trilhas do ecoturismo**. Parte I. São Paulo: Ed. Rima, 2008. p. 17-30.

COSTA, V. C. da. **Propostas de Manejo e Planejamento Ambiental de Trilhas Ecoturísticas: Um Estudo no Maciço da Pedra Branca – Município do Rio de Janeiro (RJ)**. 2006. 325f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CRUZ, O. **A Serra do Mar e o litoral na Área de Caraguatatuba-SP: Contribuição a Geomorfologia Litorânea Tropical**. São Paulo, p. 167. Tese (Doutorado), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1974.

CUNHA, S. B. Geomorfologia Fluvial. *In*: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Org.) **Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações**. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro: p. 157-189, 1996.

DARBOUX, F.; HUANG, C. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers? **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n.3, p.748-756, 2005.

DEVIDE, A. C. P. **História Ambiental do Vale do Paraíba**. 2013. 183 f. Tese (Doutorado) - Curso de Fitotecnia, UFRRJ, Seropédica, 2013.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. de; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (Orgs.). **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

EAGLESTON, H.; MARION, J. L. Application of airborne LiDAR and GIS is modeling trail erosion along the Appalachian Trail in New Hampshire, USA. **Landscape and Urban Planning**, 198, p. 1-9, 2020. DOI: 1016/j.landurbplan.2020.103765.

EISENLOHR, P. V.; MELO, M. M. R. F.; SILVA, M. R.; SCHMAL, P.; FERREIRA-JUNIOR, W. G.; DIAS, A. S.; SILVA, A. F. Floristic variations in a woody plant community along a trail in a Semideciduous Seasonal Forest, Viçosa, Minas Gerais State, Brazil. **Hoehnea**, Vol. 38, p. 61-71, 2011.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 230, 2011.

EMBRAPA ACRE. **Planos de Voo Semiautônomos para Fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas de Classe 3**. Acre, 56p., 2018.

ERCOLE, R. F. **Estudo dos processos erosivos em uma área de diretrizes especiais de Nova Lima, Minas Gerais com uso de Veículo Aéreo Não Tripulado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte. 2019. 127p.

ETCHELAR, C. B. **Processos Erosivos em Áreas Úmidas, APA do Banhado Grande – RS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2017. 107p.

ETCHELAR, C. B.; GUASSELLI, L. A. Erosão no banhado grande. **Áreas úmidas: questões ambientais**. Porto Alegre: UFRGS/Programa de Pós Graduação em Geografia, 2018. p. 235-264, 2018.

EVANS, R. On assessing accelerated erosion of arable land by water. **Soils and Fertilizers**, 56: 1285-1293, 1993.

FAVIS-MORTLOCK, D.T.; GUERRA, A. J. T. The implications of general circulation model estimates of rainfall for future erosion: a case study from Brazil. **Catena**, 37, p. 329-354, 1999.

FEOLA, E.; NUCCI, J. C.; SANTOS, L. J. C. Avaliação de impactos do uso público em uma trilha no Parque Estadual do Pico do Marumbi – PR. **Geografia, Rio Claro**, Vol. 33, No. 1, p. 157-175, 2008.

FIGUEIREDO, M. do A.; ASSIS BRITO, I.; TAKEUCHI, R. C.; ALMEIDA-ANDRADE, M.; VIEIRA ROCHA, C. T. Compactação do solo como indicador pedogeomorfológico para

erosão em trilhas de unidades de conservação: estudo de caso no Parque Nacional da Serra do Cipó, MG. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE – DCG/NAPA, Vol. especial VIII SINAGEO, No. 3, p. 236-247, 2010.

FIGUEIREDO, M. A.; FONSECA FILHO, R. E.; VARAJÃO, A. F. D. C. Qualidade do Solo como Geoindicador para o Manejo de uma Trilha no Parque Nacional da Serra do Cipó, MG, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, Vol. 35, No.1, p. 199-208, 2012.

FEITOSA, A. C. **Dinâmica dos Processos geomorfológicos da área costeira a nordeste da ilha do Maranhão**. Tese de Doutorado. Rio Claro: IGCE - Cp – UNESP. 249p.,1996.

FEITOSA, A. C. **Evolução geomorfológica do litoral norte da Ilha do Maranhão**. Dissertação de Mestrado. Rio claro: IGCE – UNESP, 210p., 1989.

FERREIRA, A. J. de A. **A estrutura espacial urbana maranhense**. Monografia de graduação. São Luís. 68 p., 1989.

FIGUEIREDO, M. A.; ASSIS BRITO, I.; TAKEUCHI, R. C.; ALMEIDA-ANDRADE, M.; VIEIRA ROCHA, C. T. Compactação do solo como indicador pedogeomorfológico para erosão em trilhas de unidades de conservação: estudo de caso no Parque Nacional da Serra do Cipó, MG. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE – DCG/NAPA, Vol. especial VIII SINAGEO, No. 3, p.236-247, 2010.

FIGUEIREDO, M. A.; FONSECA FILHO, R. E.; VARAJÃO, A. F. D. C. Qualidade do Solo como Geoindicador para o Manejo de uma Trilha no Parque Nacional da Serra do Cipó, MG, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, Vol. 35, No.1, p.199-208, 2012.

FULLEN, M. A.; CATT, J. A. **Soil Management: problems and solutions**. London: Arnold, 2004.

GARCÍA-RUIZ, J. M.; BEGUERÍA, S.; NADAL-ROMERO, E.; GONZÁLEZ-HIDALGO, J.C.; LANA-RENAULT, N.; SANJUÁN, Y. A meta-analysis of soil erosion rates across the world. **Geomorphology**, v.239, p. 160–173, 2015. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.03.008.

GARRITANO, F. N. **Diagnóstico de erosão por voçorocas na bacia do Alto Rio Pirai, município de Rio Claro – RJ**. 2018. 48p. (Monografia) - Curso de Geografia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

GARRITANO, F. N.; GUERRA, A. J. T. Uso de Veículo aéreo não tripulado na caracterização de uma voçoroca localizada em Rio Claro – RJ – **Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Editora: UFC, Ceará, 2019.

GARRITANO, F. N. Diagnóstico da degradação do solo na bacia do alto rio Pirai (RJ) – Monitoramento com uso de Vant em áreas com erosão em diferentes estágios de intervenção. **Dissertação de Mestrado em Geografia**, 97 p. Programa de pós-graduação em geografia (PPGG) UFRJ, Rio de Janeiro, 2020.

GERRARD, J. **Soil Geomorphology – An Integration of Pedology and Geomorphology**. Chapman and Hall, Londres, Inglaterra, 269p., 1992.

GOODWIN, N. R.; ARMSTON, J.; STILLER, I.; MUIR, J. Assessing the repeatability of terrestrial laser scanning for monitoring gully topography: A case study from Aratula, Queensland, Australia. **Geomorphology**, v. 262, p. 24–36, 2016. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.03.007.

GOUDIE, A.; VILES, H. **The Earth transformed: an introduction to human impacts on the environment**. Blackwell Publishers Ltd. Oxford, Inglaterra, 276p., 1997.

GOUDIE, A. S.; BOARDMAN, J. Soil erosion. *In*: ALCÁNTARA-AYALA, I; GOUDIE, A. (Eds). **Geomorphological hazards and disaster prevention**. Cambridge University Press, Cambridge, p. 177–188, 2010.

GRAEFE, A. R.; KUSS, F. R.; VASKE, J. J. **Visitor Impact management - the planning framework**. Washington D. C. National Parks and Conservation Association, 1990.

GUERRA, A. J. T. O Início do Processo Erosivo. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e Conservação dos Solos - Conceitos, Temas e Aplicações**. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 1999.

GUERRA, A. J. T. O papel da matéria orgânica e dos agregados na erodibilidade dos solos. *In*: **Anuário do instituto de geociências**, 13, p. 43-52, 1990.

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. *In*: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Org.). **Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações**. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1996.

GUERRA, A. J. T. Encostas e a questão ambiental. *In*: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Org.). **A questão ambiental: diferentes abordagens**. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2003.

GUERRA, A. J. T. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. *In*: **Revista do Departamento de Geografia**, 16, p. 32-37, 2005.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.) **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 17-55, 2010.

GUERRA, A. J. T. **Erosão dos Solos e Movimentos de Massa: Abordagens Geográficas**. Rio de Janeiro: CRV, 219 p., 2016.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. dos S. **Geomorfologia Ambiental**. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2006.

GUERRA, A. J. T.; BEZERRA, J. F. R.; JORGE, M. C. O.; FULLEN, M. A. The geomorphology of Angra dos Reis and Paraty municipalities, Southern Rio de Janeiro State. **Revista Geonorte**, v.9, n.1, p. 1-21, 2013.

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. C. O.; ALEXANDRE, S. T. Soil erosion and conservation in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ**. v.37, p. 81–91, 2014.

GUERRA, A. J. T.; BEZERRA, J. F. R.; FULLEN, M. A.; MENDONÇA, J. K. S.; JORGE, M. C. O. The effects of biological geotextiles on gully stabilization in São Luís, Brazil. **Natural Hazards**, v. 75, p. 2625-2636, 2015.

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. C. O.; BEZERRA, J. F. R.; SHOKR, M. S. Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. **Pedosphere**, v.27, n.1, p. 27–41, 2017.

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; BEZERRA, J. F. R.; JORGE, M. C. O. Gully Erosion and Land Degradation in Brazil: A Case Study from São Luís Municipality, Maranhão State. In: DAGAR, J. C.; SINGH, A. K. (Org.). **Ravine Lands: Greening for Livelihood and Environmental Security**. 1ed.Cingapura: Springer Singapore, v. 1, p. 195-216, 2018.

HAIGH, M. J. Evolution of slopes on artificial landforms. Blaenavon, U. K.: **Research Paper – University of Chicago**, Department of Geography; no. 183, 293p., 1978.

HASUI, Y.; HARALYI, N. L. E.; COSTA, J. B. S. Megaestruturação pré-cambriana do território brasileiro baseada em dados geofísicos e geológicos. **Geociências**, Vol. 12, p. 7-31, 1993.

HAWKINS, J.; WEINTRAUB, M. N. The Effect of Trails on Soil in the Oak Openings of Northwest Ohio. **Natural Areas Journal**, Vol. 31 (4), p. 391-399, 2011.

HANCOCK, G. R.; LOWRY, J. B. C. Hillslope erosion measurement – a simple approach to a complex process. **Hydrological Processes**, v. 29, p. 4809-4816, 2015. DOI: 10.1002/hyp.10608.

IBGE. Cidades e Estados. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/ubatuba.html>. Acesso em: 22 abr. 2020.

ICMBIO. **Plano de Manejo do Parque Nacional da Serra da Bocaina**. 2002. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/parnaserradabocaina/extras/62-plano-de-manejo-e-monitorias.html>. Acesso: 10 mar. 2015.

INEA. INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. **Plano de Manejo do Parque Estadual Cunhambebe**. Publicação INEA, 2015. Disponível em: [http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter\\_dibap/documents/document/zeww/mte0/~edisp/inea0114643.pdf](http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter_dibap/documents/document/zeww/mte0/~edisp/inea0114643.pdf). Acesso em: 30 jan. 2018.

IRELAND, H. A.; SHARPE, C. F. S.; EARGLE, D. H. Principles of gully erosion in the Piedmont of South Carolina. U. S. **Department of Agriculture Technical Bulletin**, 633, p. 142, 1939.

JORGE, M. C. O. **Potencial geoturístico e estratégias de geoconservação em trilhas situadas na região sul do município de Ubatuba–SP**. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Geografia, UFRJ, 229p., 2017.

JORGE, M. C. O.; MENDES, I. A.; SATO, S. E. Caracterização Pluviométrica do Município de Ubatuba: Período de 1978 a 1999. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEORAFIA FÍSICA APLICADA, Rio de Janeiro. **Anais do X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, 2003.

JORGE, M. C. O.; GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A. Geotourism, Geodiversity and Geoconservation in Ubatuba Municipality, São Paulo State, Brazil. **Geography Review**, Vol. 29, p. 23-29, 2016.

JORGE, M. C. O.; GUERRA; A. J. T. Geodiversidade, Geoturismo e Geoconservação: Conceitos, Teorias e Métodos. **Revista Espaço Aberto**. v. 6, n.1, p. 151-174, 2016.

KRENZ, J.; GREENWOOD, P.; KUHN, N. J. Soil degradation mapping in drylands using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) data. **Soil Systems**, v. 3, n. 33, 2019. 20p. DOI: 10.3390/soilsystems3020033.

KRENZ, J.; KUHN, N. J. Assessing badland sediment sources using Unmanned Aerial Vehicles. In NADAL-ROMERO, E.; MARTÍNEZ-MURILLO, J. F.; KUHN, N. J. (Org.) **Badland dynamics in the context of Global Change**. Elsevier, Amsterdam, Oxford, and Cambridge: p. 255-276, 2018.

KROEFF, L. L.; VERDUM, R. Identificação de áreas potenciais ao mapeamento de trilhas ecoturísticas na propriedade do Ecoparque, em Canela/RS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.12, n.3, p. 131-136, 2011.

KUTIEL, P.; ZHEVELEV, H.; HARRISON, R. The effect of recreational impacts on soil and vegetation of stabilized coastal dunes in Sharon Park, Israel. **Ocean and Coastal Management**, Vol.42, p. 1041-1060, 1999.

LAL, R. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. *et al.* (Ed.). Soil erosion research methods. **Washington: Soil and Water Conservation Society**, p. 141-160, 1988.

LAWLER, D. M. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 18, p. 777-821, 1993. DOI: 10.1002/esp.3290180905.

LAWLER, D. M. Advances in the continuous monitoring of erosion and deposition dynamics: Developments and applications of new PEEP-3T system. **Geomorphology**, v. 93, p. 17-39, 2008. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.12.016.

LEUNG, Y.; MARION, J. L. Trail degradation as influenced by environmental factors: A state-of-knowledge review. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, n 2, p. 130-136, 1996.

LYNN, N. A., BROWN, R. D. Effects of recreational use impacts on hiking experiences in natural areas. **Landscape and Urban Planning**, Vol. 64, p. 77-87, 2003.

LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 6. ed. São Paulo: Ícone, 2008.

LOUREIRO, H. A. S. **Monitoramento e diagnóstico de áreas degradadas na bacia hidrográfica do rio São Pedro (RJ):** estudos experimentais em voçoroca e utilização de geotêxteis de fibra de bananeira. Dissertação (Mestrado em Geografia – Planejamento e Gestão Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2013. 216p.

LOUREIRO, H. A. S. **Diagnóstico de erosão por voçorocas: experimentos com geotecnologias e solos na bacia do Alto rio Pirai – Rio Claro-RJ.** Tese (Doutorado em Geografia – Planejamento e Gestão Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2019. 224p.

LOUREIRO, H. A. S.; NEVES, S. R. A.; BRIZZI, R. R.; MENDES, S. P.; GUERRA, A. J. T. Soil Erodibility and Monitoring at a Gully in São Pedro River's Drainage Basin, Macaé Municipality/Rio de Janeiro State – Brazil. UGI Regional Geographic Conference. **Conference Proceedings...** Santiago – Chile: UGI, 2011.

MAGRO, T. C. **Impactos do Uso Público em uma Trilha no Planalto Nacional do Itatiaia.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

MAGANHOTO, R. F.; SANTOS, L. J. C.; SOUZA, L. C. P.; MIARA, M. A. Variação dos atributos físicos do solo devido ao trânsito de pessoas em trilha localizada na Região de Paranaguá – PR. **Revista Geografia**, Curitiba, Vol. 5, No. 2, p. 94-114, 2010.

MARION, J. L.; COLE, D. N. Spatial and temporal variation in soil and vegetation impacts on campsites. **Ecological Applications**, Vol. 6, No. 2, p. 520-530, 1996.

MARANHÃO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Diagnóstico ambiental da microrregião da aglomeração urbana de São Luís e dos Municípios de Alcântara, Bacabeira e Rosário.** São Luís, 1998.

MEURER, E. J. **Fundamentos da química do solo**, 3. Ed., Porto Alegre. Editora Evangraf, p. 275, 2012.

MONSIEURS, E.; DESSIE, M.; ADGO, E.; POESEN, J.; DECKERS, J.; VERHOEST, N.; NYSSSEN, J. Seasonal surface drainage of sloping farmland: a review of its hydrogeomorphic impacts. **Land Degradation and Development**, 26: 35-44, 2015.

MONTEIRO, C. A. de F. **A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo.** São Paulo: USP/IGEOG, 1973.

MORGAN, R.P.C. A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan–Morgan–Finney model. *In: Catena*, 44, p. 305–322. 2001.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation.** Ed. Longman, England, 1995.

MORGAN, R. P. C. **Soil conservation: problems and prospects.** Ed. John Wiley & Son. New York. 1981.

- MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. England: Blackwell, 2005.
- NASCIMENTO, M. A. L.; MANSUR, K. L.; MOREIRA, J. C. Bases conceituais para entender geodiversidade, patrimônio geológico, geoconservação e geoturismo. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Teresina, 2015.
- MUSHI, C. A.; NDOMBA, P. M.; TRIGG, M. A.; TSHIMANGA, R. M.; MTALO, F. Assessment of basin-scale soil erosion within the Congo River Basin: a review. **Catena**, 178, p. 64-76, 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2019.02.030.
- NADAL-ROMERO, E.; GARCÍA-RUIZ, J. M. Rethinking spatial and temporal variability of erosion in badlands. In NADAL-ROMERO, E.; MARTÍNEZ-MURILLO, J. F.; KUHN, N. J. (org.) **Badland dynamics in the context of Global Change**. Elsevier, Amsterdam, Oxford and Cambridge: p. 217-254, 2018.
- NEPAL, S. K.; AMOR-NEPAL, S. A. Visitor Impacts on Trails in the Agarmatha (Mt. Everest) National Park, Nepal. Royal Swedish Academy of Sciences, **Ambio** Vol. 33, No. 6, p. 334-340, 2004.
- NEPAL, S. K. Trail impacts in Sagarmatha National Park. **Environmental Management**, Vol. 32, p. 312-321, 2003.
- NEVES, S. R. A. **Diagnóstico de degradação dos solos por erosão no médio curso da sub-bacia do rio São Pedro – Macaé (RJ)**. Monografia (Bacharel em Geografia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011. 71p.
- NOVAIS, R. F., SMITH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- OLIVEIRA, M. A. T. Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de Erosão por Voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e Conservação dos Solos – Conceitos, Temas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 57-99, 2005.
- OLTMANN, S. O.; MARZOLFF, I.; PETER, D. K.; RIES, J. B. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. **Remote Sensing**, [s.l.], v. 4, n. 11, p. 3390-3416, 7 nov. 2012. MDPI AG.
- PEREIRA, L. S.; RODRIGUES, A. M.; JORGE, M. C. O.; GUERRA A. J. T., FULLEN, M. A. Processos hidroerosivos em solos degradados em relevo de baixa declividade. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.17, n.2, p. 299-316, 2016.
- PICKERING, C. M.; HILL, W.; NEWSOME, D.; LEUNG, Y. F. Comparing hiking, mountain biking and horse-riding impacts on vegetation and soils in Australia and the United States of America. **Journal of Environmental Management**, Vol. 91, p. 551-562, 2010.
- PINTO, C. T.; OLIVEIRA, P. V. C.; PONZONI, F. J.; CASTRO, R. M. Identificação de áreas susceptíveis a processos erosivos na região do Vale do Paraíba. In: **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto SBSR**, João Pessoa, 2015.

PLENNER, S.; EICHINGER, W. E.; BETTIS, E. A. Simple Terrestrial Laser Scanner for Measuring Streambank Retreat. Technical Note. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 142, 6p., 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001184.

POESEN, J. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, p. 64–84, 2018. DOI: 10.1002/esp.4250.

POESEN, J.; VANWALLEGHEM, T.; DE VENDE, J.; KNAPEN, A.; VERSTRAETEN, G.; MARTINEZ-CASASNOVAS, J. A. Gully erosion in Europe. In: BOARDMAN, J.; POESEN, J. (ed.). **Soil Erosion in Europe**. John Wiley & Sons, Chichester, p. 515-536, 2006.

PONÇANO, W. L. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1 mapa. p. 94, 1981.

RAMOS, I. Q.; FRANCELINO, M. R.; MAGALHÃES, S. F. C. de; OLIVEIRA, C. M. M. de; SALAMENE, S. Uso do laser scanner na modelagem de voçorocas do estado do Rio de Janeiro. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. **Anais...** Curitiba: INPE. 2011. p. 5793-5800.

RANGEL L. A.; GUERRA, A. J. T. Degradação de trilhas na Reserva Ecológica da Juatinga em Paraty – Rio de Janeiro. **Revista Ambiente & Água**, Vol. 9, p. 752-766, 2014.

RANGEL, L. A.; BOTELHO, R. G. M. Análise ambiental da trilha Sahy-Rubião no Parque Estadual Cunhambebe em Mangaratiba (RJ) por meio de um Protocolo de Avaliação Rápida. **Revista GeoUERJ**, v.30, p. 391 - 418, 2017.

RANGEL, L. A.; GUERRA, A. J. T. Caracterização de atributos do solo de trilhas ecoturísticas em Unidades de Conservação do município de Paraty, estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v.19, n.1, p. 17 – 31, 2018a.

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**. v.19, n.2, p. 391-405, 2018b.

RANGEL, L. A.; JORGE, M. C. O.; GUERRA, A. J. T. ; FULLEN, M. A. Geotourism and Soil Quality on Trails Within Conservation Units in South-East Brazil. **Geoheritage**, v. 11, p. 1-15, 2019a.

RANGEL, L. A.; JORGE, M. C. O.; 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 System**. v.3, n.56, p. 1-14, 2019b.

REGO, J.; RUFINO, L.; FERREIRA, M. E.; VIEIRA, P. A. Análise Morfométrica do Perímetro Urbano de Goiás/Rio Vermelho com Dados obtidos por VANT's. **Anais do SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR**. João Pessoa: Inpe, p. 2309 – 2316, 2015.

RICHTER, D. D.; EPPES, M. -C.; AUSTIN, J. C.; BACON A. R.; BILLINGS, S. A.; BRECHEISEN, Z.; FERGUSON, T. A.; MARKEWITZ, D.; PACHON, J.; SCHROEDER, P.; WADE, A. M. Soil production and the soil geomorphology legacy of Grove Karl Gilbert. **Soil Science Society of America Journal**, p. 1-20, 2020. DOI: 10.1002/saj2.20030.

RODOLFO, M., TEMPONI, L. G., CANDIDO, J. R. Levantamento de plantas exóticas na trilha do Poço Preto, Parque Nacional do Iguaçu, Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, Vol. 6, supl. 1, p. 22-24, 2008.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: Ambiente e Planejamento**. São Paulo: Contexto, 89 p., 2014.

SELBY, M. J. **Hillslope Materials and Processes**. Oxford University Press, Oxford, Inglaterra, 2a edição, 451p., 1993.

SMALL, R.J. e CLARK, M.J. Slopes and Weathering. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra, 112p., 1982.

SALGADO, J. G. Mapeamento de voçoroca utilizando geotecnologia de levantamento por drone: **II SIMPÓSIO MINEIRO DE GEOGRAFIA**, 2., Juiz de Fora, 2016.

SÃO PAULO. **Plano de Manejo do Parque Estadual da Serra do Mar**. S. P.: IF, 2006.

SARAIVA, A. C. R. Impactos aos atributos físicos do solo em trilhas ocasionados pelo ecoturismo em Ubatuba- SP. **Revista Univap, São José dos Campos-SP**, Vol. 17, No. 29, p.32-40, 2011.

SATO, C. A. **Caracterização da fertilidade do solo e da composição mineral de espécies arbóreas de restinga do litoral paulista**. Dissertação (Mestrado) Rio Claro, Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", p. 94, 2007.

SILES, M. F. R. **Efeitos do pisoteio humano experimental sobre a vegetação em fragmentos de Floresta Pluvial Tropical Atlântica, São Paulo, Brasil**. Tese (Doutorado em Ecologia: Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41134/tde-12042009-214021>. Accessed 05 mar. 2016, 2009.

SILVA NETO, J. C. A. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. **GEOGRAFIA**, Londrina v. 22, n.1, p. 05-25, jan/abr. 2013.

TABARELLI, M.; PERES, M. C. A.; MELO, F. P. L. The "few winners and many losers" paradigm revisited: emerging prospects for tropical forest diversity. **Biological Conservation**, Vol. 155, p. 136-140, 2012.

TAKAHASHI, L. Y. **Caracterização dos visitantes, suas preferências e percepções e avaliação dos impactos da visitação pública em duas unidades de conservação do Estado do Paraná**. 129f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

TSCHIEDEL, A. D. F.; MONTE, B. E. O.; MEDEIROS, M. S.; MIERES, L. D. S.; FAN, F. M. Construção de um modelo digital de superfície de uma voçoroca a partir do uso de drone. **Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (13.: 2018 set.: Vitória)**. Trabalhos. Porto Alegre: ABRHidro, 2018.

TORN, A.; TOLVANEN, A.; NOROKORPI, Y.; TERVO, R.; SIIKAMAKI, P. Comparing the impacts of hiking, skiing and horse riding on trail and vegetation in different types of forest. **Journal of Environmental Management**, Vol. 90, p. 1427-1434, 2009.

VIDAL VÁZQUEZ, E.; VIVAS MIRANDA, J. G.; PAZ-FERREIRO, J. A multifractal approach to characterize cumulative rainfall and tillage effects on soil surface micro-topography and to predict depression storage. **Biogeosciences**, v.7, n.10, p. 2989-3004, 2010.

VINCI, A.; BRIGANTE, R.; TODISCO, F.; MANNOCCHI, F.; RADICIONI, F. Measuring rill erosion by laser scanning. **Catena**, v. 124, p. 97–108, 2015. DOI: 10.1016/j.catena.2014.09.003.

VOLK, L. B. S.; COGO, N. P. Relações entre tamanho de sedimentos erodidos, velocidade da enxurrada, rugosidade superficial criada pelo preparo e tamanho de agregados em solo submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.5, p. 671-679, 2009.

WILSON, J. P.; SENEY, J. P. Erosional impact of hikers, horses, motorcycles, and off-road bicycles on mountain trails in Montana. **Mountain Research and Development** 14: p. 77-88, 1994.

WOLMAN, M. G. Factors influencing erosion of a cohesive river bank. **American Journal of Science**, v. 257, p. 204-216, 1959. DOI: 10.2475/ajs.257.3.204.