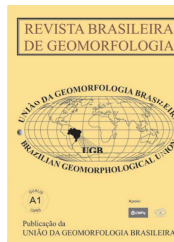


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 21, nº 4 (2020)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1880>



CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE VOÇOROCAS A PARTIR DO USO EXPERIMENTAL DE LASER SCANNER TERRESTRE E VANT

CONTRIBUTION TO GULLY RESEARCH FROM EXPERIMENTAL USE OF TERRESTRIAL LASER SCANNER AND UAV

Hugo Alves Soares Loureiro

*Pesquisador Associado, LAGESOLOS (Laboratório de Geomorfologia Ambiental e Degradação dos Solos)
Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Bloco I, Sala i009, Rio de Janeiro, CEP 21940-590, Brasil
E-mail: hugogeogr@gmail.com*

Antonio José Teixeira Guerra

*Professor Titular, LAGESOLOS (Laboratório de Geomorfologia Ambiental e Degradação dos Solos)
Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Bloco I, Sala i009, Rio de Janeiro, CEP 21940-590, Brasil
E-mail: antoniotguerra@gmail.com*

Aluísio Granato de Andrade

*Pesquisador Embrapa Solos
Rua Jardim Botânico, nº 1024, Jardim Botânico, Rio de Janeiro, CEP 22460-000, Brasil
E-mail: aluisio@cnpq.embrapa.br*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
29/04/2020
Aceito (Accepted):
18/07/2020

Palavras-chave:

Monitoramento de voçorocas;
Laser Scanner Terrestre (LST);
Veículo Aéreo Não Tripulado
(VANT).

Keywords:

Gully monitoring; Terrestrial
Laser Scanner (TLS); Unmanned
Aerial Vehicle (UAV).

Resumo:

A pesquisa aplicada em Geomorfologia envolve coleta e análise de dados e se insere no planejamento, manejo e decisão sobre ocupação, produção, recreação e conservação. Nesse sentido, o uso de geotecnologias no estudo da erosão tem crescido e é preciso conhecer sua capacidade de contribuição. Por isso, o objetivo deste artigo é apresentar potenciais metodológicos e analíticos que o uso de Laser Scanner Terrestre (LST) possui, combinado ao imageamento por VANT, para monitorar e diagnosticar a erosão por voçorocas. As técnicas foram utilizadas de maneira experimental, trazendo um debate das relações metodológicas possíveis, explicitando prós e contras de cada uma. Ambas oferecem variadas possibilidades analíticas. No presente trabalho, as características de cada equipamento revelaram resultados quantitativos, pelo uso do LST, e qualitativos, com o VANT. Nota-se a complementaridade entre as duas técnicas, contribuindo para os estudos sobre erosão linear. As imagens aéreas geradas pelo VANT permitiram verificar caminhos preferenciais e variação de acúmulo de material erodido, além de servir ao processamento de dados do LST. A partir da nuvem de pontos deste, foram calculados 2.240,34 m² de área da voçoroca, ou 0,22ha, e 20,34 m³ de volume de solo erodido. Pelos dados e cálculos obtidos, foi estimada uma taxa erosiva de 8,65 t·ha⁻¹·ano para um período mínimo de atividade erosiva de 17 anos. O uso

destas geotecnologias segue desafiador na Geomorfologia, principalmente na erosão por voçorocas. Sua tarefa é ampliar a compreensão dos processos, as variações de escala e desenvolver novas pesquisas, com maior detalhe e precisão, na busca por ações de controle mais eficazes.

Abstract:

Geomorphological applied research involves data collection and analysis, as part of planning, management, and decision-making, on occupation, production, recreation and conservation. Erosion studies with the use of geotechnologies have been growing, therefore, it is necessary to know its contribution capacity. This article aims at presenting methodological and analytical potentials that Terrestrial Laser Scanning (TLS) have, combined with UAV's aerial images, to monitor and assess gully erosion. These techniques were employed as an experiment, bringing possible methodological relations to debate. In this research work, each equipment characteristics revealed different results, quantitative ones, through TLS, and qualitative ones, through UAV. It is notable their complementarity, contributing with rill and gully erosion studies. Aerial images from UAV allowed checking preferential paths and the variation of eroded material accumulation, also serving to TLS data processing. From its point cloud were calculated gully area as 2240.32 m², or 0.22ha, and soil eroded volume of 20.34 m³. Through data and calculations erosion rate of 8.65 t·ha⁻¹·year were estimated, for a minimum period of erosive activity of 17 years. Using these geotechnologies remains a challenge to Geomorphology, especially for gully erosion. Their assignment is to increase the comprehension on the processes and scale variations, leading to the development of new researches, with greater detail and precision, looking for more efficient control actions.

1. Introdução

Mesmo com inúmeros artigos científicos sobre erosão dos solos, há muitas lacunas a serem respondidas e que necessitam de constantes melhorias na compreensão de processos naturais, antrópicos e suas interações, no estudo espaço-temporal de taxas de erosão, e nas técnicas e estratégias inovadoras que visem reduzir e prevenir o processo erosivo (POESEN, 2018; MUSHI *et al.*, 2019). Nos últimos 50 anos, disseminaram-se usos de diversas técnicas nos estudos geomorfológicos, com sequências de fotografias de campo e aéreas, sensoriamento remoto, monitoramentos com *data loggers* e modelagens numéricas (LOUREIRO e FERREIRA, 2013; GOUDIE, 2018).

Monitorar a erosão em campo e estimar seu volume, através de métodos tradicionais, com caixas coletoras de sedimentos, pinos de erosão e pontes de erosão, exige muito trabalho e tempo empenhados (LOUREIRO, 2013; MARCHIORO *et al.*, 2016; PEREIRA *et al.* 2016; ANDRADE e MAIA, 2018; RANGEL e GUERRA, 2018; POESEN, 2018; CASTRO *et al.*, 2019; FONSECA FILHO *et al.*, 2019; BOARDMAN, 2020). Mapeamentos de detalhe, com estações totais, ou varreduras a laser terrestre também demandam esforços e dependem da acessibilidade das feições que serão monitoradas (GOODWIN *et al.*, 2016; MARCHIORO *et al.*, 2016; AQUINO DA CUNHA, 2018;

HU *et al.*, 2018; KRENZ e KUHN, 2018; ERCOLE, 2019; ROGRIGUES *et al.*, 2019). Contudo, os métodos convencionais carecem de maior densidade de pontos suficientes para captura mais precisa da variabilidade espacial da feição, necessitando de anos de monitoramento para gerar extrapolações mais confiáveis (PLENNER *et al.*, 2016; KRENZ e KUHN, 2018).

Dados com a tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR) podem ser obtidos por equipamentos aéreos ou terrestres, a partir de posições fixas, como tripés ou plataformas *offshore* (VINCE *et al.*, 2015; EAGLESTON e MARION, 2020). Segundo Plenner *et al.* (2016), veículos aéreos com LiDAR possuem alta resolução espacial para grandes áreas, mas perdem detalhes, como faces de margens de rios. Isto se aplica, também, a paredes de voçorocas, já que estas são ambientes complexos e altamente variáveis (KAISER *et al.*, 2014; GOODWIN *et al.*, 2016; LOUREIRO, 2019; EAGLESTON e MARION, 2020).

O *Laser Scanner* Terrestre (LST), como método de levantamento de alta resolução espacial, possui rapidez e precisão, não é intrusivo (como métodos tradicionais manuais), tem fácil implementação e é automatizado, embora seus *softwares* de processamento sejam caros e exijam conhecimento de uso (KAISER *et al.*, 2014; RUBIO, 2014; GOODWIN *et al.*, 2016; PLENNER *et al.*, 2016; KUŽELKA e SUROVÝ, 2018).

Abbas *et al.* (2019) usaram o LST para monitorar deslizamentos na Malásia, com ótimos resultados. Na Itália, Barbarella *et al.* (2018) também fizeram mapeamento em áreas com risco de deslizamento usando LST. Estes autores destacam que a identificação, reconhecimento e mapeamento geomorfológico são fundamentais para se compreender a estabilidade das encostas. No entanto, eles apontam que métodos tradicionais na produção de mapas de riscos a deslizamentos, usando interpretação de fotografias aéreas, com estereoscópio, em conjunto com trabalho de campo, podem não ser suficientes para analisar, de forma objetiva, as complexidades da paisagem, em diferentes escalas.

Outra aplicação do Laser Scanner Terrestre foi feita por Prakash *et al.* (2019), os quais destacam a importância da aplicação do LST em áreas de mineração a céu aberto. Eles apontam que o LST, além de ser importante no levantamento de áreas a serem exploradas, proporciona precisão nos seus levantamentos, bem como economia de tempo e recursos financeiros. Os autores destacam ainda que essa técnica pode escanear milhões de dados em espaços de distância de poucos milímetros, em terceira dimensão, tudo isso em poucos segundos.

Ainda são encontrados poucos trabalhos que usem essas técnicas para monitorar processos erosivos (D'OLEIRE-OLTMANN *et al.*, 2012; RUBIO, 2014; VINCE *et al.*, 2015; ETCHELAR, 2017; GARRITANO *et al.*, 2019; LOUREIRO, 2019).

Geralmente, mensurações pontuais, como estacas e pinos, estimam taxas de erosão satisfatórias para pequenas áreas (LOUREIRO, 2013; BOARDMAN *et al.*, 2015; KRENZ e KUHN, 2018). Boardman (2020) relata monitoramentos de campo, que faz há 38 anos, baseados em controle local, sem utilização de geotecnologias avançadas. Trata-se da região de *South Downs*, na Inglaterra, onde existem 18 locais com erosão superior a $10 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}$, com o máximo chegando a $202 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}$. Esses solos, na maioria das vezes, possuem profundidade menor do que 15 cm, sendo assim, a erosão acelerada ameaça a sua produtividade (BOARDMAN, 2020). Isso prova que existem situações em que, mesmo sem a adoção de técnicas digitais, é possível monitorar processos erosivos acelerados, com estudos precisos e de detalhe. No entanto, as geotecnologias, adotadas neste artigo, tornam os levantamentos mais precisos e rápidos.

Segundo Loureiro (2019), este tipo de técnica possibilita medições geométricas (planas e/ou espaciais), mas não medições morfológicas, que vão considerar

a rugosidade, por exemplo, das paredes de voçorocas. Vince *et al.* (2015) analisaram ravinas e seus resultados apontaram que os pinos subestimaram a realidade da feição, por não considerarem suas sinuosidades, tendo sido estas captadas por LST. Portanto, para quantificar a morfologia, uma densa nuvem de pontos é necessária, como as obtidas por tecnologias LiDAR, seja através de LST ou VANTs, capacitados para sensoriamento remoto e modelagem do terreno, com nível de detalhe (KAISER *et al.*, 2014; GOODWIN *et al.*, 2016; LOUREIRO, 2019; EAGLESTON e MARION, 2020).

O LST permite maior precisão quanto à variabilidade espacial do recuo das paredes de voçorocas e margens de rios como um todo contínuo (PLENNER *et al.*, 2016; ALPTEKİN *et al.*, 2019). Entre suas vantagens estão: demanda e esforço menor, frente a medidas manuais em campo; e capacidade de personalização, a depender de objetivos da pesquisa e acessibilidade (PLENNER *et al.*, 2016; NADAL-ROMERO e GARCÍA-RUIZ, 2018). Além disso, o LST é mais apropriado para varreduras na escala da encosta, pois a densidade da nuvem de pontos do escâner terrestre é notadamente maior do que a de Laser Scanner Aerotransportado (LSA), possuindo maior detalhamento (PERROY *et al.*, 2010; PRETI *et al.*, 2013; GOODWIN *et al.*, 2016; EAGLESTON e MARION, 2020). Perroy *et al.* (2010) compararam MDTs gerados com LSA e LST, cujas resoluções espaciais foram de 1,5 m e 0,25 m, respectivamente. Estes autores indicam, contudo, que voçorocas profundas podem trazer maior dificuldade quanto à coleta contínua dos dados com LST, julgando o LSA mais apropriado neste caso. A aquisição de imagens por VANTs é, também, uma alternativa ao LST, quando há dificuldade de acesso, falta de segurança suficiente para seu uso em campo, ou quando a dissecação das feições gera obstruções (NAVES SILVA *et al.* 2015; KRENZ e KUHN, 2018; GARRITANO *et al.*, 2019; KRENZ *et al.*, 2019).

Portanto, é inegável que métodos que utilizam técnicas manuais, como estacas e pinos, para monitorar erosão, têm importância, conforme reconhece a literatura nacional e internacional (FULLEN e CATT, 2004; GUERRA, 2005; MORGAN, 2005; LOUREIRO, 2013; MARCHIORO *et al.*, 2016; PLENNER *et al.*, 2016; ETCHELAR, 2017; ANDRADE e MAIA, 2018; NADAL-ROMERO e GARCÍA-RUIZ, 2018; CASTRO *et al.*, 2019; FONSECA FILHO *et al.*, 2019; BOARDMAN, 2020). Inclusive, essas técnicas manuais permanecem necessárias, dadas as suas qualidades, como baixo custo, facilidade de utilização e escala de detalhe no campo

(GUERRA, 2005; SOLÉ-BENET *et al.*, 2012; LOUREIRO, 2013; POESEN, 2018; BOARDMAN, 2020). Porém, os avanços tecnológicos têm trazido maiores possibilidades com técnicas digitais, como LST e VANTs, que oferecem dados cada vez mais precisos e geração de modelos tridimensionais, enriquecendo as análises sobre a dinâmica erosiva (BONILLA, 2008; LOUREIRO e FERREIRA, 2013; CASTILLO e GOMEZ, 2016; GOODWIN *et al.*, 2016; HU *et al.*, 2018; KRENZ e KUHN, 2018; ERCOLE, 2019; GARRITANO *et al.*, 2019; LOUREIRO, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2019).

No presente artigo, as técnicas de escaneamento terrestre a laser e tomada de fotografia aérea, com LST e VANT, respectivamente, são utilizadas de maneira experimental para analisar o papel destas geotecnologias no estudo da erosão por voçorocas.

A área de estudo pertence à bacia do rio Pirai (município de Rio Claro-RJ), afluente natural do rio

Paraíba do Sul e artificialmente desviado para atender ao sistema de abastecimento do rio Guandu, compondo sua Região Hidrográfica (Figura 1). Voçorocas e cicatrizes de movimentos de massa são feições geomorfológicas presentes em diversas encostas do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (Figura 1a e 1b), devido ao histórico de uso e manejo da terra, com os ciclos econômicos da cana-de-açúcar, do café e, posteriormente, da pecuária (AVELAR e COELHO NETTO, 1992; INSTITUTO TERRA, 2008; SATO *et al.*, 2009; DEVIDE, 2013; SILVA, 2013; MELLOs *et al.*, 2016; JUNQUEIRA *et al.*, 2017; DANTAS e COELHO NETTO, 2018).

Há pioneirismo do município no Pagamento de Serviços Ambientais (PSA), como o programa “Produtor de Água e Floresta”, e atuação de Organizações Não-Governamentais, a exemplo do Instituto Terra de Preservação Ambiental (ITPA) e *The Nature Conservancy* (TNC), com objetivos à conservação e recuperação de solos, rios e vegetação.

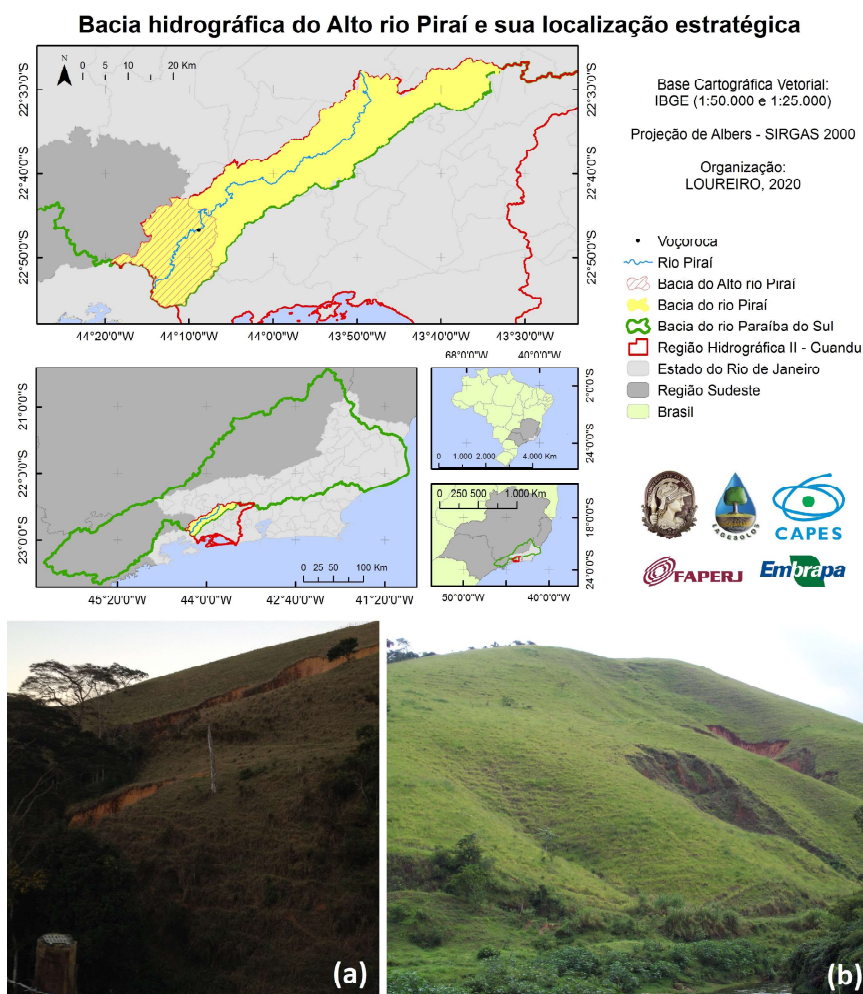


Figura 1 - Acima: mapa de localização da área de estudo, destacando a bacia do rio Pirai, na interseção entre a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e a RH-II Guandu. Abaixo: (a) voçorocas em área de pastagem; (b) cicatriz de voçoroca e voçoroca ativa, ao fundo, às margens do rio Pirai. Fotos: Rafael Carvalho (2017) e Hugo Alves S. Loureiro (2017).

2. Materiais e métodos

2.1 Área de estudo

Foi selecionada uma voçoroca localizada às margens da RJ-155, Angra dos Reis – Rio Claro, no distrito de Lídice, contando com autorização de acesso e estudo por parte do então proprietário, Sr. Márcio (*in memorian*). A seleção baseou-se na acessibilidade da feição e suas encostas, sendo uma das voçorocas mais significativas e de destaque na região.

O clima úmido no reverso da Serra do Mar e dos alinhamentos serranos escalonados da Serra da Mantiqueira apresenta totais anuais pluviométricos de 1.200 a 1.990 mm (AVELAR e COELHO NETTO, 1992; DANTAS *et al.*, 2005; UAGODA *et al.*, 2006; SATO *et al.*, 2009; LEAL *et al.*, 2015). O tipo climático, classificado como tropical de altitude, possui invernos brandos e verões chuvosos, típico da região serrana, com as estações de Lídice e Barragem de Tócos, em Rio Claro, registrando médias anuais de 1.786 e 1.507 mm de chuva, respectivamente (COSTA *et al.*, 2012; INEA, 2015).

O embasamento geológico da região do reverso da Serra do Mar é composto por rochas pré-cambrianas, com predomínio de gnaisses no maciço que divide o litoral e o interior e em várias áreas da bacia do rio Pirai. São associadas, ainda, a intrusões graníticas do ciclo Brasileiro, possuindo distintos graus de resistência ao intemperismo – feldspato e biotita menos resistentes e quartzo mais resistente – apresentando erosão diferencial do relevo e solos mineralogicamente pobres (AVELAR e COELHO NETTO, 1992; UAGODA *et al.*, 2006; INSTITUTO TERRA, 2008; MELLOS *et al.*, 2016).

Sua geomorfologia, típica do domínio de mar de morros do Vale do Paraíba, tem nas escarpas montanhosas que compõem as Serras do Mar e da Mantiqueira, fortemente alinhadas em WSW-ENE, os divisores das nascentes do rio Pirai (DANTAS *et al.*, 2005; COSTA *et al.*, 2012; DEVIDE, 2013; DANTAS e COELHO NETTO, 2018). Ravinas e voçorocas concentram-se, principalmente, na unidade geomorfológica Colinas, em morros de vales suspensos, e no Domínio Montanhoso (SATO *et al.*, 2009; INEA, 2015). No reverso da escarpa da Serra do Mar, a compartimentação do relevo se dá não abruptamente em direção ao interior, com níveis de base locais e formas planas, de origens coluvial e aluvial, em meio às linhas de serra e picos,

produzindo clara ruptura de declive entre a encosta e o fundo de vale, favorecendo o uso e ocupação para plantios e pecuária, com preservação de florestas em muitas encostas (INSTITUTO TERRA, 2008; DEVIDE, 2013; LEAL *et al.*, 2015).

Por tais características, os solos são espessos, apresentando transição/evolução desde os Neossolos Litólicos, nos divisores da bacia do rio Pirai, até os Latossolos Vermelho-Amarelos, com horizonte B textural, nas partes mais baixas da bacia (INEA, 2015). Há domínio de Cambissolos, nas encostas íngremes, associados aos Latossolos Vermelho-Amarelos, ricos em minerais primários, no terço inferior das encostas e fundos de vale (INSTITUTO TERRA, 2008; SATO *et al.*, 2009).

A vegetação apresenta florestas nas partes superiores das bacias hidrográficas e fragmentos florestais isolados, com diferentes graus de conservação, remanescentes ou de formação secundária, separados por áreas cobertas por gramíneas (UAGODA *et al.*, 2006; INSTITUTO TERRA, 2008; DEVIDE, 2013). Estas ocupam área originalmente coberta por Floresta Estacional Semi-decidual, ou Floresta Tropical Subcaducifólia, típicas de Mata Atlântica, com período seco bem definido. Enquanto nas porções elevadas da bacia predomina a Floresta Ombrófila Densa, com elevada precipitação, vinda da escarpa da Serra do Mar, não possuindo esclerofilia e substrato superior de 25 a 30 metros de altura (INSTITUTO TERRA, 2008; INEA, 2015; RANGEL, 2016). Nas áreas menos íngremes, pastos dominam a paisagem nas colinas e planícies, além de uma agricultura pouco expressiva (INSTITUTO TERRA, 2008; DEVIDE, 2013; DANTAS e COELHO NETTO, 2018).

2.2 Laser Scanner Terrestre (LST)

O modelo de LST utilizado foi o *Leica ScanStation C10*. Uma única ida a campo foi realizada em 27 de fevereiro de 2018. Como o uso do LST depende das condições de campo, ocorreram dois empecilhos: (1) não houve escaneamentos no interior da voçoroca, dada a saturação do material mobilizado, devido à precipitação na véspera do trabalho de campo (95,6 mm em 36h), impossibilitando acesso e permanência de pessoas e equipamentos; (2) evento pluviométrico durante o trabalho de campo, pois o escaneamento das gotas de chuva pode poluir a nuvem de pontos, empobrecendo a varredura.

Assim, o escaneamento a *laser* foi feito em três pontos (A1, A2 e A3, da esquerda para a direita da voçoroca), próximos às bordas da cabeceira da feição, obtendo três diferentes ângulos de varredura. Com o escâner em um dos pontos, são instalados os alvos do conjunto *Leica* nos outros dois pontos (Figura 2a, 2b e 2c). Esses são pontos de controle para calibração dos dados, ou seja, das nuvens de pontos de cada varredura e das imagens geradas. As varreduras dos três pontos foram unificadas no *software Leica Cyclone*.

A resolução da nuvem de pontos deve ser ajustada antes da varredura, quando é criada a pasta que armazenará os dados (Figura 2d). São captados até 50 mil pontos por segundo. As resoluções possíveis são: muito alta (2 cm de precisão); alta, (5 cm); média (10 cm); e baixa (20 cm). O máximo do campo de visão é de 360° x 270°, horizontal e vertical, respectivamente. O manual do *Leica Laser ScanStation C10* está disponível em PDF para *download* em <<https://kb.sccsurvey.co.uk/download/138/leica-c5-c10/2194/leica-scanstation-c10-c5-user-manual.pdf>>.



Figura 2 - (a) representação da posição dos pontos de varredura A1, A2 e A3; (b) no detalhe, alvo do LST; (c) alvo no ponto A3; (d) configuração de varredura do *Leica Laser Scanner*, definindo resolução, área e angulação para escaneamento. Fotos: Diego Suarez (2018).

A resolução aplicada durante as varreduras foi diferente, em razão das condições de campo. O primeiro ponto escaneado, A2, teve resolução alta, de 5 cm, levando 26 minutos para varredura. Devido à possibilidade de chuva, os pontos A1 e A3 tiveram resolução média, de 10 cm, durando 4 e 6 minutos, respectivamente. A angulação do campo de visão do LST foi de 90° x 90°, primando por detalhes da voçoroca e seu entorno imediato.

Já em gabinete, transferir a pasta com os dados do LST para um *pen drive* durou de dois a três minutos, ocupando 1,67 GB. A partir desse momento, os dados são processados em computador destinado aos produtos do LST, onde estão instalados os *softwares* e licenças necessários. As nuvens de pontos geradas pelas varreduras A1, A2 e A3 são unificadas em pares. Ao unir duas nuvens de pontos, a terceira é automaticamente unificada. Por exemplo: une-se A1 e A3, conseqüentemente A2 é unificada.

As coordenadas X, Y e Z na figura 3 (a) e (b) representam o local, a partir do qual aquela nuvem de pontos foi gerada. Assim, a estação 001 (primeira varredura da pasta) corresponde a A2, a estação 002 corresponde a A3 e a 003 corresponde a A1. Através dos

alvos é feita a junção das nuvens de pontos, contendo todos os elementos escaneados. Isto inclui a chuva (pontos em azul claro), verificada apenas na nuvem de pontos gerada por último, ou seja, em A1 (estação 003), exatamente a varredura finalizada com ocorrência de chuva fraca (Figura 4). Imperfeições como esta podem ser removidas durante o processamento.

Desta primeira experiência com o LST, o processamento dos dados no *software Leica Cyclone* gerou curvas de nível, utilizadas para o modelo hipsométrico da voçoroca, cálculos de área, volume e extensão.

2.3 Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)

Marzolf e Poesen (2009) indicaram o uso de fotografias aéreas digitais de alta resolução como possibilidade para estudos detalhados sobre voçorocas. Daba *et al.* (2003) já recomendavam que o mapeamento de voçorocas, com MDT e fointerpretação, utilizasse fotografias aéreas de escalas maiores que 1:10.000. Os VANTs, portanto, podem realizar essa tarefa com maior facilidade que satélites e sensores.

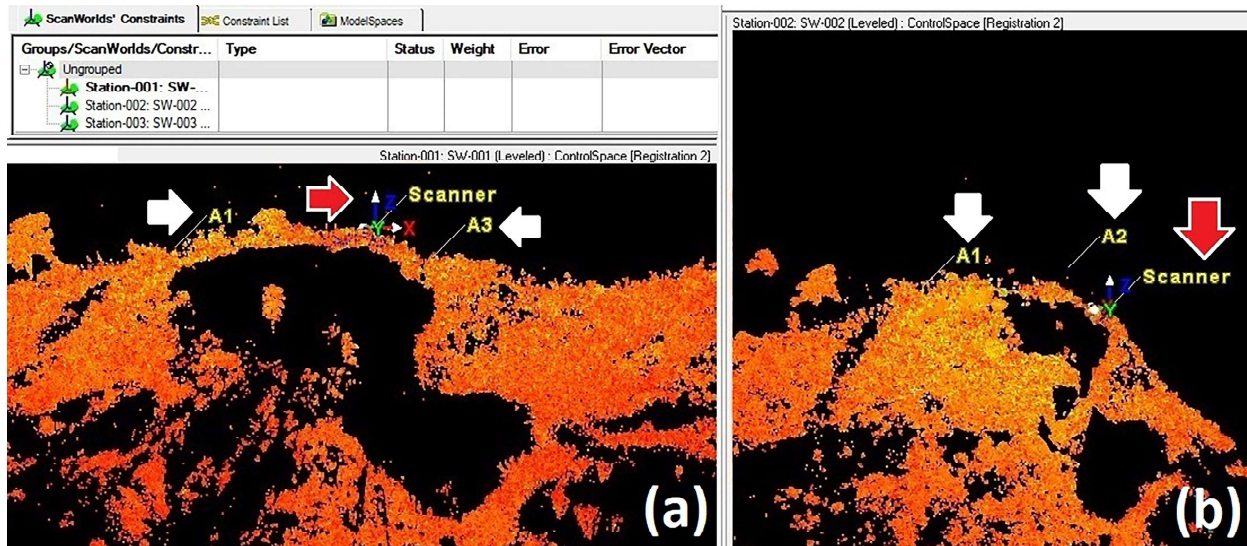


Figura 3 - Junção das nuvens de pontos de A2 (a) e A3 (b). Setas brancas = alvos; setas vermelhas = ponto de varredura do LST. Organização: Hugo Alves S. Loureiro (2019).



Figura 4 - Nuvem de pontos resultante da unificação de A1, A2 e A3, apresentando a chuva escaneada a partir de A1. Organização: Hugo Alves S. Loureiro (2019).

O VANT utilizado foi o *drone DJI Spark* (figura 5). Com o controle remoto conectado a um *smartphone*, realiza-se o voo, com o registro fotográfico em posições e altitudes desejadas. É um modelo simples, que não possui quaisquer capacidades de sensoriamento remoto. Sendo assim, suas fotografias aéreas têm caráter qua-

litativo para a análise geomorfológica. Desta forma, o imageamento produzido pelo uso de VANT, nesta pesquisa, tem sua utilidade na composição do diagnóstico da erosão e no processamento da nuvem de pontos do LST, detalhada adiante.

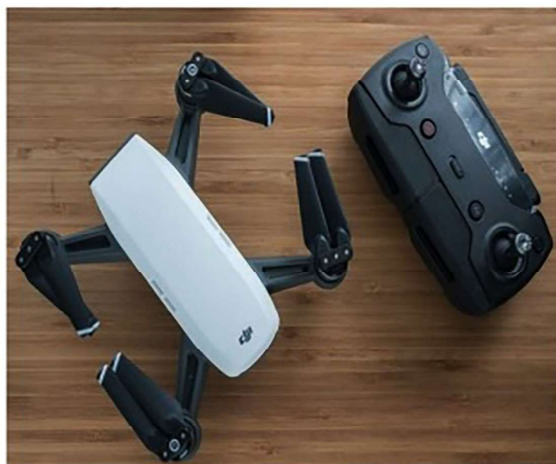


Figura 5 - VANT DJI SPARK, com funções fotográficas, sem sensoriamento remoto. Fonte: Garritano et al. (2019).

2.4 Relações metodológicas entre LST e VANT

Se LST e VANT são geotecnologias de detalhamento úteis à geomorfologia, o que pode diferenciá-las em termos de resultados e análise? Uma resposta possível é a conclusão de Krenz e Kuhn (2018, p.273, tradução nossa) de que imagens de alta resolução e precisão de VANTs diminuem “a distância entre o nível de escala do satélite e as nuvens de pontos LiDAR, de alta resolução”¹, incapazes de abranger grandes áreas. Ou seja, imagens de VANTs, com alta resolução e precisão representam escala intermediária entre imagens de satélite e produtos de escâneres terrestres a laser, de alto nível de detalhe (KRENZ e KUHN, 2018; LOUREIRO, 2019). Mas os VANTs podem sobressair frente a escâneres terrestres a laser se ambos tiverem a mesma precisão de milímetros e centímetros, diferenciando-se pela possibilidade de alcance de áreas com pouca acessibilidade ou inacessíveis (KRENZ e KUHN, 2018; ERCOLE, 2019). Logo, o LST é um ótimo método para o monitoramento da erosão linear, porém, muito dependente das condições de campo.

O VANT é um instrumento que pode produzir imagens aéreas e produtos derivados, como modelagem 3D e mapas de hipsometria e exposição/cobertura do solo (D'OLEIRE-OLTMANNNS et al., 2012; PEREZ e GARCIA, 2017; KRENZ e KUHN, 2018; ERCOLE, 2019; GARRITANO et al., 2019; GARRITANO, 2020), conforme a figura 6. Já o LST registra ângulos de visada diferentes, mapeando formas e objetos, por meio de milhões de pontos com coordenadas tridimensionais, gerando representação virtual, e dispondo de mais opções de manuseio e tratamento no *software* de processamento (Figura 7), indo além da geração de fotografias aéreas

dos VANTs (BONILLA, 2008; SOLÉ-BENET et al., 2012; PRETI et al., 2013; VINCE et al., 2015; ETCHE-LAR, 2017; LOUREIRO, 2019). Em outras palavras, a nuvem de pontos do LST permite maior variação de escalas de visualização e de trabalho, durante o processamento de dados, do que a imagem aérea resultante de diversas sobreposições laterais do VANT (LOUREIRO, 2019), caso este não use tecnologia LiDAR.

Ainda assim, há compatibilidade entre os produtos de LST e VANT, segundo o trabalho de Eltner et al. (2015), em que comparam o uso dessas técnicas no mapeamento de ravinas em parcelas de erosão. Nesta comparação, a precisão de Modelos Digitais de Superfície, produzidos a partir das imagens do VANT, coincidia com 1 cm de precisão do LST.

Uma vez que o LST vem sendo utilizado com alguma frequência para estudos com voçorocas, dada a alta precisão, o que o diferencia dos VANTs não é o resultado, ou a análise em si, mas a maior rapidez na coleta dos dados pelos VANTs, já que o LST exige deslocamentos em campo, com maior tempo e trabalho, inclusive no processamento dos dados (TEDESCO, 2015; NEUGIRG et al., 2016; FARIA et al., 2017; KRENZ e KUHN, 2018; ERCOLE, 2019; LOUREIRO, 2019; KRENZ et al., 2019). Para ambas as técnicas, há ainda a possibilidade de os *softwares* serem caros (PLENNER et al., 2016; FARIA et al., 2017; ERCOLE, 2019), ou não adequados a análises geomorfológicas, tornando seu uso desafiador (BONILLA, 2008). Esta última autora, porém, considera que as lições aprendidas no uso do LST são fundamentais para desenvolver melhores práticas para estudos futuros. Esta análise, em particular, é corroborada nos resultados do presente artigo.

¹ “The high resolution and accuracy from the derived UAV imagery is closing the gap between satellite scale level and high-resolution LiDAR point clouds that are not available for larger areas”.

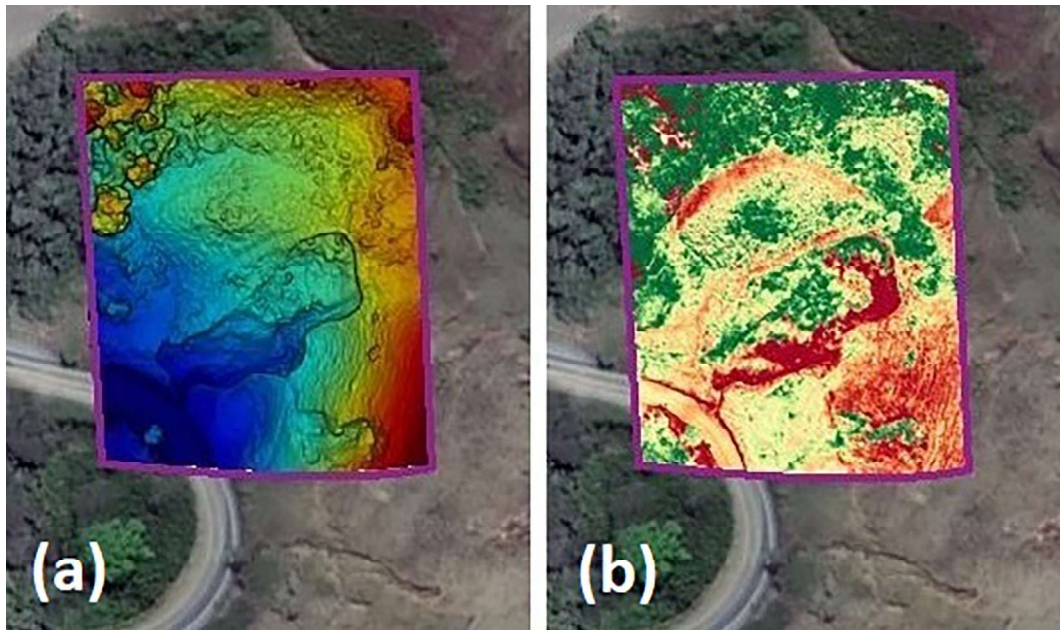


Figura 6 - Hipsometria (a) e exposição/cobertura do solo (b), a partir de imagens do VANT DJI MAVIC PRO 2018, modelo com funções de sensoriamento remoto, mais avançado do que o utilizado neste artigo (figura 5). Fonte: adaptado de Garritano et al. (2019).

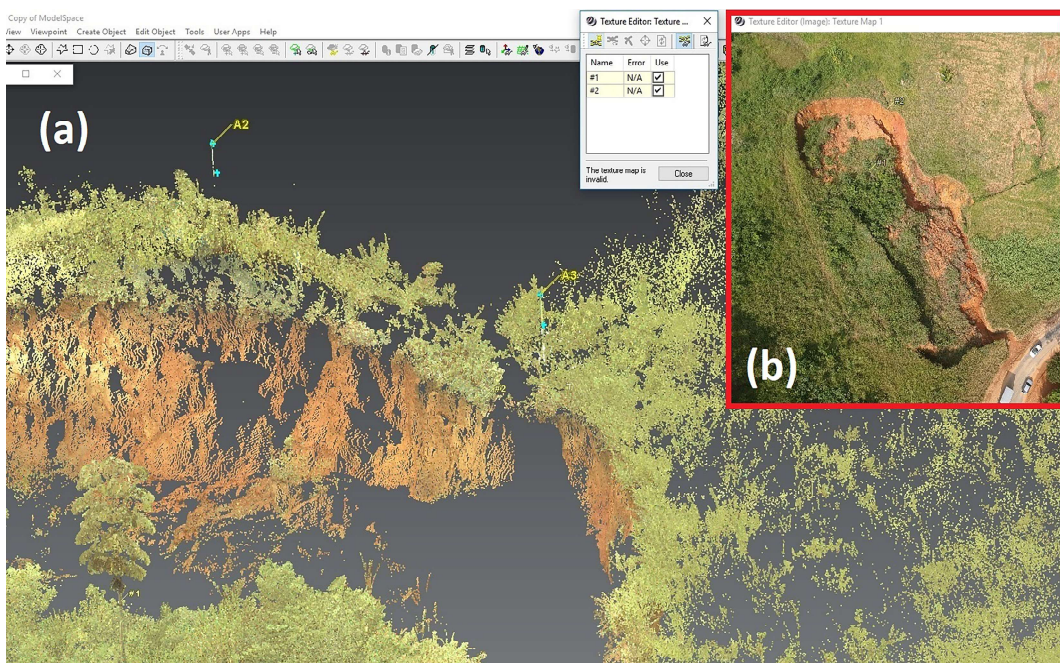


Figura 7 - Print Screen com o tratamento da nuvem de pontos do LST (a) no software Leica Cyclone. No detalhe (b), fotografia aérea do VANT DJI Spark, fundamental no processamento dos dados do LST. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018). Foto aérea: Fabrizio Garritano (2018).

3. Resultados e Discussão

3.1 Produtos da interação entre LST e VANT

Apesar da capacidade de alta precisão, Krenz e Kuhn (2018) ressaltam que os volumes verificados nestes métodos devem ser considerados “boas estimativas” e não valores absolutamente precisos, pois ainda

há elementos que desafiam a exatidão dos dados. Nesta pesquisa, esses elementos resultam, por exemplo, do sombreamento de alguns pontos. Como houve áreas não varridas, conseqüentemente, não há precisão fiel à realidade, pois são geradas imperfeições no modelo, produzindo erros que necessitam de remoção manual, não automática (Figura 8).

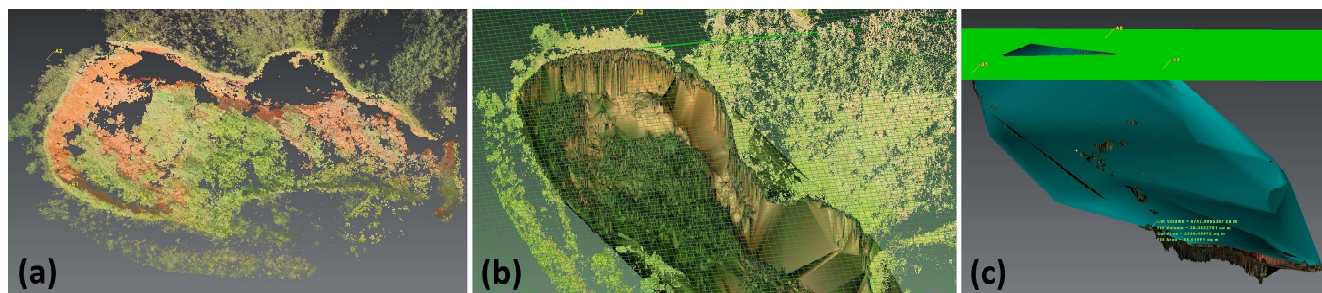


Figura 8 - (a) Ortoimagem gerada do tratamento da nuvem de pontos; (b) modelo TIN gerado a partir da ortomagem; (c) modelo resultante do processo de cálculo de volumes, gerado a partir do modelo TIN. Em (a) os “vazios” resultam de pontos não escaneados, que geram imprecisão em (b), onde são automaticamente preenchidos. Processamentos: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Utilizadas nesta pesquisa em caráter experimental, as técnicas demonstram potenciais e limitações. Nesse contexto, o escaneamento a laser terrestre (*terrestrial laser scanning*) se destacou por ser aquela que, analiticamente, trouxe o maior potencial de resultados, sejam qualitativos, mas, principalmente, quantitativos. O LST proporcionou diferentes pontos de visada, cálculos de área, volume e seções, além de gerar curvas de nível e hipsometria. Porém, exigiu alta demanda de tempo de processamento, no ambiente virtual, principalmente pela carência de trabalhos relacionados à geomorfologia, predominando estudos em engenharia e arquitetura (SHUKOR *et al.*, 2015; VACCA *et al.*, 2016; CINTRA e GONÇALES, 2017 e 2019; ÇELİK *et al.*, 2019; MESÁROŠ *et al.*, 2019; NIETO-JULIÁN *et al.*, 2019; SPAIRANI-BERRIO *et al.*, 2019; ZEIDAN *et al.*, 2019).

Ainda assim, as imagens obtidas com VANT tiveram importância fundamental no desenvolvimento da pesquisa. Devido à alta definição e escala de detalhe, ao compor o ambiente de processamento dos dados do LST no *software Cyclone*. Partindo de uma foto do VANT, foi possível realizar as marcações necessárias de pontos comuns (mínimo de sete válidos), entre a fotografia aérea e a nuvem de pontos do LST (figura 9), para gerar os produtos e dados deste último.

São identificados diversos “vazios” na imagem formada pela nuvem de pontos do LST, resultado de oclusões geradas pela impossibilidade de realizar mais varreduras, principalmente no interior da feição. Isso mostra a importância de diversificar o posicionamento do LST e suas configurações (GOODWIN *et al.*, 2016). Ao escanear voçorocas profundas, Perroy *et al.* (2010) também registraram problemas de oclusão significativos. Bonilla (2008) afirmou que a eliminação de

sombras e quaisquer obstruções demandavam diferentes posicionamentos de varredura.

Uma vez que este estudo é experimental, cabe mencionar limitações significativas. Não foi possível obter informações hidrológicas, devido à dificuldade de extrair dados em extensões compatíveis entre os *softwares* do LST e o ArcGIS. Diferentemente de Ramos (2010), que, através da ferramenta *Hydrology* do *software* ArcGIS, e das curvas de nível extraídas da nuvem de pontos do LST, obteve direção e acúmulo de fluxo pluviométrico (*flow direction* e *flow accumulation*). Esses produtos lhe permitiram verificar maior e menor suscetibilidade à erosão de determinadas áreas de uma voçoroca.

Tal dificuldade de compatibilizar conteúdos não é exclusividade desta pesquisa. Krenz e Kuhn (2018) geraram um MDT, interpolado em ambiente GIS, com base em imagem de satélite de alta resolução, e um MDT produzido através de imagens de VANT. Esses autores buscavam obter volumes para *badlands*, o que foi possível apenas pelo MDT do VANT, dada sua alta resolução. Eles reforçaram, pois, que não puderam estimar o volume no ArcGIS, e realizar a comparação, porque seria muito demorado, necessitando várias etapas de trabalho.

3.2 Análises quantitativas do LST e qualitativas do VANT

O uso de geotecnologias sofisticadas, como LST e VANTs profissionais, ganha relevância pronunciada. São capazes de se adequar à periodicidade desejada das pesquisas e gerar medidas em área, extensão e volume. Nesses termos quantitativos, sobressaiu o uso do LST, devido a três produtos: modelo tridimensional, gerando cálculos de área e volume da voçoroca; curvas de nível, que levaram ao mapa de hipsometria; e medidas de comprimento e extensão de seções da feição erosiva.

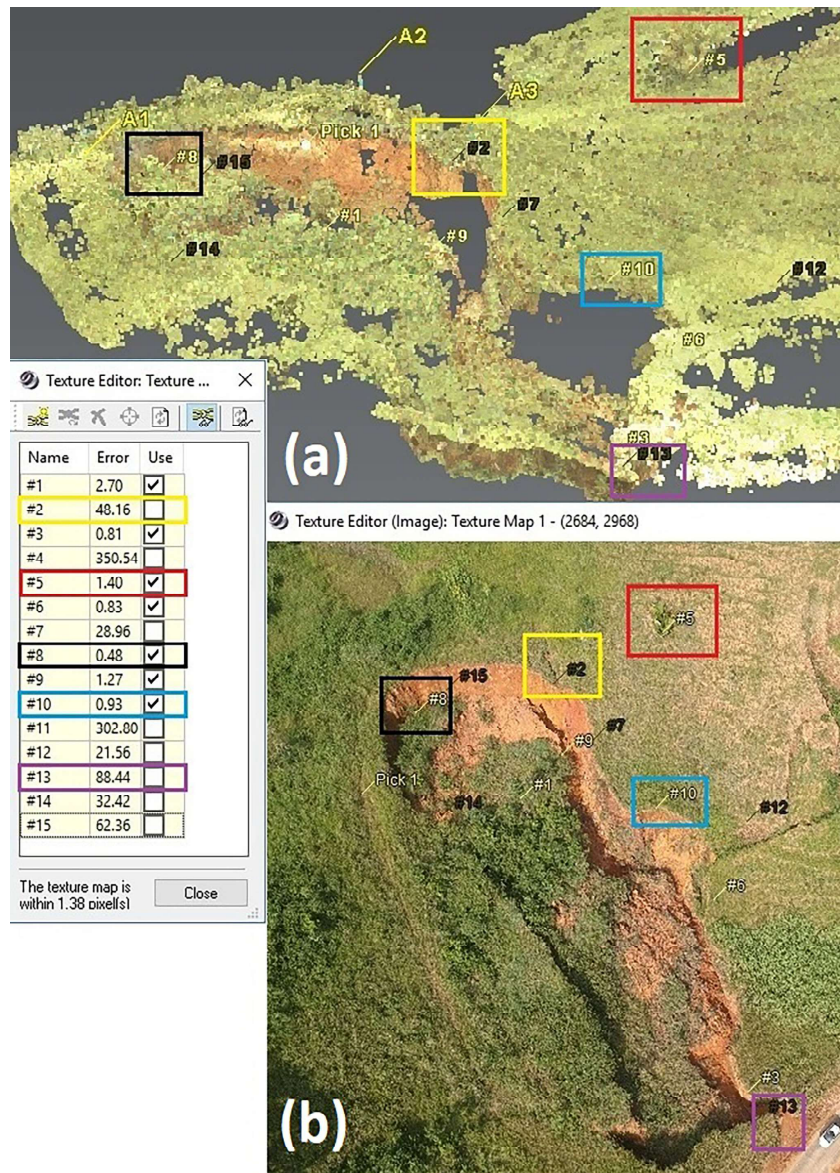


Figura 9 - Processamento da nuvem de pontos do LST (a), varredura em 02/2018, com auxílio de imagem obtida com VANT (b), em 03/2018, após a marcação de 15 pontos comuns entre (a) e (b). Com fonte amarela (na nuvem e na imagem) e check (✓) na tabela, são mostrados os pontos com menor erro de precisão, que definem os pixels do mapa de textura, a exemplo dos números 5 (vermelho), 8 (preto) e 10 (azul). Com fonte preta (na nuvem e na imagem) e sem check (✓) na tabela, estão pontos com erros grosseiros, que invalidam o mapa de textura, se acionados na tabela – com check (✓), a exemplo dos números 2 (amarelo) e 13 (roxo). Foto do VANT: Fabrizio Garritano (2018). Processamento e edição: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

O produto da figura 10 apresentou os resultados dos cálculos de área e volume, após diversas etapas de processamento da nuvem de pontos, que envolveram a geração de grades de coordenadas, modelagem 3D e malhas de pontos. Os resultados são expostos no modelo e ficam armazenados em tabela específica do programa.

Após testes que foram refinando os produtos gerados, chegou-se aos valores aproximados da erosão na voçoroca: 2.240,34 m² de área, considerando a superfície medida através do contorno da voçoroca; e

20,34 m³ de volume de solo erodido.

O volume considera a diferença entre uma superfície hipotética gerada pelo modelo matemático, derivado da nuvem de pontos (que supõe a superfície da encosta antes do processo erosivo), e a superfície escaneada, com suas reentrâncias, profundidades e o material solapado e armazenado no interior da feição. Ele contabiliza, pois, uma medida de volume do espaço entre uma superfície e outra, logo, o quanto de fato saiu de solo de dentro da voçoroca.

Para analisar comparativamente, foi necessário transformar unidades de medida e extrapolar valores para 1 hectare (ha), para padronizar os resultados, conforme realizado por Loureiro (2013; 2019). Assim, a medida de área da voçoroca, em hectares, equivale a 0,22 ha. O volume da voçoroca equivale a 20.342.278,10 cm³. Transformou-se para esta unidade a fim de utilizar a fórmula $D = m/V$, onde: D é a densidade do solo em g/cm³, m é a massa do solo em gramas (g) e V é o volume do solo em cm³. Há dados de densidade do solo (DS) e do volume de solo erodido, restando saber a massa de solo erodida. Portanto, utiliza-se a fórmula nesta forma: $m = D \cdot V$ (LOUREIRO, 2013; 2019).

Com base em análises de solo, que não foram objeto deste artigo, a densidade (D) do solo da voçoroca foi determinada em 1,59g/cm³. Com volume e densidade em cm³, ao aplicar a fórmula $m = D \cdot V$, a massa total de solo erodido pela voçoroca foi de 32.344.222,20 g, correspondendo a 32,34 t. Correlacionando estes valores, primeiro aos 0,22 ha da voçoroca, e depois com um período mínimo de atividade erosiva de 17 anos (entre a varredura de 2018 e a imagem mais antiga do software *Google Earth Pro*, de 2001), as proporções da erosão seriam de 147 t·ha⁻¹ e uma taxa de perda de solo de 8,65 t·ha⁻¹·ano.

Etchelar (2017) concluiu que o LST demonstrou seu potencial pela precisão e rápida coleta de dados em campo.

A autora verificou a variação de área de uma voçoroca, em um período de 12 anos, numa APA no Rio Grande do Sul, com aumento de 9.188,08 m², uma taxa de 765,67 m² por ano. Ramos *et al.* (2011) corroboram tal potencial do LST, ao compararem sua estimativa de volume de solo erodido com a de Machado (2007), que utilizou técnicas tradicionais de mensuração. A voçoroca analisada nesses dois estudos, no município de Pinheiral (RJ) – também Médio Vale do Paraíba do Sul, como o presente artigo – teve volumes estimados em 6.735 m³, pelo LST (RAMOS *et al.*, 2011), e 10.718 m³ (MACHADO, 2007).

Conforme realizado neste artigo, Ercole (2019) e Aquino da Cunha *et al.* (2020) estimaram os volumes de solo erodido a partir de uma superfície de referência, porém, foram obtidos a partir de imagens aéreas de VANT (que os últimos autores chamaram de *RPA – Remotely Piloted Aircraft*). O primeiro autor verificou o volume de duas voçorocas, com valores de 68.195,5 m³ e 49.409,7 m³, relativos a 1,516 ha e 0,708 ha, respectivamente. A base para o cálculo destas estimativas contou com ortomosaicos e modelos digitais de superfície, sendo as suas resoluções espaciais de 3,8 cm/pixel e 2 cm/pixel, respectivamente (ERCOLE, 2019). Aquino da Cunha *et al.* (2020), também através de modelos gerados pelo VANT, traçaram comparação com Estação Total (modelo Ruide RTS 862A e 160 pontos coletados), chegando a valores de 149,99 m³ a 189,99 m³.

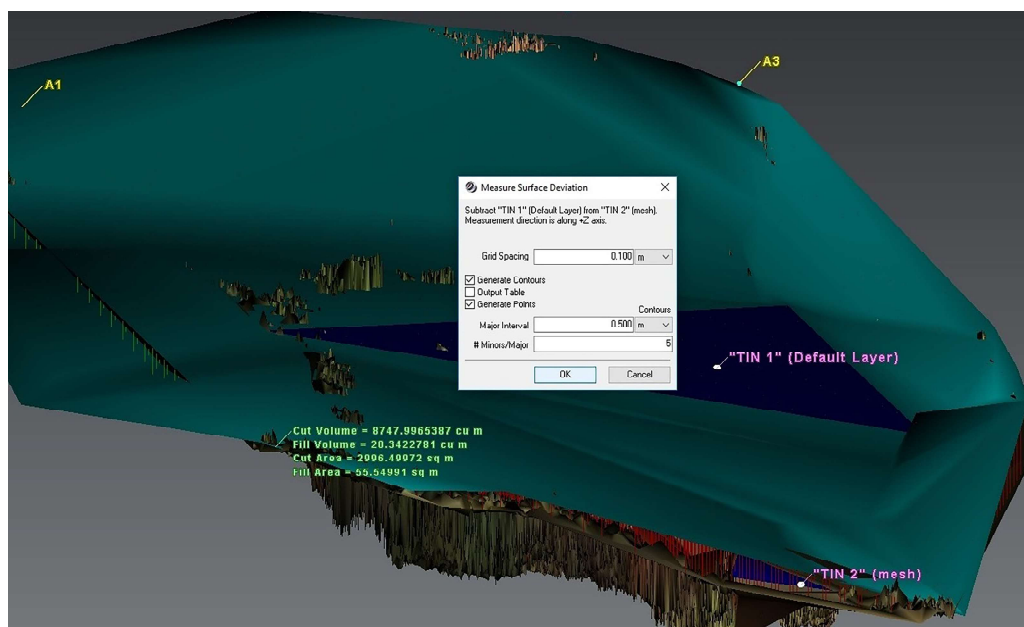


Figura 10 - Reprodução do modelo resultante dos processamentos para cálculo de área (m²) e volume (m³) da voçoroca. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Como produtos quantitativos do LST, há, ainda, hipsometria (pela geração de curvas de nível) e mensuração de seções da voçoroca (Figuras 11 e 12). Estes também acabam sendo qualitativos, já que podem ser analisados enquanto imagens, pois a precisão dos dados gera imagens de alta qualidade. As cores quentes (amarelo a tons de vermelho) indicam áreas mais profundas,

a partir de 5 metros abaixo da superfície da encosta, e as cores frias, áreas mais rasas, com maior colonização vegetal, desde a superfície até 4 metros abaixo dela. Analiticamente, as áreas profundas, em amarelo, laranja, vermelho e vermelho escuro, correspondem aos caminhos preferenciais dos fluxos de água e sedimentos e, conseqüentemente, são as zonas mais ativas da voçoroca.

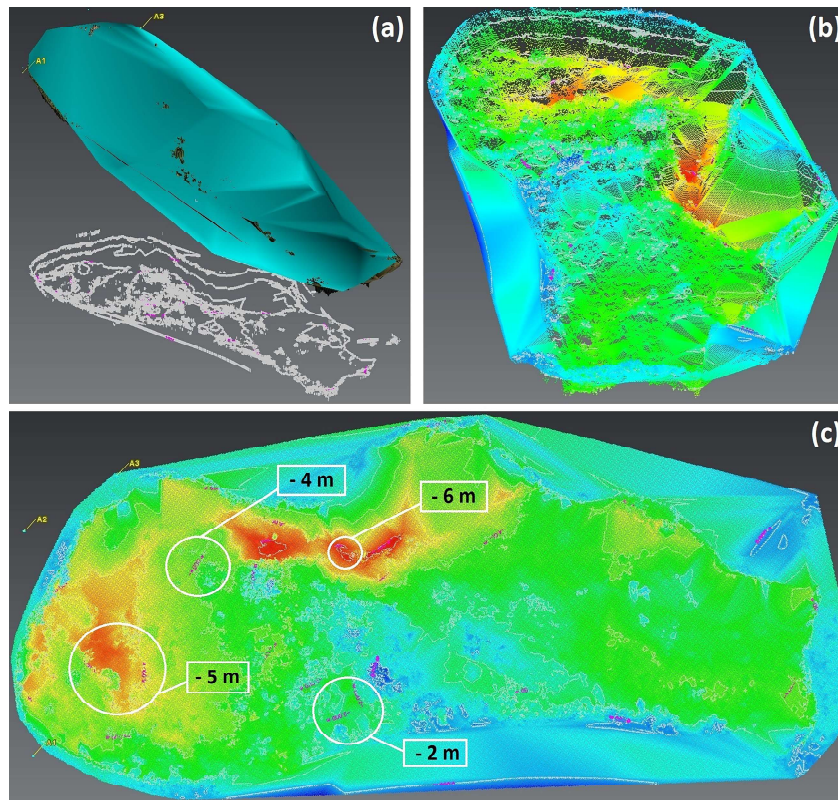


Figura 11 - Etapas finais de modelagem da voçoroca, através do processamento da nuvem de pontos do LST: (a) geração de curvas de nível (linhas brancas), a partir de modelo 3D; (b) modelo hipsométrico 3D, gerado pelas curvas de nível; (c) reprodução do modelo da hipsometria, com destaque dos principais pontos cotados das curvas de nível. Estas apresentam valores negativos, indicando a superfície original da encosta como referência. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Na figura 12, (1) corresponde à seção que mede os pontos mais distantes da cabeceira e da saída da voçoroca. Já (6) mede a feição em linha reta, em seu eixo principal. Portanto, a primeira possui 92,59 m e a última 90,26 m. As demais seções foram selecionadas de acordo com as diferentes larguras entre as bordas esquerda e direita, por seu formato irregular. A menor largura possui 20,06 m, em seção próxima da saída da feição (5). A maior largura possui 32,25 m, medindo a cabeceira da feição (2).

O VANT utilizado funcionou como uma câmera fotográfica aérea, produzindo fotografias em ângulos privilegiados. Essas imagens agregam qualitativamente à análise deste estudo, pela alta resolução de pixels e as

possibilidades de posicionamento, que facilita explorar áreas sem muito esforço físico em campo.

A fotografia da cabeceira da voçoroca (Figura 13) destaca a fenda no lado direito superior, por onde a água percorre preferencialmente, na superfície da encosta, provocando subprocessos do voçorocamento, por exemplo, a erosão por queda d'água (*plunge pool erosion*) (VANDEKERCKHOVE *et al.*, 2001; OLIVEIRA, 2005; LOUREIRO, 2013; KAISER *et al.*, 2014; SCHEINGROSS e LAMB, 2017; GUO *et al.*, 2019). Percebe-se, a partir dela, a maior atividade no lado direito da feição, que recebe os fluxos vindos por esse caminho superficial na encosta, e gera uma ravina acima da cabeceira.

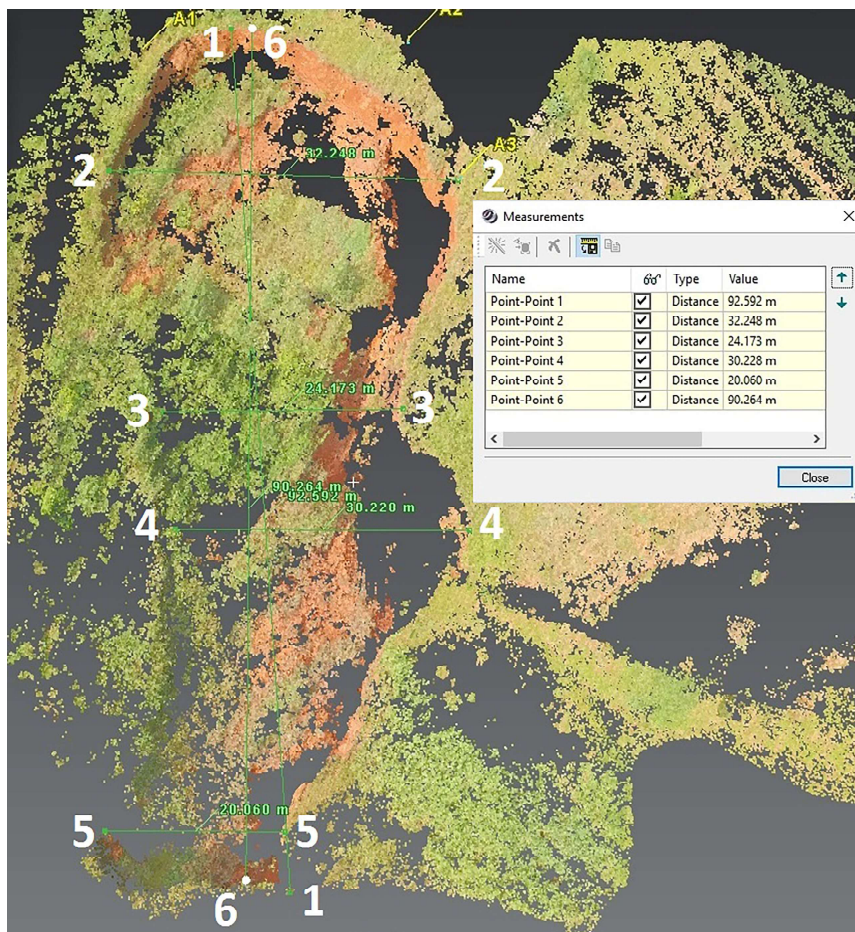


Figura 12 - Seções da voçoroca. Números brancos adicionados destacam os transectos virtuais do software Leica Cyclone. Números verdes são as distâncias point-point, em cada transecto, conforme a tabela de mensurações. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

A realização de dois sobrevoos com VANT, em período chuvoso, foi extremamente importante para mostrar como grandes volumes de chuva podem trazer prejuízos quando atingem voçorocas como essa. No período chuvoso, de dezembro de 2017 a março de 2018, foram realizados três trabalhos de campo, fundamentais para os resultados obtidos nesta pesquisa, em termos de sensoriamento remoto. No 1º e no último, foi utilizado o VANT, enquanto no 2º foi realizada a varredura com LST.

Na véspera do trabalho de campo do dia 27 de fevereiro de 2018, para escaneamento da voçoroca, houve os maiores impactos causados pela chuva, desde o início dos estudos, em meados de 2016. Dados obtidos pelo portal *Hidroweb* (Dados Telemétricos), da Agência Nacional de Águas, indicam um total de 95,6mm de chuva nas 36h que antecederam o trabalho de campo. Deste total, 57,8mm, ocorreram entre 19h e 22h de 26 de fevereiro de 2018.

A consequência deste evento de chuva é vista

claramente nas próximas imagens (Figuras 14a e 14b). A mobilização e extravasamento de materiais erodidos sobre a estrada foi excepcional, não registrada desde o início das pesquisas de campo. Em março de 2018, aproximadamente um mês após as fortes chuvas, havia muito material na estrada. Fica ainda mais evidente, ao serem comparadas uma foto de dezembro de 2017, com imagem aérea do VANT, de março de 2018, mostrando parte da voçoroca e da estrada. Nota-se que é mantido certo estreitamento das faixas de rolamento, devido ao acúmulo do material nas áreas de acostamento.

A varredura com LST captou o material acumulado no acostamento. Na figura 15 (a), impressiona a altura do acúmulo de sedimentos erodidos, bem como a espessura do material acima da faixa de rolamento. Na figura 15 (b), é mostrada a parte correspondente ao material no acostamento do outro lado da estrada. Não foi o objetivo aqui, mas seria possível calcular a quantidade de material acumulado.



Figura 13 - Foto aérea tirada com o VANT, focando a cabeceira da voçoroca, em dezembro de 2018. Seta destaca caminho preferencial da água. Foto: Fabrizio Garritano (2018).

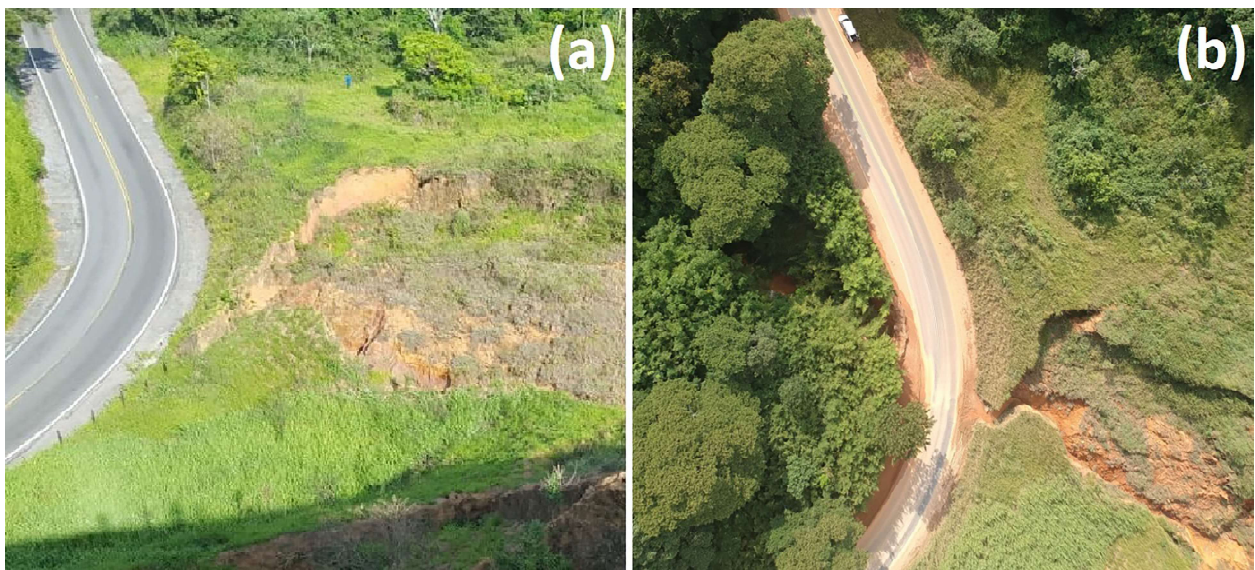


Figura 14 - Rodovia RJ-155/BR-494 e voçoroca em dezembro de 2017 (a) e em março de 2018 (b). Foto: Hugo Alves S. Loureiro (2017). Foto aérea: Fabrizio Garritano (2018).

O uso de geotecnologias para monitorar, diagnosticar e prognosticar erosão é uma via de mão dupla. Amplia a compreensão de processos, variedade de escalas e maior precisão; e traz novos desafios de operacionalização, processamento e análise de dados, além do desenvolvimento de pesquisas e equipamentos (LOUREIRO, 2019). Controlar voçorocas é difícil e oneroso (ALMEIDA FILHO, 2015), logo, LST e VANTs podem facilitar na compreensão dos processos de formação, da dinâmica de

escoamento superficial, no cálculo da perda de materiais e das frentes de expansão, ao se considerar que dão maior detalhe e precisão nas análises, reduzindo erros e contribuindo com ações mitigadoras mais eficazes. Goodwin *et al.* (2016) esperam que o incremento de estimativas das mudanças geomorfológicas e volumétricas levem a um avanço maior na compreensão da erosão por voçorocas e seus processos, contribuindo com a avaliação do desempenho de medidas de controle e estabilidade da erosão.

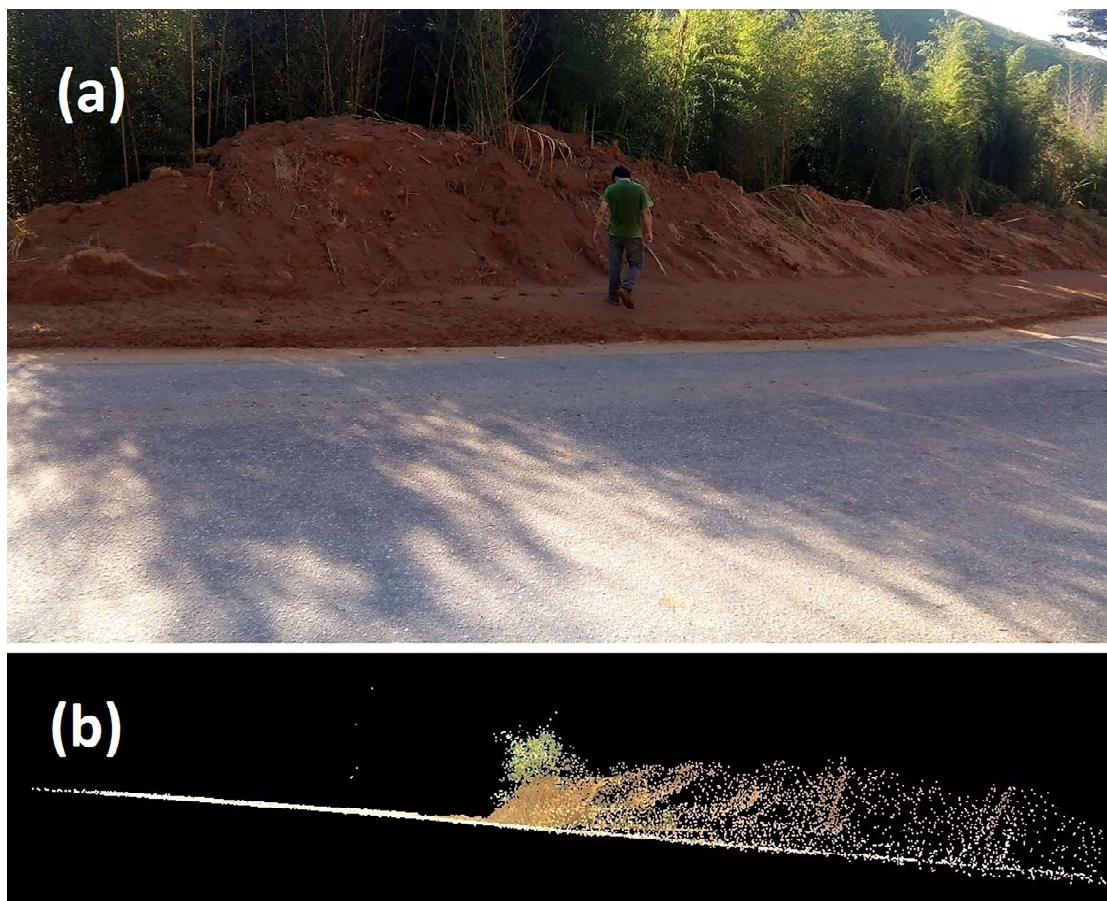


Figura 15 - (a) Acúmulo de solo erodido pela voçoroca (março de 2018). (b) Parte da nuvem de pontos mostrando os sedimentos acumulados na pista. Foto: Domynique Santos (2018).

Conclusões

Os resultados alcançados são validados pelo caráter experimental da pesquisa e cumprem o objetivo de apresentar as potencialidades e limitações de cada equipamento em termos metodológicos e analíticos. Mas cabe salientar que os resultados quantitativos gerados pelo LST correspondem, apenas, a estimativas, uma vez que houve excesso de sombreamento, que gerou diversos vazios na nuvem de pontos. Além de expor a dependência das condições de campo, isso traz inconsistências aos modelos produzidos. Apesar disso, os resultados demonstram a capacidade de precisão em reproduzir formas e gerar modelos tridimensionais, que compõem análises quantitativas fundamentais para diagnosticar a dinâmica erosiva da feição e seu entorno imediato.

O uso do *Laser Scanner* Terrestre provou que, se utilizado em condições de campo favoráveis, é capaz de gerar dados diversos que podem apoiar ações de manejo e mitigação. É preciso que se tenha em mente que são

necessários, minimamente, três posições fora da feição erosiva, três posições no seu interior (se for uma voçoroca) e um segundo período para repetição da varredura, de modo que se possa fazer comparações. Apesar de só terem sido possíveis três posições e um único período de escaneamento, os resultados são considerados positivos por apresentarem o potencial deste método.

Portanto, o LST pode oferecer alto nível de detalhe da morfologia interna da voçoroca, de suas paredes, piso e material mobilizado, e de suas bordas. Isto permite verificar tanto pequenas mudanças quanto a disposição de áreas mais e menos ativas, não apenas de modo qualitativo, mas, principalmente, em termos quantitativos. Os modelos gerados, suas imagens e, principalmente, os resultados quantitativos dizem muito a respeito do LST. Foi possível chegar a taxas estimadas elevadas da massa e do volume de material erodido, que seriam ainda maiores com mais posições de escaneamento.

Com varreduras completas e periodicidade, esperam-se resultados relevantes e de precisão. Seria

possível traçar, com grande fidelidade, diferentes origens de fluxos superficiais de escoamento e, até mesmo, subsuperficiais, produzidos por trilhas de pisoteio do gado e dutos (*piping*), respectivamente. Permitiria, ainda, diferenciar áreas mais vegetadas e de solo mais exposto. Essas possibilidades permitiriam avaliar que tipos de intervenção para a contenção de fluxos ou de proteção vegetal sobre o solo são necessários para cada área da voçoroca. Isto contribui para um manejo e conservação do solo mais adequados ao uso antrópico e seus impactos decorrentes.

Já os resultados dos sobrevoos com VANT mostraram a qualidade de suas imagens e a possibilidade de caracterizar e diagnosticar qualitativamente as áreas e os processos atuantes. Seu uso também foi positivo na geração de imagens e análise qualitativa. Contudo, o uso de VANT tem potencial, em termos quantitativos, em função do crescente avanço do seu desenvolvimento tecnológico. Seu principal resultado, neste estudo, foi o uso fundamental das imagens geradas para complementar o processamento dos dados da varredura a laser.

No comparativo entre as duas técnicas, é perceptível sua complementaridade, inclusive considerando que podem representar níveis de escala distintos. Há, porém, importantes diferenças a serem observadas. O LST fornece uma representação digital em milhões de pontos, enquanto o VANT utilizado fornece uma fotografia aérea do objeto de estudo. Se o VANT possuir capacidade de coleta de dados com LiDAR, pode ser uma técnica mais completa que o LST. Isto se deve pela portabilidade de cada equipamento e pela capacidade destes em campo. O LST possui limitações, verificadas nesta pesquisa, como a dependência das condições do terreno. Os vazios gerados por áreas não escaneadas na voçoroca foram resultado imediato e inerente disso. Não era possível carregar e fixar o equipamento em solo encharcado e instável no interior da feição. Um VANT seria capaz de realizar a varredura em seu interior, porque não demandaria, necessariamente, circulação sobre o terreno.

Nesse sentido, julga-se que ao dispor desses diferentes equipamentos, ambos devem ser utilizados de maneira complementar. Contudo, o potencial de crescimento no uso dos VANTs é maior, dado o menor custo e gasto de tempo, bem como o mais fácil manuseio e processamento de dados, em comparação com o LST. Este tem custo mais elevado e demanda maior esforço em trabalho de campo e gabinete. Ainda assim,

os estudos sobre erosão, especialmente sobre voçorocas, devem seguir estimulados para o uso de diferentes métodos, na busca por modelos e taxas que possam representar a realidade das diferentes áreas, com intuito de compreender os processos atuantes e colaborar com a ação sobre eles na resolução de problemas e na predição desses eventos.

Agradecimentos

Este artigo é produto do financiamento de bolsa de doutorado por CAPES e EMBRAPA (edital 15/2014) e financiamento de pesquisa pela FAPERJ (edital 11/2014) e bolsa Cientista do Nosso Estado, para Antonio José Teixeira Guerra, pela mesma agência. Por isso, agradecemos às três instituições. Também agradecemos aos Professores Manoel do Couto Fernandes e Paulo Márcio de Leal Menezes, do GeoCart-UFRJ, pelo empréstimo do Laser Scanner Terrestre; MSc. Tainá Laeta e MSc. Kairo Santos, pela ajuda com o escaneamento; MSc. Fabrizio Garritano, pelo uso do VANT; bolsista/IC Diego Suarez, pela ajuda no trabalho de campo do LST; e PPGG-UFRJ, pelas ajudas de custo para trabalhos de campo.

Referências Bibliográficas

- ABBAS, M. A.; FUAD, N. A.; IDRIS, K. M.; OPALUWA, Y. D.; HASHIM, N. M.; MAJID, Z.; SULAIMAN, S. A. Reliability of terrestrial laser scanner measurement in slope monitoring. In: ICRMBEE, IOP **Conf. Series**: Earth and Environmental Science, Malaysia, v.385, 5p, 2019. DOI:10.1088/1755-1315/385/1/012042.
- ALMEIDA-FILHO, G. S. Controle de erosão. **Fundações & Obras Geotécnicas**, v. 5, p. 66-77, 2015.
- ALPTEKİN, A.; ÇELİK, M. Ö.; DOĞAN, Y.; YAKAR, M. A pre-feasibility study for 3D modelling of the area affected from rockfall. **2. International Mersin Symposium, 23-25 Mayıs**, p.313-319, 2019.
- ANDRADE, J. H. R.; MAIA, C. E. Nota Técnica: Erosão de margens em rios semiáridos: estudo na sub-bacia do Baixo Jaguaribe – Ceará – Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia (Online)**, São Paulo, v.19, n.4, p. 859-870, 2018. DOI: 10.20502/rbg.v19i4.1379.
- AQUINO DA CUNHA, A. **Avaliação de erosão por imagens a curta distância**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola

- Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018. 115p.
- 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.
- AVELAR, A. de S.; COELHO NETTO, A. L. Fraturas e desenvolvimento de unidades geomorfológicas côncavas no médio vale do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 22, n. 2, p. 222-227, 1992. ISSN: 0375-7536.
- BARBARELLA, M.; DI BENEDETTO, A.; FIANI, M.; GUIDA, D.; LUGLI, A. Use of DEMs derived from TLS and HRSI Data for landslide feature recognition. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, 7, 160, 22p., 2018. DOI:10.3390/ijgi7040160.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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; ZANCOPÉ, 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.
- CINTRA, J. P.; GONÇALES, R. Topografia de túneis com Laser Scanner Terrestre: estudo de caso. **Boletim de Ciências Geodésicas (online)**, Curitiba, v. 23, n. 1, p. 115-133, 2017. DOI: 10.1590/s1982-21702017000100008.
- CINTRA, J. P.; GONÇALES, R. Aplicações das tecnologias Laser Scan e aerofotogrametria por drone para museus. **Anais do Museu Paulista, São Paulo, Nova Série**, v. 27, p. 1-28, 2019. DOI: 10.1590/1982-02672019v27e25d1.
- COSTA, A. de O.; SALGADO, C. M.; DINALI, Y. T. Caracterização da precipitação no médio vale do rio Paraíba do Sul Fluminense (RJ). **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, v. 2, n. 5. p. 1000-1013, 2012. ISSN: 2237-1419.
- ÇELİK, M. Ö.; ALPTEKİN, A.; YAKAR, M. Modelling of the mausoleum in Kanlıdivane Ruins with Terrestrial Laser Scanner. **2. International Mersin Symposium, 23-25 Mayıs**, p.320-329, 2019.
- DABA, S.; RIEGER, W.; STRAUSS, P. Assessment of gully erosion in eastern Ethiopia using photogrammetric techniques. **Catena**, 50, p. 273-291, 2003. DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00135-2.
- DANTAS, M. E.; SHINZATO, E.; MEDINA, A. I. M.; SILVA, C. R. da; PIMENTEL, J.; LUMBRERAS, J. F.; CALDERANO, S. B.; CARVALHO FILHO, A. de. *Diagnóstico geoambiental do Estado do Rio de Janeiro. Repositório Institucional de Geociências: Produção Científica, Trabalhos apresentados em eventos*, 35p., 2005. [URL ao final].
- DANTAS, M. E.; COELHO NETTO, A. L. (2018). A denudação antropogênica da paisagem: processos erosivodepositivos no médio Vale do Rio Paraíba do Sul. In OLIVEIRA, R. R. de; RUIZ, A. E. L. (org.) **Geografia histórica do café** [recurso eletrônico]. Ed. PUC-Rio, Rio de Janeiro: p. 107-126.
- DEVIDE, A. C. P. **História ambiental do Vale do Paraíba**. Qualificação (Doutorado em Fitotecnia). Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2013. 23p.
- D'OLEIRE-OLTMANN, S., MARZOLFF, I., PETER, K., RIES, J. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. **Remote Sensing**, 4, 3390–3416, 2012. DOI: 10.3390/rs4113390.
- 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: 10.1016/j.landurbplan.2020.103765.
- ELTNER, A., BAUMGART, P., MAAS, H. G., FAUST, D. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. **Earth Surface Processes and Landforms**, 40, p. 741–755, 2015. DOI: 10.1002/esp.3673.
- 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.
- FARIA, K. M. S. de; NETO, G. B. S.; COSTA, J. V. S.; FERREIRA, M. E. (2017) Dinâmica erosiva de processos tropicais: três décadas da erosão Chitolina. In PEREZ FILHO, A.; AMORIN, R. R. (org.) **Os desafios da Geografia Física na fronteira do conhecimento**. Campinas: Instituto de Geociências – UNICAMP, Campinas: p. 6997-7006.
- FONSECA FILHO, R. E.; VARAJÃO, A. F. D. C.; CASTRO, P. de T. A. Compactação e erosão de trilhas geoturísticas de parques do Quadrilátero Ferrífero e da Serra do Espinhaço Meridional. **Revista Brasileira de Geomorfologia (Online)**, São Paulo, v.20, n.4, p. 825-839, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i4.1561.
- FULLEN, M. A. e CATT, J. A. **Soil Management: problems and solutions**. London: Arnold, 2004. 269p.
- GARRITANO, F. do 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 (Mestrado em Geografia – Planejamento e Gestão Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2020. 97p.
- GARRITANO, F. do N.; LOUREIRO, H. A. S.; SANTOS, D. da S.; GUERRA, A. J. T. (2019). Mapeamento da erosão: análise e caracterização de uma voçoroca através do uso de imagens aéreas obtidas com *drone*. In GUERRA, A. J. T.; SANTOS FILHO, R. D. dos; TERRA, C. G. (org.) **Arte e Ciência: História e Resiliência da Paisagem**. Rio Books, Rio de Janeiro: p. 445-456.
- 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. The human impact in geomorphology – 50 years of change. **Geomorphology**, *In Press, Corrected Proof*, 2018. DOI: 10.106/j.geomorph.2018.12.002.
- GUERRA, A. J. T. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, FFLCH-USP, v. 16, p. 32-37, 2005. DOI: 10.7154/RDG.2005.0016.0003.
- GUO, M.; WANG, W.; SHI, Q.; CHEN, T.; KANG, H.; LI, J. An experimental study on the effects of grass root density on gully headcut erosion in the gully region of China's Loess Plateau. **Land Degradation Development**, p. 1-19, 2019. DOI: 10.1002/ldr.3404.
- HU, S.; QIU, H.; WANG, X.; GAO, Y.; WANG, N.; WU, J.; YANG, D.; CAO, M. Acquiring high-resolution topography and performing spatial analysis of loess landslides by using low-cost UAVs. **Landslides**, 15, p. 593-612, 2018. DOI: 10.1007/s10346-017-0922-8.
- INEA. INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (2015). **Plano de Manejo do Parque Estadual Cunhambebe**. Publicação INEA, [URL ao final].
- INSTITUTO TERRA. Instituto Terra de Preservação Ambiental (2008). **Estudos Técnicos para a criação de UCs**. Instituto Terra, Instituto Estadual de Florestas (IEF), Aliança para Conservação da Mata Atlântica, *The Nature Conservancy* (TNC), Prefeitura Municipal de Rio Claro (PMRC). [URL ao final].
- JUNQUEIRA, A. A.; LIMA, L. G. S.; SOUZA, J. P. de; SILVA, C. E. S. da; KNUPP, R. O.; BASSO, V. M. Avaliação do projeto Produtores de Água e Floresta da bacia do rio Guandu – RJ. In: 6º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade. **Anais...** Seropédica: UFRRJ. 2017. p. 47-56. ISSN 2525-4928.
- KAISER, A.; NEUGIRG, F.; ROCK, G.; MÜLLER, C.; HAAS, F.; RIES, J.; SCHMIDT, J. Small-scale surface reconstruction and volume calculation of soil erosion in Complex Moroccan Gully Morphology using Structure from Motion. **Remote Sensing**, 6, p. 7050-7080, 2014. DOI: 10.3390/rs6087050.
- 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. (2018). 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.
- KUŽELKA, K.; SUROVÝ, P. Mapping forest structure using UAS inside flight capabilities. **Sensors**, 18, 2018, 13p. DOI: 10.3390/s18072245.
- LEAL, P. J. V.; COELHO NETTO, A. L.; AVELAR, A. de S. Desenvolvimento de redes de canais e pirataria de água subterrânea: bacia do rio do Bananal (RJ/SP). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 107-122, 2015. DOI: 10.20502/rbg.v16i1.321.

- 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. e FERREIRA, S. M. (2013). O Papel das geotecnologias no estudo de feições erosivas e de movimentos de massa no Brasil. In GUERRA, A. J. T. e JORGE, M. C. O. (org.) **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas.** Oficina de Textos, São Paulo: p. 95-125.
- MACHADO, R. L. **Perda de solo e nutrientes em voçorocas com diferentes níveis de controle e recuperação no Médio Vale do rio Paraíba do Sul, RJ.** Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo). Instituto de Agronomia. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2007. 86p.
- MARCHIORO, E.; ANDRADE, E. E.; OLIVEIRA, J. C. Evolução espaço-temporal de voçorocas no Espírito Santo: estudo de caso nos municípios de Afonso Cláudio e Alegre. **Revista Brasileira de Geomorfologia (Online)**. São Paulo, v. 17, n. 1, p. 191-204, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i1.712.
- MARZOLFF, I.; POESEN, J. The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. **Geomorphology**, v. 111, p. 48–60, 2009. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.05.047.
- MELLOS, A. R. de; BESERRA, S. F.; SANTELLI, R. E.; COELHO NETTO, A. L. Variação espacial do intemperismo na bacia do rio Turvo, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (RJ) – subsídios ao entendimento do balanço de denudação química e mecânica. **Revista Brasileira de Geomorfologia (Online)**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 109-123, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i1.732.
- MESÁROŠ, P.; TKÁC, M.; MANDICAK, T. Effective connection of Terrestrial Laser Scanner and Unmanned Aerial Vehicle for as built measurement of buildings. In ZAVRŠKI, I.; CERÍČ, A.; VUKOMANOVIĆ, M.; HUEMANN, M.; RONGGUI, D. 14th International Conference Organization, Technology and Management in Construction & 7th International Project Management Association Research Conference. **Conference Proceedings...** Zagreb: Croatian Association for Construction Management. University of Zagreb. Faculty of Civil Engineering. 2019. p. 518-532. ISBN 978-953-7686-08-6.
- MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation.** Third ed. England: Blackwell Publishing, 2005. 304p.
- 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. (2018). 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.
- NAVES SILVA, M. L.; CÂNDIDO, B. M.; BATISTA, P. V. G.; QUINTON, J. N.; JAMES, M. R. Modelagem 3D da superfície do solo a partir de imagens obtidas por Veículo Aéreo Não Tripulado. XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. **Anais...** Natal: UFRN. 2015. 4p. DOI: 10.13140/RG.2.1.2290.3128.
- NEUGIRG, F., STARK, M., KAISER, A., VLACILOVA, M., DELLA SETA, M., VERGARI, F., SCHMIDT, J., BECHT, M., HAAS, F. Erosion processes in calanchi in the Upper Orcia Valley, Southern Tuscany, Italy based on multitemporal high-resolution terrestrial LiDAR and UAV surveys. **Geomorphology**, 269, p. 8-22, 2016. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.06.027.
- NIETO-JULIÁN, J. E.; ANTÓN, D.; MOYANO, J. J. Implementation and management of structural deformations into historic building information models. **International Journal of Architectural Heritage**, 14p., 2019. DOI: 10.1080/15583058.2019.1610523.
- OLIVEIRA, M. A. T. (2005). 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.** Bertrand Brasil, Rio de Janeiro: p. 57-99.
- PEREIRA, L. dos S.; RODRIGUES, A. M.; JORGE, M. do C. O.; GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A. Processos hidro-erosivos em solos degradados em relevo de baixa declividade. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 2, p. 299-316, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i2.877.
- PÉREZ, E.; GARCÍA, P. Monitoring soil erosion by raster

- images: from aerial photographs to drone taken pictures. **European Journal of Geography**, v. 7, n. 5, p. 117-129, 2017. ISSN 1792-1341.
- PERROY, R. L., BOOKHAGEN, B., ASNER, G. P., CHADWICK, O. A. Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California. **Geomorphology**, 118, p. 288-300, 2010. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.01.009.
- PLENNER, S.; EICHINGER, W. E.; BETTIS, E. A. Simple Terrestrial Laser Scanner for Measuring Streambank Retreat. Technical Note. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 142, 6.p, 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.
- PRAKASH, A.; VERMA, A.; KUMAR, A.; SINGH, P. K. Utility of terrestrial laser scanner in mining. Mining Mazma. **Conference Proceedings...** Bangalore: FIMI. 2019. p. 12-14.
- PRETI, F.; TAROLLI, P.; DANI, A.; CALLIGARO, S.; PROSDOCIMI, M. LiDAR derived high resolution topography: the next challenge for the analysis of terraces stability and vineyard soil erosion. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 44, n. 2s, p. 85-89, 2013. DOI: 10.4081/jae.2013.258.
- RAMOS, I.Q. **Levantamento de voçoroca com o uso do laser scan. Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.** Monografia (Graduação em Engenharia Florestal). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica: 2010. 34p.
- 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. de A. **Avaliação da trilha Sahy-Rubião no Parque Estadual Cunhambebe em Mangaratiba (RJ).** Monografia (Curso de Especialização em Análise Ambiental e Gestão do Território). Escola Nacional de Ciências Estatísticas – ENCE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Rio de Janeiro. 2016. 103p.
- RANGEL, L. de 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 (Online)**, v. 19, n. 2, p. 391-405, 2018. DOI: 10.20502/rbg.v19i2.1309.
- RODRIGUES, W. F.; MAIA, R. P.; GOMES, D. D. M. Condicionamento morfoestrutural do inselberg Pedra da Andorinha, Sertão Norte do Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia (Online)**, São Paulo, v. 20, n. 4, p. 861-876, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i4.1521.
- RUBIO, M. F. **Gênese e dinâmica de erosões em margens de reservatórios. Pesquisa & Desenvolvimento no estudo de caso nas UHEs Chavantes e Rosana (rio Paranapanema, SP/PR).** Tese (Doutorado em Geografia Física). Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014. 283p.
- SATO, A. M.; ABDALAD, M. de A.; SILVA, A. P. de A.; AVELAR, A. de S.; COELHO NETTO, A. L. Bacia experimental do rio Sesmarias (médio vale do rio Paraíba do Sul): influência do eucalipto nos processos hidrológicos e erosivos. II Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: Recuperação de Áreas Degradadas, Serviços Ambientais e Sustentabilidade. **Anais...** Taubaté: IPABHi. 2009. p. 415-422. ISSN 1982-1751.
- SCHEINGROSS, J. S.; LAMB, M. P. A mechanistic model of waterfall plunge pool erosion into bedrock. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 122, p. 2079-2104, 2017. DOI: 10.1002/2017JF004195.
- SHUKOR, S. A. A.; WONG, R.; RUSHFORTH, E.; BASAH, S. N.; ZAKARIA, A. 3D Terrestrial Laser Scanner for managing existing building. **Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)**, 76, 12, p. 133-139, 2015. DOI: 10.11113/jt.v76.5895.
- SILVA, G. T. A. **Voçorocas no Médio Paraíba: padrões de ocorrência e potenciais impactos.** Dissertação (Mestrado em Conservação da Natureza). Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2013. 79 p.
- SOLÉ-BENET, A.; AFANA, A.; CANTÓN, Y. (2012). Erosion pins, profile and laser scanners for soil erosion monitoring in active hillslopes in badlands of SE Spain. In GONZÁLEZ-DÍEZ, A. (coord.) **Avances de la Geomorfología en España 2010-2012.** PubliCan, Ediciones de la Universidad de Cantabria, Cantabria: p. 575-578.
- SPAIRANI-BERRIO, Y.; GÓMEZ, P. S.; HUESCA-TORTOSA, A.; BERRIO, S. S.; FUENTES, D. T. The usage of TLS and photogrammetry during the restoration process of Spanish National Monument. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, n. 2-W15, p. 1105-1110, 2019. DOI: 10.5194/isprs-archives-42ii-2-w15-1105-2019. DOI: 10.5194/

isprs-archives-XLII-2-W15-1105-2019.

TEDESCO, A. **Delimitação de Voçoroca com Imagens com Alta Resolução e ALS por Meio de Árvore de Decisão e Geobía**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós- Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba: 2015. 186p.

UAGODA, R.; AVELAR, A. de S.; COELHO NETTO, A. L. Depressões fechadas em relevo cárstico-quartzítico, bacia do ribeirão Santana, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 29 n. 2, p. 87-100, 2006. ISSN 0101-9759.

VACCA, G.; MISTRETTA, F.; STOCHINO, F.; DESSI, A. Terrestrial Laser Scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 41, B5, p. 453-460, 2016. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B5-453-2016.

VANDEKERCKHOVE, L.; POESEN, J.; OOSTWOUW WIJDENES, D.; GYSSELS, G. Short-term bank gully retreat rates in Mediterranean environments. **Catena**, 44, p. 133-161, 2001. DOI: 10.1016/S0341-8162(00)00152-1.

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.

ZEIDAN, Z.; BESHAR, A. A.; SHEHATA, A. G. Deformation monitoring of structural elements using Terrestrial Laser Scanner. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 10, n. 8, p. 1195-1218, 2019. ISSN 2229-5518.

URLs:

ANA: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 01 de junho de 2019.

Manual Leica Scanstation: <https://kb.sccsurvey.co.uk/download/138/leica-c5-c10/2194/leica-scanstation-c10-c5-user-manual.pdf>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2020.

DANTAS *et al.*, 2005. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/644>. Acesso em 28 de março de 2018.

INEA, 2015. Disponível em: http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter_dibap/documents/document/zwew/mte0/~edisp/inea0114643.pdf. Acesso em 30 de janeiro de 2018.

INSTITUTO TERRA, 2008. Disponível em: https://issuu.com/itpa/docs/estudo_para_cria_o_do_pe_cunhambebe_e_apa_alto_pi Acesso em 23 de maio de 2018.