34. USO DO LIDAR NA GEOMORFOLOGIA: APLICAÇÕES E DESAFIOS FUTUROS

João Paulo de Carvalho Araújo[1], Rafaela Soares Niemann[1], Francisco Dourado[2], Manoel do Couto Fernandes[1] & Nelson Ferreira Fernandes[1]

[1] Universidade Federal do Rio de Janeiro. Depto. de Geografia, Instituto de Geociências, UFRJ, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil; jpaulo_geo@hotmail.com; rafaelaniemann@gmail.com; manoel.fernandes@ufrj.br; nelsonff@acd.ufrj.br
[2] Universidade do Estado do Rio de Janeiro. E-mail: fdourado@uerj.br.

Resumo: Nas últimas décadas, novas tecnologias de sensoriamento remoto, como os sistemas de detecção e alcance da luz "*Light Detection and Ranging*" (LiDAR), revolucionaram nossa habilidade de obter dados terrestres e planetários e, consequentemente, impulsionaram as pesquisas geomorfológicas em diferentes ramos. Os sistemas de escaneamento aerotransportado por *laser* "*Airborne Laser Scanning*" (ALS) e de escaneamento terrestre por *laser* "*Terrestrial Laser Scanning*" (TLS) permitem obter informações do terreno com resolução espacial sub-métrica, mesmo em áreas montanhosas e cobertas por densa vegetação, lagos, rios e plataformas continentais. Os dados obtidos por estes sensores produzem mapas topográficos detalhados que revelam formas de rara visualização. Este trabalho faz uma breve revisão sobre o surgimento e evolução do sistema LiDAR no contexto das geociências, suas aplicações e potencialidades na Geomorfologia e apresenta alguns dos principais desafios futuros.
Palavras-Chave: Escaneamento Aerotransportado por Laser, Escaneamento Terrestre por Laser, Levantamentos Topográficos, Geomorfologia

Abstract: In the last decades, new remote sensing technologies, such as LiDAR (Light Detection and Ranging), have revolutionized our ability to obtain terrestrial and planetary data, and consequently boosted geomorphological research in several areas of concentration. The ALS (Airborne Laser Scanning) and TLS (Terrestrial Laser Scanning) acquisition systems allow obtaining terrain information with sub-metric spatial resolution, even in mountain areas covered by dense vegetation, lakes, rivers and continental platforms. The data obtained by these sensors are represented by detailed topographic maps that reveal morphologies of rare visualization. This work introduces a brief review of the emergence and evolution of LiDAR in the context of geosciences, its applications and potential in Geomorphology and presents some of the main future challenges.
Keywords: Airborne Laser Scanning, Terrestrial Laser Scanning, Topographic Surveying, Geomorphology

1. INTRODUÇÃO

A topografia exerce um controle fundamental sobre processos físicos que ocorrem na superfície terrestre. Ela atua sobre os movimentos de massa gravitacionais que removem e depositam materiais de uma encosta e governa o fluxo das águas sobre a superfície e em subsuperfície, assim como a maior parte dos processos erosivos. Na Geomorfologia, a representação topográfica se traduz em uma estratégia de síntese imprescindível que proporciona uma visão holística altamente elucidativa da realidade e permite o avanço do conhecimento em seus diferentes ramos. Entretanto, a escala de representação dos fatos geomorfológicos e a capacidade de realizar levantamentos topográficos de forma sistemática depende do método de aquisição dos dados da superfície.

Os primeiros geomorfólogos faziam uso de recursos técnicos simples, como croquis, inclinômetros, teodolitos, altímetros e fotografias para representar fatos e fenômenos geomorfológicos. Karl Gilbert (1843-1918), por exemplo, elaborou explicações para as espetaculares paisagens do oeste americano por meio de desenhos com grande riqueza de detalhes (GILBERT, 1877). Com o passar dos anos, as representações do relevo se tornaram cada vez mais sofisticadas. Nas últimas décadas, os aperfeiçoamentos computacionais (*hardware* e *software*) e novos sensores remotos imageadores, de radar e sonar, com melhoras nas suas resoluções espaciais, radiométricas e temporais, levaram ao aumento das informações sobre a superfície terrestre, proporcionando novas bases para o desenvolvimento de novas metodologias de análise dos fenômenos geomorfológicos (TAROLLI et al., 2009; TAROLLI, 2014).

Os dados altimétricos obtidos por diferentes tipos de sensores instrumentalizaram a Geomorfologia moderna com os chamados Modelos Digitais de Elevação (MDEs), que são representações matemáticas da distribuição espacial de uma superfície real. Os MDEs possibilitam uma melhor visualização e interpretação do relevo (ex: reconhecimento e mapeamento interativo); o reconhecimento automático e a quantificação geomorfológica (ex: extração de parâmetros morfométricos); a extração automática de redes de drenagem e reconhecimento de padrões de drenagem; e a extração das formas do relevo através de algoritmos semi-automatizados ou totalmente automatizados (EVANS et al., 2009).

A Missão Topográfica Radar *Shuttle* (*Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM) produziu o primeiro banco de dados topográfico com cobertura continental quase global, entre as latitudes 56°S e 60°N (JPL, 2020), com resolução entre 1 arco-segundo (~ 30m) e 3 arco-segundos (~ 90m). Estes MDEs favoreceram o desenvolvimento das pesquisas em Geomorfologia no Brasil, sendo de grande importância, principalmente, para as regiões carentes de mapas topográficos em escalas de semi-detalhe, como destacam Grohmann e Riccomini (2008). Outra importante iniciatva de democratização dos dados topográficos em todo o mundo se faz pelo site *OpenTopography*

(www.opentopography.org) (Crosby et al., 2020), que possui amplo catálogo de dados topográficos de diferentes fontes. Apesar da imensa contribuição no desevolvimento das pesquisas, estes MDEs globais, incluindo aqueles advindos de outras missões e satélites como o ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Model*), não são adequados para estudos de fenômenos que ocorrem em escala de detalhe e apresentam limitações ao representar relevos de elevado gradiente (YANG et al., 2011).

Segundo Kohler (2001), na Geomorfologia há sempre uma necessidade de adequação entre a escala cartográfica de representação e a escala do fenômeno representado. De acordo com o autor, quanto menor a escala espacial de um fenômeno geomorfológico, maior a influência dos processos endógenos e assim, mais regredimos na escala temporal. Em contrapartida, quanto maior a escala espacial de um fenômeno geomorfológico, maior a influência dos processos exógenos e mais nos aproximamos do tempo atual. Desta forma, para grande parte da pesquisa geomorfológica, há demanda de uma maior "aproximação cartográfica" dos processos que ocorrem na escala de uma bacia de drenagem, de uma encosta ou mesmo de poucos metros quadrados.

Levantamentos de maior detalhe exigem maior esforço de campo e equipamentos, como receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System* / sistema global de navegação por satélite) de portadoras com precisão satisfatória para a aplicação de técnicas DGPS (*Differential Global Position System* / sistema de posicionamento global em modo diferencial) e EDMs (*Electromagnetic Distance Measuring* / medidores eletrônicos de distância), como teodolitos modernos e estações totais. Contudo, estes equipamentos apresentam limitações, como taxas lentas de aquisição de dados, altos custo e restrições de alcance devido a dificuldades impostas pela topografia e pela vegetação (ROERING et al., 2013).

O LiDAR (*Light Detection And Ranging* / detecção e alcance da luz) surgiu, desta forma, como uma alternativa eficiente na obtenção de informações topográficas de detalhe, mesmo em superfícies montanhosas e densamente florestadas, aumentando bastante a capacidade de coleta de dados. Segundo Tarolli (2014), as características mais importantes desta tecnologia, em relação às tecnologias tradicionais, são a filtragem e classificação dos pontos do terreno e da vegetação e a geração de Modelos Digitais do Terreno (MDT) e Modelos Digitais da Superfície (MDS) com alta resolução espacial.

Este capítulo apresenta uma breve revisão que trata do surgimento e evolução dos sistemas de varredura *laser* terrestre e aerotransportado no contexto das geociências e, em especial, na Geomorfologia. Apresentaremos as principais aplicações do LiDAR dentro de algumas áreas de concentração da ciência geomorfológica, suas potencialidades e os desafios futuros. Não pretendemos esgotar todas as possibilidades de aplicações dentro desta ciência; antes, buscaremos dar destaque à algumas das abordagens mais consolidadas que são de grande interesse para as pesquisas realizadas no Brasil.

2. O SISTEMA LIDAR

A palavra *laser* é um acrônimo de (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* / amplificação da luz por emissão estimulada de radiação). Na década de 60, a agência do Governo Federal dos Estados Unidos "*National Aeronautics and Space Administration"* (NASA), utilizou *lasers* para realizar medidas de distância entre a Terra e refletores instalados na Lua pela missão Apollo (WENG, 2011). Ainda nos anos 60, dispositivos de medição de alta resolução, comumente conhecidos como *laser range finders* (detectores de distância a *laser*) ou *LAser Detection and Ranging* (detecção e alcance a *laser*) (LADAR) ou ainda *Light Detection and Ranging* (LiDAR), foram desenvolvidos para fins militares (BROOKER, 2009; PETRIE e TOTH, 2018). Posteriormente os *lasers* passaram a ser utilizados em aplicações civis, na engenharia e indústria (anos 70) e mais tarde, nos anos 80 e 90, se difundindo para as mais diferentes aplicações em sistemas ambientais, principalmente devido aos avanços computacionais e das tecnologias de georreferenciamento direto, em meados dos anos 90 (LARGE e GEORGE, 2009; PETRIE e TOTH, 2018).

Os sistemas de escaneamento a *laser* atuam com sensores ativos e operam segundo princípios similares ao sistema de RADAR (*Radio Detection and Ranging* / detecção e alcance por rádio). Entretanto, ao invés de usar ondas de rádio para localizar os objetos de interesse, o LiDAR utiliza os comprimentos de ondas mais curtas do espetro eletromagnético. Estes sistemas foram desenvolvidos inicialmente de duas formas, dependo da posição do sensor: i) sistemas operados em plataformas espaciais e sistemas aerotransportados, ou escaneamento aerotransportado por *laser* / *airborne laser scanning* (ALS), estes últimos operados a partir de aeronaves de asa fixa, helicópteros e drones, também denominados Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs); ii) sistemas de escaneamento terrestres, ou escaneamento terrestre por *laser* / *terrestrial laser scanning* (TLS), incluindo sistemas de varreduras estacionárias e varreduras móveis, em um veículo em movimento.

Levantamentos com ALS são normalmente realizados visando cobrir grandes áreas (> 1km²). A posição x, y e z de cada ponto obtido por ALS é gerada a partir dos componentes: i) um sensor *laser* que produz e emite pulsos *laser* ou *laser* em comprimento de onda contínua; ii) um Sistema Inercial de Navegação - *Inertial Navegation System* (INS); iii) um receptor GPS (*Global Position System*) que opera em uma plataforma aerotransportada e uma rede GPS que opera em terra de forma conjugada (Figura 1). Métricas do terreno, como elevação, altitude e as distâncias (*ranges*) do objeto em relação ao instrumento são calculadas a partir do registro do tempo entre emissão e a recepção do sinal *laser* refletidos de um alvo. Para mais informações de natureza técnica, consultar Wehr e Lohr (1999); Mallet e Bretar (2009); Vosselman e Maas (2010), entre outros.

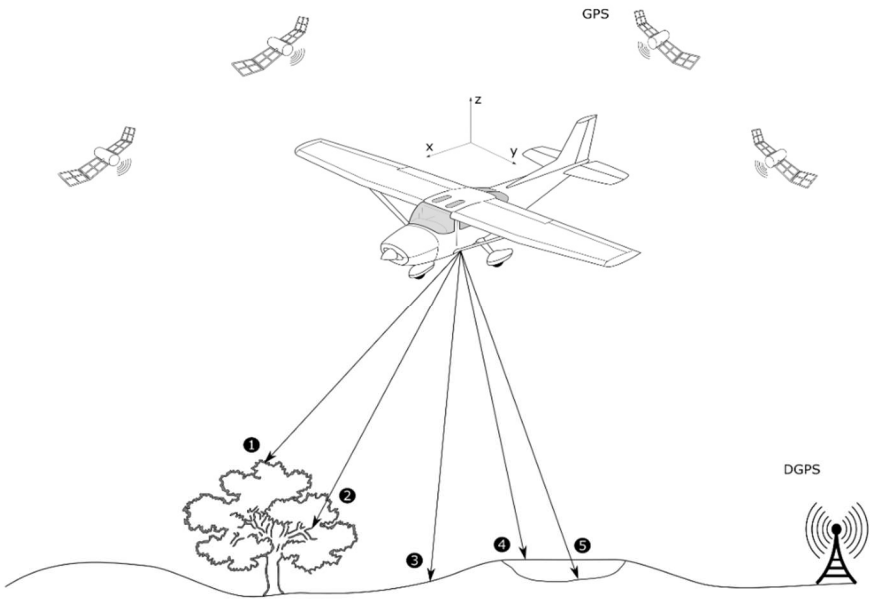

Figura 1. Princípios e componentes de um sistema ALS. 1 - primeiro retorno, copa da vegetação; 2 - segundo retorno, dossel da vegetação; 3 - primeiro retorno, terreno; 4 - primeiro retorno, espelho d'água; 5 - retorno do *laser* verde (aplicado em topobatimetria).

Os TLS surgiram posteriormente, na década de 90 e são uma evolução dos EDMs, e muito se beneficiaram da tecnologia desenvolvida pelos sistemas ALS (HERITAGE e LARGE, 2009; JABOYEDOFF, OPPIKOFER, ABELLÁN, et al., 2012). Diferentemente das varreduras ALS, estes equipamentos são operados a partir de uma base fixa, como por exemplo, um tripé - para fins de estudos em Geomorfologia, não consideraremos as varreduras terrestres sobre veículos em movimento. O sensor TLS emite um feixe *laser* que identifica o ângulo e distância dos objetos através de sua varredura regular e do tempo computado entre emissão e recepção do sinal (Figura 2). Para mais informações, consultar também Shan e Toth (2018).

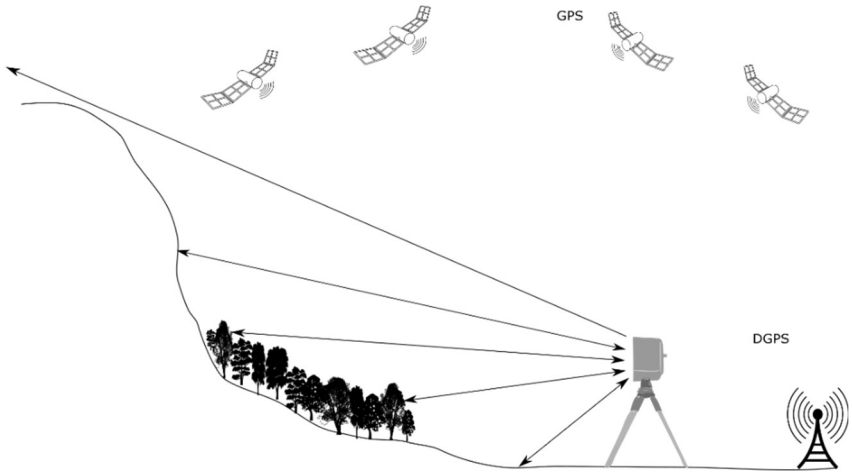

Figura 2. Princípios e componentes de um sistema TLS.

Levantamentos ALS tripulados são realizados, em sua grande maioria, por empresas privadas ou estatais devido às dificuldades técnicas e logísticas na operação dos equipamentos em aviões e helicópteros, à medida que os TLSs podem ser manipulados diretamente pelos geocientistas responsáveis pela investigação devido à sua operacionalização relativamente fácil e rápida (JABOYEDOFF et al., 2018). Levantamentos ALS podem gerar MDTs com resolução métrica à centimétrica e são mais eficazes para investigação de fenômenos geomorfológicos de maior magnitude e/ou maior alcance espacial. Vale destacar que, cada vez mais, sensores de varredura *laser* vem sendo operados embarcados em VANTs, o que facilita a aquisição de dados por operadores menos especializados.

Os TLSs podem gerar MDTs com resolução centimétrica à milimétrica, abarcam áreas muito menores e, portanto, são ideais para investigar os processos que ocorrem na escala de um único evento. A portabilidade dos TLSs torna possível a realização de repetidas leituras em um curto intervalo de tempo, ideal para trabalhos de monitoramento contínuo, como em alguns estudos de movimentos de massa, migrações de dunas, erosões costeiras, etc., e processos que demandam respostas imediatas, como aqueles relacionados a riscos naturais. Todavia, apesar da resolução espaço/temporal do TLS ser mais detalhada, a qualidade do resultado depende de uma boa perspectiva do equipamento e do alcance do sensor (JABOYEDOFF et al., 2018).

3. O LIDAR NAS GEOCIÊNCIAS: SURGIMENTO E APERFEIÇOAMENTO

Os primeiros testes utilizando sensores *laser* aerotransportados para obtenção de informações da superfície da terra foram realizados na década de 60 (MILLER, 1965; SHEPHERD, 1965). Já no ano de 1979, um sistema escaneamento *laser* aerotransportado foi utilizado pela NASA e pelo corpo de engenharia das forças armadas dos Estados Unidos no mapeamento topográficos de perfis transversais em uma bacia hidrográfica florestada, localizada próximo a Memphis, no estado do Tennessee (KRABILL et al., 1984). No início dos anos 90 a técnica foi utilizada em um dos primeiros trabalhos nas geociências, também conduzido pela NASA, em lavantamento que visava avaliar mudanças topográficas das camadas de gelo na Groenlândia (KRABILL et al., 1995; KRABILL et al., 1999; KRABILL et al., 2002).

No final da década de 90, os equipamentos utilizados em levantamentos *laser* se tornaram comercialmente mais acessíveis, compactos, leves e eficientes, apesar dos altos preços e da necessidade de mão de obra altamente capacitada para operá-los (SLATTON et al., 2007). Com o passar dos anos, melhoramentos tecnológicos permitiram que um número maior de pontos *laser* alcançasse a superfície do terreno. Com o avanço na capacidade de representação topográfica em mais de duas ordens de magnitude, feições como cicatrizes de escorregamentos, voçorocas, ravinas, leito de canais fluviais, pequenos afloramentos rochosos, entre outros, passaram a ser identificados e mapeados,

aumentando consideravelmente o número de trabalhos publicados (DERRON e JABOYEDOFF, 2010; ROERING et al., 2013).

A crescente produção de trabalhos que fazem uso de MDTs LiDAR nas geociências ampliam nossa compreensão dos processos físicos que modelam a superfície terrestre e suas diversas aplicações foram objeto de revisões bibliográficas que podem ser consultadas em Roering et al. (2013); Tarolli (2014); Telling et al. (2017); Okyay et al. (2019). O assunto também vem sendo abordado em livros que tratam do tema de forma técnica e/ou por meio de estudos de caso, como em "*Laser Scanning for the Environmental Sciences*" (HERITAGE et al., 2009), "*Airborne and Terrestrial Laser Scanning*" (VOSSELMAN e MAAS, 2010), "*LiDAR Remote Sensing and Applications*" (DONG e CHEN, 2018), entre outros (NEFF, 2018; SHAN e TOTH, 2018).

4. APLICAÇÕES DO LIDAR NA GEOMORFOLOGIA

As pesquisas em Geomorfologia utilizando LiDAR avançam a passos largos em resposta à maior acessibilidade aos dados e ao constante aperfeiçoamento tecnológico dos sensores. Neste item apresentaremos alguns exemplos de aplicações que demonstram como o LiDAR vem alavancando as pesquisas em algumas áreas de concentração da Geomorfologia.

Pesquisas relacionadas a movimentos de massa estão entre aquelas que mais se beneficiam dos avanços trazidos pelos sistemas de escaneamento a *laser* nos últimos anos, como demonstram os trabalhos de revisão de Guzzetti et al. (2012); Jaboyedoff, Oppikofer, Abellan, et al. (2012); Jaboyedoff et al. (2018); Jaboyedoff e Derron (2020). Vale ressaltar também a publicação do livro "*Laser scanning applications in landslide assessment*" (PRADHAN, 2017), que traz diferentes estudos de caso sobre o tema. Dentre as aplicações mais importantes, destacaremos: i) a identificação e mapeamento (manual, automático e semiautomático) das cicatrizes dos escorregamentos, das corridas de detritos e das descontinuidades das estruturas rochosas; ii) datação de escorregamentos; iii) monitoramento e caracterização multitemporal dos movimentos de massa.

De acordo com Guzzetti et al. (2012) a qualidade de um inventário de escorregamentos depende da sua acurácia e da assertividade das informações que aparecem no mapa. Tradicionalmente, fotografias aéreas, curvas de nível (obtidas por diversos tipos de sensores) e expedições de campo são utilizados para identificar cicatrizes e produzir os inventários de movimentos de massa. Entretanto, as bases topográficas obtidas por levantamentos tradicionais não são suficientemente detalhadas para extrair formas da superfície do terreno que indicam a ocorrência de movimentos de massa em áreas florestadas. Ardizzone et al. (2007) compararam um inventário de escorregamentos multi-temporal produzido por aerolevantamento e mapeamentos de campo com um mapeamento realizado sobre um MDT (ALS) na região central da Itália. O inventário obtido a partir do MDT LiDAR mostrou um aumento de 27% no número de escorregamentos e redução de 39% da área das cicatrizes mapeadas. Além de identificar um número maior de cicatrizes, os MDTs produzidos por varredura *laser* também

permitem distinguir as feições topográficas originadas por movimentos de massa, como a superfície de ruptura, as escarpas internas, zonas de transporte, zonas de deposição ou mesmo geometrias complexas (BURNS e MADIN, 2009; GUZZETTI et al., 2012; VAN DEN EECKHAUT et al., 2012; ARAÚJO et al., 2019). Estas informações auxiliam na interpretação das tipologias dos movimentos de massa e subsidiam discussões importantes para melhor compreensão dos seus mecanismos de deflagração. Vale destacar também que a correta identificação e delimitação das cicatrizes de escorregamentos é fundamental para a validação dos modelos de estabilidade de base física, assim como para a calibração e validação dos modelos estatísticos, sem a qual a qualidade dos resultados pode ser questionada.

A maior parte dos trabalhos de mapeamento e inventariamento de movimentos de massa em áreas florestada utiliza sistema de varredura *laser* aerotransportado (RAZAK et al., 2011; GUZZETTI et al., 2012; CHIGIRA et al., 2013; ARAÚJO et al., 2019; GÖRÜM, 2019; PÁNEK et al., 2019; ARAÚJO et al., 2021). Este tipo de varredura permite identificar movimentos de massa recentes, mas também cicatrizes e assinaturas topográficas de instabilidades muito antigas, como nos trabalhos de Schulz (2007); Van Den Eeckhaut et al. (2007); Mackey et al. (2011). Chigira et al. (2013) apresentam um bom exemplo de como estes MDTs podem ser utilizados na identificação de feições topográficas que podem indicar instabilidades. A área de estudo dos autores foi atingida por um tufão que deflagrou aproximadamente 70 grandes escorregamentos, causando fatalidades no Japão. Um exame detalhado sobre um MDT LiDAR, obtido antes do evento, revelou que nos locais onde 10 destes escorregamentos ocorreram haviam deformações gravitacionais, como pequenas escarpas e depressões lineares, posteriormente reativadas.

Já Araújo (2018); Araújo et al. (2019) utilizaram um MDT (ALS) para identificar as superfícies de ruptura (cicatrizes) e de erosão/transporte de centenas de escorregamentos, produzidos por diferentes eventos de precipitação, em duas bacias hidrográficas densamente florestadas na cidade do Rio de Janeiro. O inventário de escorregamentos permitiu inferir a superfície topográfica pré-ruptura (MDT pré-ruptura), utilizada para computar estatisticamente e deterministicamente mapas de susceptibilidade a escorregamentos translacionais. A razão entre o MDT pré-ruptura e MDT pós-ruptura permitiu calcular o volume do material mobilizado por estes escorregamentos (Figura 3), em grande parte transportado por duas corridas de detritos que causaram grandes prejuízos na região afetada.

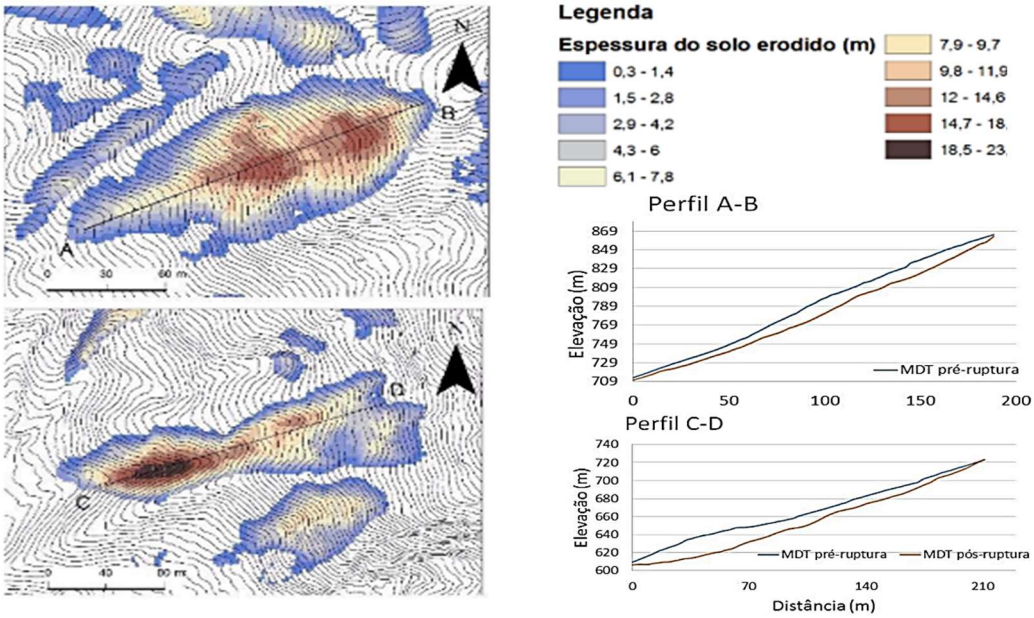

Figura 3. Diferença entre as elevações das superfícies pré-ruptura e pós-ruptura medida nas feições de escorregamento. Destaque para dois escorregamentos e seus respectivos perfis longitudinais A-B e C-D. O valor médio da espessura do solo erodido é de 3,7m e o volume do material mobilizado por todos os escorregamentos nas bacias dos rios Quitite e Papagaio é de 1.078.125 m³. Modificado de Araújo et al. (2019)

Mckean e Roering (2004) foram, provavelmente, os primeiros autores a utilizarem uma abordagem automatizada de detecção de escorregamentos por meio da determinação dos padrões espaciais da rugosidade do terreno em um MDT LiDAR. Já Van Den Eeckhaut et al. (2012) utilizaram análise orientada ao objeto para mapear escorregamentos de forma semiautomática, a partir de mapas derivados de um MDT LiDAR, como curvatura, ângulo de encosta e rugosidade. Outras abordagens utilizando diferentes técnicas para detecção automática e semiautomática de movimentos de massa podem ser consultadas em Glenn et al. (2006); Ardizzone et al. (2007); Booth et al. (2009); Berti et al. (2013); Palenzuela et al. (2015); Syzdykbayev et al. (2020).

Entretanto, as cicatrizes de escorregamento tendem a se suavizar com o tempo. Métodos de datação absoluta são utilizados para estabelecer uma relação entre as "diferentes rugosidades" das feições de escorregamento e sua idade. Lahusen et al. (2016), dataram escorregamentos por radiocarbono para calibrar uma função rugosidade/idade que prediz como a rugosidade de depósitos de escorregamentos se suavizam com o tempo. Semelhantemente, Cerovski-Darriau et al. (2014) utilizaram a técnica de termocrologia para definir uma relação entre rugosidade e idade para demonstrar a importância dos escorregamentos na evolução do relevo em sua área de estudo, estimar o volume de material erodido e quantificar como a erosão varia com o

tempo. Já Petschko et al. (2014) estimaram a idade relativa dos escorregamentos segundo índices geomorfológicos obtidos de um MDT (ALS) e imagens de ortofotos. Os autores destacam que na modelagem estatística, algumas variáveis explicativas dos escorregamentos observadas atualmente podem ter sido diferentes no passado, como o uso e cobertura, induzindo o operador do modelo ao erro quando cicatrizes de diferentes idades são agrupadas.

O LiDAR também vem sendo empregado no monitoramento e caracterização multi-temporal de escorregamentos e rastejos. O monitoramento do deslocamento de uma encosta normalmente é feito utilizando DGPS, estações totais e inclinômetros, em pontos específicos da encosta. Com o advento dos sistemas de varredura *laser* terrestre, tornou-se possível entender o deslocamento de toda a seção da encosta, e não somente em alguns poucos pontos específicos. Neste sentido, repetidas varreduras com TLS vem demonstrando excelentes resultados em estudos de monitoramento e, consequentemente, na compreensão dos principais mecanismos de falha dos movimentos de massa (TRAVELLETTI et al., 2008; BALDO et al., 2009; JABOYEDOFF et al., 2009; BARBARELLA et al., 2013). Travelletti et al. (2008) realizaram um experimento de chuva controlada a fim de compreender a cinemática de um escorregamento de lama (*mudslide*) em uma parcela de 120 m². O experimento de chuva foi conduzido durante quatro dias consecutivos e foi monitorado diariamente por três sensores TLS e 31 piezômetros instalados em diferentes profundidades. Desta forma, foi possível medir o deslocamento médio (velocidade), a direção e o mergulho do escorregamento na parcela de estudo.

Estudos sobre corridas de detritos também fazem uso de sensores LiDAR para a identificação e caracterização dos padrões espaciais das áreas fonte e de propagação das corridas de detritos (BULL et al., 2010; VENTURA et al., 2011; BLASONE et al., 2014; PRADHAN e BAKAR, 2017; CUCCHIARO et al., 2019), assim como das zonas de deposição (STALEY et al., 2006). Ainda, MDTs LiDAR viabilizam uma maneira fácil de quantificar os volumes de deposição das corridas de detritos, como nos trabalhos de Bull et al. (2010); Bremer e Sass (2012). Uma das principais abordagens dentro desta temática se faz pela análise multi-temporal e da diferença entre MDTs (*DTMs of Difference* - *DoDs*) para, por exemplo, monitorar, quantificar mudanças morfológicas e estimar o balanço de sedimentos das corridas de detritos (BULL et al., 2010; VENTURA et al., 2011; BLASONE et al., 2014; CAVALLI et al., 2017; CUCCHIARO et al., 2019). Em estudo realizado por (CUCCHIARO et al., 2019), os autores utilizaram a análise multi-temporal e *DoDs* para compreender a dinâmica dos sedimentos das corridas de detritos em um canal de drenagem onde barragens de controle foram construídas. Os autores demonstraram que as barragens mais novas afetam a transferência de sedimentos, não somente no canal principal, mas também modificam a relação de conectividade encosta/canal, alterando as vias de sedimento na área de estudo.

Por fim, estudos relacionados aos processos gravitacionais de quedas de blocos, tombamentos, rolamentos e desplacamentos utilizam LiDAR em diferentes frentes de

pesquisa. A análise das descontinuidades, por exemplo, é essencial para a compreensão das estruturas das rochas e dos mecanismos responsáveis pela deflagração desses processos. Estas análises e medições são realizadas, tradicionalmente, em trabalhos de campo, através do uso de instrumentos como trenas, bussolas geológicas, GPS, altímetros, entre outros, e são feitas de forma pontual. Os *scanners* terrestres possuem ângulo de visada ideal para mapeamento de encostas íngremes e executam extensas coberturas remotas para realização de medidas indiretas, fornecendo uma descrição geométrica 3D acurada, mesmo em superfícies de afloramento parcialmente recobertas por vegetação (GIGLI e CASAGLI, 2011; ABELLAN et al., 2014; ASSALI et al., 2016) (Figura 4). Desta forma, os sistemas TLS possibilitam uma melhor compreensão geométrica das descontinuidades que podem afetar a estabilidade das encostas rochosas (FERRERO et al., 2009; GIGLI e CASAGLI, 2011; RIQUELME et al., 2014; ASSALI et al., 2016; RIQUELME et al., 2018) para, por exemplo, identificar e quantificar fraturas pretéritas que fornecem bases para o cálculo das taxas de erosão para melhor compreensão da evolução do relevo (GUERIN et al., 2020). Outra abordagem é a de monitoramento destes processos gravitacionais rápidos, assim como da trajetória dos materiais mobilizados. Esta abordagem de estudo utiliza múltiplas varreduras TLS para detecção das deformações indicativas de eventos futuros, identificação dos mecanismos de ruptura, cálculo das mudanças de volume, da relação de magnitude-frequência, entre outros (ABELLAN et al., 2010; STRUNDEN et al., 2015; LI et al., 2019).

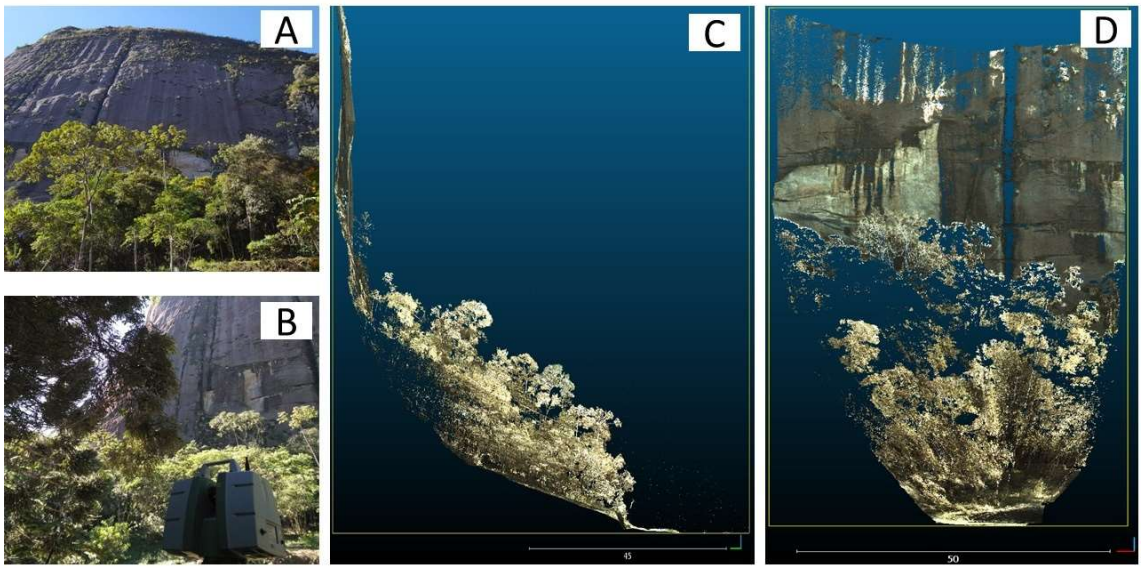

Figura 4. Varredura TLS para estudo de descontinuidades. A) Paredão rochoso localizado na Bacia do Rio Bonfim, em Petrópolis -RJ. B) Localização do sensor TLS em relação ao paredão. C) Nuvem de pontos adquiridas com TLS em perfil do paredão e talus deposicional e D) Nuven de pontos de dados adquiridos com sensor TLS de visada frontal ao paredão rochoso. Pesquisa em andamento realizada pelo Laboratório de Monitoramento e Modelagem Pedogeomorfológica (LAMPEGE), na UFRJ. Imagens de Rafaela Soares Niemann.

Já os estudos dos processos erosivos (erosão pluvial) utilizando LiDAR buscam, na maior parte, detectar mudanças na elevação do terreno a fim de definir taxas/padrões de erosão e/ou volume sem a necessidade, por exemplo, de coleta de sedimentos em parcelas experimentais ou caixas coletoras de sedimento. Os sistemas TLS vem sendo usados, principalmente em estudos de detalhe (erosão laminar e pequenos sulcos erosivos), em parcelas erosivas ou em pequenos recortes de bacias hidrográficas, para medir a rugosidade do terreno e sua influência nos processos erosivos (EITEL et al., 2011; VERICAT et al., 2014), ou estimar, por meio de álgebra de mapas ou modelagem matemática, as taxas/padrões de erosão através de MDTs obtidos de forma continuada (*multi-temporal high-resolution digital elevation models*) (VERICAT et al., 2014; NEUGIRG et al., 2016; YERMOLAEV et al., 2018; LI, LANGPING et al., 2020; LI, LI et al., 2020). Os sistemas TLS vem sendo utilizados também em estudos que visam quantificar os processos erosivos de paisagens afetadas por incêndios (RENGERS et al., 2016; DELONG et al., 2018), para definir padrões espaciais e temporais das erosões em taludes artificiais (LI, LANGPING et al., 2020), em depósitos estéril de mineração (NEUGIRG et al., 2015) e em encostas afetadas por eventos extremos, como os tufões (CHENG et al., 2019). Já os sistemas ALS vem sendo usados, principalmente, na detecção de grandes feições erosivas, como voçorocas (*gully*), como nos trabalhos de James et al. (2007); Evans e Lindsay (2010); Perroy et al. (2010); Baruch e Filin (2011).

Em trabalho realizado no Brasil, Loureiro et al. (2020) realizaram uma pesquisa experimental com o objetivo de apresentar as potencialidades e limitações dos VANTs (imageamento) e TLS no diagnóstico e monitoramento de erosão por voçoroca. Segundo os autores, ao realizar uma varredura *laser* terrestre são necessárias ao menos três posições dentro e fora da feição erosiva, além de repetidas leituras para comparações dos dados. Apesar do TLS oferecer grande detalhamento da morfologia interna de uma voçoroca, de suas paredes, bordas, piso etc., os autores destacam que o equipamento é altamente dependente das condições do terreno. O transporte do equipamento em solo encharcado e mesmo sua fixação e montagem, pode se tornar uma tarefa difícil e pouco segura. Neste sentido, um sensor LiDAR acoplado a um VANT seria capaz de fazer uma varredura no interior da voçoroca sem a necessidade da presença física do pesquisador.

Em Geomorfologia Costeira e Eólica, em paisagens resultantes de morfogênese marinha e em ambientes de dunas, os trabalhos utilizando LiDAR buscam, na maior parte, quantificar, sob uma perspectiva morfodinâmica, mudanças morfométricas e volumétricas que ocorrem devido a processos erosivos e de movimentos de massa (WOOLARD e COLBY, 2002; WALKER et al., 2013; ANDRIOLO et al., 2018; RUESSINK et al., 2018) e devido à eventos extremos, como furacões e tempestades (HOUSER et al., 2015; PYE e BLOTT, 2016; SPLINTER et al., 2018; JOHNSON et al., 2020). Neste sentido, Le Mauff et al. (2018) apresentam um indicador de mobilidade da linha costeira, computado a partir de uma base de dados LiDAR. Yousef et al. (2013) utilizaram uma combinação de fotografias aéreas e LiDAR para determinar morfologias subaquática relacionadas ao transporte natural de sedimentos. Obu et al. (2017) utilizaram

MDTs LiDAR para estudar os processos erosivos de área costeira com *permafrost*, no Canadá. Segundo os mesmos autores, esses processos erosivos podem mobilizar grandes quantidades de sedimentos com carbono orgânico antigo e alterar os ciclos biogeoquímicos das zonas costeiras.

Em um trabalho realizado no Brasil, no estado de Santa Catarina, Grohmann et al. (2020) utilizaram *Structure from Motion-Multi View Stereo* (SfM-MVS) para obter um MDT de alta resolução em estudo sobre taxa de migração de dunas costeiras. O MDT SfM-MVS gerado pelos autores teve sua acurácia altimétrica validada com dados TLS. As superfícies produzidas pelos MDTs apresentaram grande semelhança, porém o MDT TLS exibiu superfície mais suavizada, com cristas de dunas bem marcadas enquanto que o MDT SfM-MVS apresentou uma rugosidade em pequena escala, que pode dificultar a identificação visual de algumas informações da superfície do terreno. Segundo os autores, esta rugosidade pode ser um problema se o objetivo da pesquisa for a classificação de formas de relevo com base em parâmetros morfométricos, como a identificação de cristas de dunas com base na curvatura da superfície. Por outro lado, os autores destacam que levantamentos TLS possuem um custo intermediário, quando comparados com levamentos ALS e SfM-MVS, e exigem mais trabalho de campo e de processamento, a medida que o SfM-MVS se apresenta como uma solução de baixo custo, com resultados rápidos e confiáveis para modelagem 3D e monitoramento contínuo de dunas costeiras.

Os mapeamentos em Geomorfologia Fluvial são realizados, tradicionalmente, por meio de trabalhos de campo, apoiados por fotografias aéreas, imagens de satélites e MDEs. Os trabalhos de campo podem enfrentar grandes limitações devido às dificuldades de acesso em campo, presença de vegetação e limitada resolução espacial da base de dados. Já os MDEs, obtidos por métodos tradicionais, são usados na extração automatizada da rede de drenagem, dos canais localizados nas cabeceiras de drenagem (ordem zero) e na identificação de rupturas de drenagem. Para além dos trabalhos de mapeamento, estes MDEs permitem modelar os fluxos de água e sedimentos em bacias hidrográficas, realizar análises de migração de divisores de drenagem ao longo do tempo, entre outros objetivos.

Com o surgimento de nova geração de MDTs LiDAR, a maior parte obtidos de forma aerotransportada, tornou-se possível representar, de modo mais preciso, as formas do terreno que caracterizam as zonas de convergência e divergência de drenagem e outras derivações do MDT, como ângulo da encosta, direção de fluxo e a área de contribuição; importantes para a extração automatizada da rede de drenagem. Diferentes abordagens metodológicas vem sendo aplicadas para a obtenção destas informações, em bacias hidrográficas de relevo montanhoso (VIANELLO et al., 2009; PASSALACQUA et al., 2010; PIROTTI e TAROLLI, 2010; BARBOSA e AVELAR, 2015), relevo suave (LIU e ZHANG, 2011; PERSENDT e GOMEZ, 2016) e mesmo em áreas cuja rede de drenagem foi construída/modificada pelo homem, como por exemplo, para a detecção de valas antropogênicas em áreas agrícolas e de pastagem (ROELENS et al., 2018). As varreduras *laser* aerotransportadas também apoiam o mapeamento e caracterização morfológica das

planícies de inundação, dos canais de drenagem e dos seus leitos (JONES et al., 2007; CAVALLI et al., 2008; NOTEBAERT et al., 2009; TREVISANI et al., 2009), assim como os terraços fluviais (DEL VAL et al., 2015; HUGHES et al., 2015).

No trabalho de Barbosa e Avelar (2015), realizado no Brasil, na cidade do Rio de Janeiro, a rede de drenagem foi definida a partir de várias combinações entre valores calculados para uma área de contribuição mínima (%) e um índice de posição topográfico. Apesar dos bons resultados, os autores destacam que, em razão da resolução detalhada do MDT LiDAR, erros podem surgir devido à presença de estradas, aterros e afloramentos rochosos, demandando ajustes de campo com DGPS e fotointerpretação. Já Trevisani et al. (2009) realizaram uma caracterização morfológica do leito do rio Cordon (Alpes Italianos), através de índices morfométricos computados de um MDT LiDAR e análises geoestatísticas. Os resultados demonstraram a capacidade do MDT LiDAR em reconhecer padrões fluviais marcantes no terreno, como cascatas em leito rochoso e corredeiras com degraus, em detrimento de outras morfologias menos marcantes, como pequenas depressões em degraus ao longo do perfil do canal e pequenas cascatas.

Os sistemas de varredura *laser* terrestre também vem sendo usados na resolução de problemas em Geomorfologia Fluvial, mesmo que de forma menos sistemática. As principais vantagens desses sistemas são: i) sua resolução subcentimétrica, que possibilita, por exemplo, a captura da geometria de seixos individuais e ii) sua portabilidade, que permite quantificar a evolução espacial dos canais de drenagem. Lague (2020) explora o potencial destes sistemas com exemplos de aquisições de dados e métodos de processamento. Segundo o autor, as principais aplicações apresentam as seguintes abordagens: i) medição e distribuição do tamanho de grãos de forma automatizada, por exemplo, em pesquisas que exploram a relação entre o tamanho do grão, o atrito hidráulico e a geometria do canal; ii) transporte de sedimentos, com abordagem morfodinâmica; iii) monitoramento da erosão da margem dos canais para, por exemplo, estimar o balanço de sedimentos; iv) cálculo da taxa de erosão em rios de leito rochoso; v) digitalização da vegetação ribeirinha para, por exemplo, estimar o atrito hidráulico gerado pela vegetação e explorar a relação entre manchas de vegetação e a disposição de sedimentos. Para mais exemplos, consultar também Oguchi et al. (2013).

Por fim, Lague e Feldmann (2020) destacam as vantagens trazidas por novos sensores LiDAR para levantamento batimétrico (*airborne lidar topo-bathymetry* - ALTB) em Geomorfologia Fluvial. Os autores apresentam as principais aplicações desses sensores, qual sejam: i) análise 3D das geometrias dos canais em múltiplas escalas para caracterização, por exemplo, de unidades geomorfológicas, definição de seção transversal, perfil longitudinal, etc.; ii) acoplagem de modelos de hidrológicos (2D) com dados topo-batimétricos fluviais (3D) para, por exemplo, estimar a velocidade de fluxo, calcular a profundidade das águas e medir as tensões de cisalhamento relacionadas ao transporte de carga de fundo, erosão da margem do canal, mobilidade de rochas, etc.; iii) e análise morfodinâmica do canal para medição dos padrões de erosão e sedimentação dos rios através de leituras repetidas.

5. DESAFIOS FUTUROS

Para ser uma ciência completa das formas e das paisagens a Geomorfologia não deve se limitar geograficamente às porções terrestres (BAKER, 2008). Segundo o autor, alçar-se para além da Terra, em busca de informações sobre corpos extraterrestres, tem sido uma empreitada que avança na fronteira do conhecimento geomorfológico. Métodos de captura indireta para obtenção de informações topográficas utilizando *laser* vem sendo usados nessa empreitada, a exemplo do primeiro mapeamento topográfico global da Lua, na missão *Clementine* (SMITH et al., 1997) e pelos sistemas *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA), em Marte (SMITH et al., 2001), *Mercury Laser Altimeter* (MLA), em Mercúrio (CAVANAUGH et al., 2007) e *Lunar Orbiter Laser Altimeter* (LOLA), na Lua (SMITH et al., 2010).

As aplicações do MOLA em Geomorfologia Planetária contemplam, por exemplo, estudos sobre a morfologia de paleo-depósitos deltaicos (FAWDON et al., 2018; BRAMBLE et al., 2019), o mapeamento de sistemas de falhas e detecção de atividades tectônicas (LEFORT et al., 2015; SENTHIL KUMAR et al., 2019), processos hidrológicos e de transporte de sedimentos em bacias hidrográficas (NICHOLSON et al., 2013), identificação de domínios geomorfológicos e seus processos de formação (DIOT et al., 2014), mapeamento e dinâmica dos movimentos de massa (BRUNETTI et al., 2014; MAZZANTI et al., 2016; SENTHIL KUMAR et al., 2019), entre outros que podem ser consultados no livro "*Martian Geomorphology*" (BALME et al., 2011) e em Sun (2018).

Segundo Telling et al. (2017), algumas mudanças em relação à tecnologia TLS são esperadas e irão impactar as ciências da terra, como: i) varreduras autônomas repetidas para detecção de mudanças no terreno sem a necessidade de visitas peródicas do operador. Esta autonomia remota ajudará a contar uma história mais uniforme consistente do fenômeno estudado; ii) aumento do alcance da varredura *laser*; iii) fusão da nuvem de pontos com fotografias digitais e imagens hiperespectrais. A fusão destas tecnologias ajudará não só na representação 3D do fenômeno estudado, mas na discriminação das propriedades dos materiais da cena.

Ackermann (1999) acredita que a precisão absoluta dos sistemas de varredura *laser* aerotransportado ainda será aumentada, permitindo, por exemplo que voos mais altos cubram áreas ainda maiores. O autor também vislumbra a possibilidade de fusão dos dados geométricos obtidos pelo sensor *laser* aerotransportados com imagens multiespectrais, aumentando grandemente as aplicações em sensoriamento remoto.

Entretanto, segundo Jaboyedoff, et al. (2012), o verdadeiro desafio está relacionado ao desenvolvimento de novos métodos que permitam extrair o máximo de benefícios dos MDTs obtidos por LiDAR. De acordo com os autores, embora, grandes avanços tenham sido alcançados do ponto de vista geométrico (*e.g.,* área de volume), a maior parte dos modelos conceituais ainda permanecem presos ao passado. Desta forma, para além dos ganhos de caráter técnico, novas tecnologias nos encorajam a observar e explorar o mundo sob uma nova ótica, mudando nossa percepção de como a terra se organiza e

funciona (ROERING et al., 2013). A tecnologia LiDAR apresenta uma perspectiva aprimorada de algo com o qual os geomorfologistas estão familiarizados, "a superfície da terra". Segundo os autores supracitados, a difusão dessa tecnologia teria o poder de mudar fundamentalmente nossas habilidades cognitivas, influenciando a maneira como percebemos a paisagem em campo e nos incentivando a revisitar e redefinir antigos procedimentos.

6. CONCLUSÕES

A Geomorfologia é a ciência que estuda as formas do relevo, sua gênese, composição e os processos responsáveis pelo seu modelado. As formas do relevo são a expressão espacial da superfície terrestre e sua representação instrumentaliza a ciência geomorfológica com dados valiosos para a pesquisa científica. Embora os levantamentos de campo ainda façam parte de uma importante rotina no trabalho dos geomorfologistas, as tecnologias remotas para a obtenção de dados, como aerofotogrametria, interferometria por radar de satélite, sensores remotos passivos embarcados em satélites, etc., aumentaram sobremaneira nosso conhecimento sobre a superfície terrestre.

O LiDAR surge como uma tecnologia que possibilita uma maior aproximação cartográfica dos fenômenos geomorfológicos que ocorrem em escala de detalhe. Levantamentos ALS são normalmente realizados para cobrir áreas maiores que 1km² e representam fenômenos de maior magnitude e/ou maior alcance espacial. Já os equipamentos TLS são mais portáteis e possuem resolução espacial centimétrica a milimétrica. São, portanto, ideias para a representação e monitoramento de fenômenos que demandam maior detalhamento e processos que exigem respostas imediatas, como aqueles associados a riscos naturais. Neste texto apresentamos algumas das principais aplicações destes sensores, quais sejam: i) no mapeamento interativo, automatizado ou semi-automatizado dos fatos geomorfológicos, mesmo em áreas de elevado gradiente e/ou densamente florestadas (*e.g.,* cicatrizes de movimentos de massa e demais assinaturas gravitacionais, feições erosivas, descontinuidades geológicas e classes de relevo que compõe mapas geomorfológicos em escala de detalhe); ii) na extração automatizada da rede de drenagem e reconhecimento de diferentes padrões de drenagem; iii) no monitoramento e na quantificação volumétrica e morfométrica de processos gravitacionais, erosivos (pluviais e eólicos) e fluviais, em ambientes continentais e costeiros; iv) e em levantamentos batimétricos, em ambientes fluviais e marinhos, com finalidades variadas.

Ainda que o custo relativo dos equipamentos de varredura *laser* e a contratação de levantamentos para a obtenção de dados topográficos de detalhe sejam altos, os avanços tecnológicos e o aumento das demandas vêm tornando estes equipamentos mais portáteis, eficientes e acessíveis. Iniciativas de democratização dos dados topográficos LiDAR, como o por exemplo, pelo site *OpenTopography,* também tornam estas informações mais acessíveis e proporcionam grande oportunidade para o desenvolvimento da pesquisa geomorfológica. Por fim, destacamos que estes avanços tecnológicos devem estimular o

desenvolvimento de novas abordagens metodológicas e de um novo olhar sobre as questões que interrogam a ciência geomorfológica. Este novo olhar enriquece as discussões teóricas, e este é o ponto mais importante, o avanço da ciência.

Referências Bibliográficas

ABELLAN, A. et al. Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. **Geomorphology,** v. 119, p. 162-171, 2010. ISSN 0169-555X.

ABELLAN, A. et al. Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. **Earth Surface Processes and Landforms,** v. 39, p. 80-97, 2014.

ACKERMANN, F. Airborne laser scanning: present status and future expectations. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,** v. 54, n. 2–3, p. 64-67, 7// 1999. ISSN 0924-2716.

ANDRIOLO, U.; ALMEIDA, L. P.; ALMAR, R. Coupling terrestrial LiDAR and video imagery to perform 3D intertidal beach topography. **Coastal Engineering,** v. 140, p. 232-239, 2018. ISSN 03783839.

ARAÚJO, J. P. C. **Reconstrução Topográfica e Previsão de Escorregamentos Translacionais Utilizando Modelos Estatísticos e Determinísticos de Susceptibilidade**. 2018. Tese (Doutorado). Departamento de Geografia (PPGG/UFRJ), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ).

ARAÚJO, J.P.C.; BARELLA, C. F.; FERNANDES, N. F. Modelagem da susceptibilidade de escorregamentos utilizando o método de pesos de evidência em uma região montanhosa de clima tropical. **Rev. Geociências UNESP,** v. 40, n. 1, p. 137-155, 2021. ISSN 1980-900X.

ARAÚJO, J.P.C.; GUIMARÃES, R. F.; FERNANDES, N. F. Reconstrução topográfica digital de áreas afetadas por movimentos de massa e cálculo do volume de material mobilizado In: PINHEIRO, L. D. S. e GORAYEB, A. (Ed.). **XVIII SBFA: Geografia fsica e as mudanças globais**. Fortaleza, CE: UFC, 2019. cap. Geotecnologias e Modelagem aplicada aos Estudos Ambientais, p.1-5. ISBN 978-85-7282-778-2.

ARDIZZONE, F. et al. Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.,** v. 7, n. 6, p. 637-650, 2007. ISSN 1684-9981.

ASSALI, P. et al. Solid images for geostructural mapping and key block modeling of rock discontinuities. **Computers & Geosciences,** v. 89, p. 21-31, 2016. ISSN 0098-3004..

BAKER, V. R. Planetary landscape systems: a limitless frontier. **Earth Surface Processes and Landforms,** v. 33, n. 9, p. 1341-1353, 2008.

BALDO, M. et al. LIDAR monitoring of mass wasting processes: The Radicofani landslide, Province of Siena, Central Italy. **Geomorphology,** v. 105, n. 3-4, p. 193-201, 2009. ISSN 0169555X.

BALME, M. R. et al., Eds. **Martian Geomorphology**. Geological Society Special Publications nº 356. London: The Geological Society, p.307, Geological Society Special Publications nº 356ed. 2011.

BARBARELLA, M.; FIANI, M.; LUGLI, A. Landslide monitoring using multitemporal terrestrial laser scanning for ground displacement analysis. **Geomatics, Natural Hazards and Risk,** v. 6, n. 5-7, p. 398-418, 2013. ISSN 1947-5705

BARBOSA, L. S.; AVELAR, A. S. **Channel network extracted from a LiDAR DTM in a mountainous forested basin, Tijuca's Massif, Rio de Janeiro, Brazil.** 27th International Cartographic Conference & 16th General Assembly. Rio de Janeiro, 2015.

BARUCH, A.; FILIN, S. Detection of gullies in roughly textured terrain using airborne laser scanning data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,** v. 66, n. 5, p. 564-578, 2011. ISSN 09242716.

BERTI, M.; CORSINI, A.; DAEHNE, A. Comparative analysis of surface roughness algorithms for the identification of active landslides. **Geomorphology,** v. 182, p. 1-18, 2013. ISSN 0169-555X.

BLASONE, G. et al. Monitoring sediment source areas in a debris-flow catchment using terrestrial laser scanning. **CATENA,** v. 123, p. 23-36, 2014. ISSN 0341-8162.

BOOTH, A. M.; ROERING, J. J.; PERRON, J. T. Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon. **Geomorphology,** v. 109, n. 3-4, p. 132-147, 2009. ISSN 0169555X.

BRAMBLE, M. S. et al. Testing the deltaic origin of fan deposits at Bradbury Crater, Mars. **Icarus,** v. 319, p. 363-366, 2019. ISSN 00191035.

BREMER, M.; SASS, O. Combining airborne and terrestrial laser scanning for quantifying erosion and deposition by a debris flow event. **Geomorphology,** v. 138, n. 1, p. 49-60, 2012. ISSN 0169-555X.

BROOKER, G. M. **Introduction to Sensors for Ranging and Imaging**. SciTech Publishing, 2009.

BROWN, R. A.; PASTERNACK, G. B. How to build a digital river. **Earth-Science Reviews,** v. 194, p. 283-305, 2019. ISSN 0012-8252.

BRUNETTI, M. T. et al. Analysis of a new geomorphological inventory of landslides in Valles Marineris, Mars. **Earth and Planetary Science Letters,** v. 405, p. 156-168, 2014. ISSN 0012821X.

BULL, J. M. et al. Assessing debris flows using LIDAR differencing: 18 May 2005 Matata event, New Zealand. **Geomorphology,** v. 124, n. 1, p. 75-84, 2010. ISSN 0169-555X.

BURNS, W. J.; MADIN, I. **Protocol for inventory mapping of landslide deposits from light detection and ranging (lidar) imagery.** Portland, OR. 2009

CAVALLI, M. et al. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models. **Geomorphology,** v. 291, p. 4-16, 2017. ISSN 0169-555X.

CAVALLI, M. et al. The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology. **CATENA,** v. 73, n. 3, p. 249-260, 2008. ISSN 0341-8162.

CAVANAUGH, J. F. et al. The Mercury Laser Altimeter Instrument for the MESSENGER Mission. v. 131, n. 1, p. 451-479, August 01 2007. ISSN 1572-9672.

CEROVSKI-DARRIAU, C. et al. Quantifying temporal variations in landslide-driven sediment production by reconstructing paleolandscapes using tephrochronology and lidar: Waipaoa River, New Zealand. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems,** v. 15, n. 11, p. 4117-4136, 2014. ISSN 1525-2027.

CHENG, Y.-C.; YANG, C.-J.; LIN, J.-C. Application for Terrestrial LiDAR on Mudstone Erosion Caused by Typhoons. **Remote Sensing,** v. 11, n. 20, 2019. ISSN 2072-4292.

CHIGIRA, M. et al. Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas. **Geomorphology,** v. 201, p. 479-493, 2013. ISSN 0169-555X.

CROSBY, C. J.; ARROWSMITH, J. R.; NANDIGAM, V. Chapter 11 - Zero to a trillion: Advancing Earth surface process studies with open access to high-resolution topography. In: TAROLLI, P. e MUDD, S. M. (Ed.). **Developments in Earth Surface Processes**: Elsevier, v.23, 2020. p.317-338. ISBN 0928-2025.

CUCCHIARO, S. et al. Multi-temporal analysis of the role of check dams in a debris-flow channel: Linking structural and functional connectivity. **Geomorphology,** v. 345, p. 106844, 2019. ISSN 0169-555X.

DEL VAL, M. et al. An automated method to extract fluvial terraces from LIDAR based high resolution Digital Elevation Models: The Oiartzun valley, a case study in the Cantabrian Margin. **Quaternary International,** v. 364, p. 35-43, 2015. ISSN 10406182.

DELONG, S. B. et al. Post-wildfire landscape change and erosional processes from repeat terrestrial lidar in a steep headwater catchment, Chiricahua Mountains, Arizona, USA. **Geomorphology,** v. 300, p. 13-30, 2018. ISSN 0169555X.

DERRON, M. H.; JABOYEDOFF, M. Preface "LIDAR and DEM techniques for landslides monitoring and characterization". **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.,** v. 10, n. 9, p. 1877-1879, 2010. ISSN 1684-9981.

DIOT, X. et al. The geomorphology and morphometry of the banded terrain in Hellas basin, Mars. **Planetary and Space Science,** v. 101, p. 118-134, 2014/10/15/ 2014. ISSN 0032-0633.

DONG, P.; CHEN, Q., Eds. **LiDAR Remote Sensing and Applications**. Remote Sensing Applications: CRC Press, p.200, Remote Sensing Applicationsed. 2018.

EITEL, J. et al. Suitability of terrestrial laser scanning for studying surface roughness effects on concentrated flow erosion processes in rangelands. **CATENA,** v. 87, p. 398-407, 12/01 2011.

EVANS, I. S.; HENGL, T.; GORSEVSKI, P. Applications in Geomorphology. In: HENGL, T. e REUTER, H. I. (Ed.). **Geomorphometry: concepts, software, applications**: Elsevier, 2009. cap. 22, p.497-525.

EVANS, M.; LINDSAY, J. High resolution quantification of gully erosion in upland peatlands at the landscape scale. **Earth Surface Processes and Landforms,** v. 35, n. 8, p. 876-886, 2010. ISSN 1096-9837.

FAWDON, P. et al. The Hypanis Valles delta: The last highstand of a sea on early Mars? **Earth and Planetary Science Letters,** v. 500, p. 225-241, 2018. ISSN 0012-821X.

FERRERO, A. M. et al. Advanced Geostructural Survey Methods Applied to Rock Mass Characterization. **Rock Mechanics and Rock Engineering,** v. 42, n. 4, p. 631-665, 2009. ISSN 1434-453X.

GIGLI, G.; CASAGLI, N. Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,** v. 48, n. 2, p. 187-198, 2011. ISSN 1365-1609.

GILBERT, G. K. **Report on the Geology of the Henry Mountains**. Washington, D. C., p.212. 1877

GLENN, N. F. et al. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. **Geomorphology,** v. 73, n. 1-2, p. 131-148, 2006.

GÖRÜM, T. Landslide recognition and mapping in a mixed forest environment from airborne LiDAR data. **Engineering Geology,** v. 258, p. 105155, 2019. ISSN 0013-7952.

GROHMANN, C. H. et al. Dune migration and volume change from airborne LiDAR, terrestrial LiDAR and Structure from Motion-Multi View Stereo. **Computers & Geosciences,** v. 143, p. 104569, 2020. ISSN 0098-3004.

GROHMANN, C. H.; RICCOMINI, C. Aplicações dos modelo de elevação SRTM em geomorfologia. **Rev. Geogr. Acadêmica,** v. 2, n. 2, p. 73-83, 2008. ISSN 1678-7226.

GUERIN, A. et al. Quantifying 40 years of rockfall activity in Yosemite Valley with historical Structure-from-Motion photogrammetry and terrestrial laser scanning. **Geomorphology,** v. 356, p. 107069, 2020. ISSN 0169-555X.

GUZZETTI, F. et al. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. **Earth-Science Reviews,** v. 112, n. 1–2, p. 42-66, 2012. ISSN 0012-8252.

HERITAGE, G.; CHARLTON, M.; LARGE, A., Eds. **Laser scanning for the environmental sciences**: Wiley-Blackwell, p.278ed. 2009.

HERITAGE, G.; LARGE, A. R. G. Principles of 3D laser scanning. In: HERITAGE, G.;CHARLTON, M*., et al* (Ed.). **Laser scanning for the environmental sciences**: Wiley-Blackwell, 2009. p.278.

HOUSER, C. et al. Post-storm beach and dune recovery: Implications for barrier island resilience. **Geomorphology,** v. 234, p. 54-63, 2015. ISSN 0169555X.

HUGHES, K. et al. Alluvial terrace preservation in the Wet Tropics, northeast Queensland, Australia. **Geomorphology,** v. 248, p. 311-326, 2015. ISSN 0169555X.

JABOYEDOFF, M. et al. Mapping and Monitoring of Landslides Using LIDAR. In: (Ed.). **Natural Hazards: Earthquakes, Volcanoes, and Landslides**: CRC Press Taylor & Francis Group, 2018. p.397-420.

JABOYEDOFF, M. et al. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. **Natural Hazards,** v. 61, n. 1, p. 5-28, 2012. ISSN 0921-030X.

JABOYEDOFF, M. et al. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. **Natural Hazards,** v. 61, p. 5-28, 2012. ISSN 1106901096.

JABOYEDOFF, M. et al. Use of terrestrial laser scanning for the characterization of retrogressive landslides in sensitive clay and rotational landslides in river banks. **Canadian Geotechnical Journal,** v. 46, n. 12, p. 1379-1390, 2009.

JABOYEDOFF, M.; DERRON, M.-H. Landslide analysis using laser scanners. In: TAROLLI, P. e MUDD, S. M. (Ed.). **Remote Sensing of Geomorphology**: Elsevier, v.23, 2020. cap. 7, p.207-230. (Developments in Earth Surface Processes). ISBN 0928-2025.

JAMES, L. A.; WATSON, D. G.; HANSEN, W. F. Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA. **Catena,** v. 71, n. 1, p. 132-144, 2007. ISSN 03418162.

JOHNSON, C. L.; CHEN, Q.; OZDEMIR, C. E. Lidar time-series analysis of a rapidly transgressing low-lying mainland barrier (Caminada Headlands, Louisiana, USA). **Geomorphology,** v. 352, p. 106979, 2020. ISSN 0169-555X.

JONES, A. et al. High-resolution interpretative geomorphological mapping of river environments using airborne LiDAR data. **Earth Surface Processes and Landforms,** v. 32, p. 1574-1592, 09/01 2007.

JPL. Jet Propulsion Laboratory (JPL) - California Institute of Technology: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). 2020. Disponível em: < https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/ >. Acesso em: 27/10.

KOHLER, H. C. A Escala na Análise Geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia,** v. 2, n. 1, p. 13, 2001.

KRABILL, W. et al. Rapid Thinning of Parts of the Southern Greenland Ice Sheet. **Science,** v. 283, n. 5407, p. 1522-1524, 1999.

KRABILL, W. B. et al. Accuracy of airborne laser altimetry over the Greenland ice sheet. **International Journal of Remote Sensing,** v. 16, n. 7, p. 1211-1222, 1995. ISSN 0143-1161.

KRABILL, W. B. et al. Airborne Laser Topographic Mapping Results. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,** v. 50, n. 6, p. 685-694, 1984.

KRABILL, W. B. et al. Aircraft laser altimetry measurement of elevation changes of the greenland ice sheet: technique and accuracy assessment. **Journal of Geodynamics,** v. 34, n. 3, p. 357-376, 2002. ISSN 0264-3707.

LAGUE, D. Terrestrial laser scanner applied to fluvial geomorphology. In: TAROLLI, P. e MUDD, S. M. (Ed.). **Remote Sensing of Geomorphology**: Elsevier, v.23, 2020. cap. Chapter 8, p.231-254. (Developments in Earth Surface Processes). ISBN 0928-2025.

LAGUE, D.; FELDMANN, B. Topo-bathymetric airborne LiDAR for fluvial-geomorphology analysis. In: TAROLLI, P. e MUDD, S. M. (Ed.). **Remote Sensing of Geomorphology**: Elsevier, v.23, 2020. cap. Chapter 2, p.25-54. (Developments in Earth Surface Processes). ISBN 0928-2025.

LAHUSEN, S. R. et al. Surface roughness dating of long-runout landslides near Oso, Washington (USA), reveals persistent postglacial hillslope instability. **Geology,** v. 44, n. 2, p. 111-114, 2016. ISSN 0091-7613.

LARGE, A. R. G.; GEORGE, L. H. Laser Scanning: evolution of the discipline. In: HERITAGE, G.;CHARLTON, M., *et al* (Ed.). **Laser scanning for the environmental sciences**: Wiley-Blackwell, 2009. cap. 1, p.1-20.

LE MAUFF, B. et al. Coastal monitoring solutions of the geomorphological response of beach-dune systems using multi-temporal LiDAR datasets (Vendée coast, France). **Geomorphology,** v. 304, p. 121-140, 2018. ISSN 0169555X.

LEFORT, A. et al. Channel slope reversal near the Martian dichotomy boundary: Testing tectonic hypotheses. **Geomorphology,** v. 240, p. 121-136, 2015. ISSN 0169-555X.

LI, H.-B. et al. Quantitative assessment for the rockfall hazard in a post-earthquake high rock slope using terrestrial laser scanning. **Engineering Geology,** v. 248, p. 1-13, 2019/01/08/ 2019. ISSN 0013-7952.

LI, L. et al. Using terrestrial LiDAR to measure water erosion on stony plots under simulated rainfall. **Earth Surface Processes and Landforms,** v. 45, n. 2, p. 484-495, 2020. ISSN 0197-9337.

LI, L.; LAN, H.; PENG, J. Loess erosion patterns on a cut-slope revealed by LiDAR scanning. **Engineering Geology,** v. 268, p. 105516, 2020. ISSN 0013-7952.

LIU, X.; ZHANG, Z. Drainage network extraction using LiDAR-derived DEM in volcanic plains. **Area,** v. 43, n. 1, p. 42-52, 2011. ISSN 1475-4762.

LOUREIRO, H. A. S.; GUERRA, A. J. T.; ANDRADE, A. G. D. Contribuição ao estudo de voçorocas a partir de uso experimental de laser scanner terrestre e vant. **Revista Brasileira de Geomorfologia,** v. 21, n. 4, p. 871-892, 2020. ISSN 2236-5664.

MACKEY, B. H.; ROERING, J. J.; LAMB, M. P. Landslide-dammed paleolake perturbs marine sedimentation and drives genetic change in anadromous fish. **Proc Natl Acad Sci U S A,** v. 108, n. 47, p. 18905-9, Nov 22 2011. ISSN 1091-6490

MALLET, C.; BRETAR, F. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,** v. 64, n. 1, p. 1-16, 2009. ISSN 09242716.

MAZZANTI, P. et al. Inferring the high velocity of landslides in Valles Marineris on Mars from morphological analysis. **Earth, Planets and Space,** v. 68, n. 1, 2016. ISSN 1880-5981.

MCKEAN, J.; ROERING, J. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. **Geomorphology,** v. 57, n. 3-4, p. 331-351, 2004.

MILLER, B. Laser altimeter may aid photo mapping. **Aviat Week Space Technol,** v. 88, n. 13, p. 60–64, 1965. Disponível em: < http://archive.aviationweek.com/issue/19650329 >.

NEFF, T. **The laser that's changing the World: the amazing stories behind Lidar, from 3D mapping to self-driving cars**. Prometheus Books, 2018. ISBN 9781633884670.

NEUGIRG, F. et al. Erosion processes in calanchi in the Upper Orcia Valley, Southern Tuscany, Italy based on multitemporal high-resolution terrestrial LiDAR and UAV surveys. **Geomorphology,** v. 269, p. 8-22, 06/21 2016.

NEUGIRG, F. et al. Quantification, analysis and modelling of soil erosion on steep slopes using LiDAR and UAV photographs. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences,** v. 367, p. 51-58, 2015. ISSN 2199-899X.

NICHOLSON, B. G. et al. An assessment of the fluvial geomorphology of subcatchments in Parana Valles, Mars. **Geomorphology,** v. 183, p. 96-109, 2013. ISSN 0169-555X.

NOTEBAERT, B. et al. Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology. v. 34, n. 2, p. 217-231, 2009. ISSN 0197-9337.

OBU, J. et al. Coastal erosion and mass wasting along the Canadian Beaufort Sea based on annual airborne LiDAR elevation data. **Geomorphology,** v. 293, p. 331-346, 2017. ISSN 0169555X.

OGUCHI, T.; WASKLEWICZ, T.; HAYAKAWA, Y. S. Remote data in Fluvial Geomorphology: characteristics and applications. In: SHRODER, J. F. (Ed.). **Treatise on Geomorphology**. San Diego: Academic Press, 2013. cap. 9.35, p.711-729. ISBN 978-0-08-088522-3.

OKYAY, U. et al. Airborne lidar change detection: An overview of Earth sciences applications. **Earth-Science Reviews,** v. 198, p. 102929, 2019. ISSN 0012-8252.

PALENZUELA, J. A. et al. Landslide detection and inventory by integrating LiDAR data in a GIS environment. **Landslides,** v. 12, n. 6, p. 1035-1050, 2015. ISSN 1612-510X.

PÁNEK, T. et al. Large landslides and deep-seated gravitational slope deformations in the Czech Flysch Carpathians: New LiDAR-based inventory. **Geomorphology,** v. 346, p. 106852, 2019. ISSN 0169-555X.

PASSALACQUA, P. et al. A geometric framework for channel network extraction from lidar: Nonlinear diffusion and geodesic paths. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface,** v. 115, n. F1, p. F01002, 2010. ISSN 2156-2202.

PERROY, R. L. et al. Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California. **Geomorphology,** v. 118, n. 3-4, p. 288-300, 2010. ISSN 0169555X.

PERSENDT, F. C.; GOMEZ, C. Assessment of drainage network extractions in a low-relief area of the Cuvelai Basin (Namibia) from multiple sources: LiDAR, topographic maps, and digital aerial orthophotographs. **Geomorphology,** v. 260, p. 32-50, 2016. ISSN 0169-555X.

PETRIE, G.; TOTH, C. K. Introduction to laser ranging, profiling, and scanning. In: SHAN, J. e TOTH, C. K. (Ed.). **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing** 2ª: CRC Press 2018. cap. 1, p.1-28. ISBN 9781498772273.

PETSCHKO, H.; BELL, R.; GLADE, T. Relative Age Estimation at Landslide Mapping on LiDAR Derivatives: Revealing the Applicability of Land Cover Data in Statistical Susceptibility Modelling. In: (Ed.). **Landslide Science for a Safer Geoenvironment**, 2014. Chapter 53, p.337-343. ISBN 978-3-319-05049-2

PIROTTI, F.; TAROLLI, P. Suitability of LiDAR point density and derived landform curvature maps for channel network extraction. **Hydrological Processes,** v. 24, p. 1187-1197, 2010.

PRADHAN, B., Ed. **Laser scanning applications in landslide assessment**: Springer International Publishing, p.359ed. 2017.

PRADHAN, B.; BAKAR, S. B. A. Debris Flow Source Identification in Tropical Dense Forest Using Airborne Laser Scanning Data and Flow-R Model. In: PRADHAN, B. (Ed.). **Laser scanning applications in landslide assessment**: Springer International Publishing, 2017. cap. 5, p.85-112. ISBN 978-3-319-55342-9.

PYE, K.; BLOTT, S. J. Assessment of beach and dune erosion and accretion using LiDAR: Impact of the stormy 2013–14 winter and longer term trends on the Sefton Coast, UK. **Geomorphology,** v. 266, p. 146-167, 2016. ISSN 0169555X.

RAZAK, K. A. et al. Airborne laser scanning of forested landslides characterization: Terrain model quality and visualization. **Geomorphology,** v. 126, n. 1, p. 186-200, 2011. ISSN 0169-555X.

RENGERS, F. K. et al. Illuminating wildfire erosion and deposition patterns with repeat terrestrial lidar. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface,** v. 121, n. 3, p. 588-608, 2016. ISSN 21699003.

RIQUELME, A. et al. Automatic Mapping of Discontinuity Persistence on Rock Masses Using 3D Point Clouds. **Rock Mechanics and Rock Engineering,** v. 51, n. 10, p. 3005-3028, 2018. ISSN 1434-453X.

RIQUELME, A. J. et al. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. **Computers and Geosciences,** v. 68, p. 38-52, 2014.

ROELENS, J. et al. Drainage ditch extraction from airborne LiDAR point clouds. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,** v. 146, p. 409-420, 2018. ISSN 0924-2716.

ROERING, J. J. et al. 'You are HERE': Connecting the dots with airborne lidar for geomorphic fieldwork. **Geomorphology,** v. 200, p. 172-183, 2013. ISSN 0169555X.

RUESSINK, B. G. et al. Coastal dune dynamics in response to excavated foredune notches. **Aeolian Research,** v. 31, p. 3-17, 2018. ISSN 18759637.

SCHULZ, W. H. Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington. **Engineering Geology,** v. 89, n. 1-2, p. 67-87, 2007.

SENTHIL KUMAR, P. et al. Recent seismicity in Valles Marineris, Mars: Insights from young faults, landslides, boulder falls and possible mud volcanoes. **Earth and Planetary Science Letters,** v. 505, p. 51-64, 2019. ISSN 0012821X.

SHAN, J.; TOTH, C. K., Eds. **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**: CRC Press, p.637, 2ª ed. 2018.

SHEPHERD, E. C. Laser to watch height. **New Scientist** v. 26, n. 437, p. 33, 1965.

SLATTON, K. C. et al. Airborne Laser Swath Mapping: Achieving the resolution and accuracy required for geosurficial research. **Geophysical Research Letters,** v. 34, n. 23, p. n/a-n/a, 2007. ISSN 1944-8007.

SMITH, D. E. et al. Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars. v. 106, n. E10, p. 23689-23722, 2001.

SMITH, D. E. et al. The Lunar Orbiter Laser Altimeter Investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission. v. 150, n. 1, p. 209-241, January 01 2010. ISSN 1572-9672.

SMITH, D. E. et al. Topography of the Moon from the Clementine lidar. v. 102, n. E1, p. 1591-1611, 1997.

SPLINTER, K. D.; KEARNEY, E. T.; TURNER, I. L. Drivers of alongshore variable dune erosion during a storm event: Observations and modelling. **Coastal Engineering,** v. 131, p. 31-41, 2018. ISSN 0378-3839.

STALEY, D. M.; WASKLEWICZ, T. A.; BLASZCZYNSKI, J. S. Surficial patterns of debris flow deposition on alluvial fans in Death Valley, CA using airborne laser swath mapping data. **Geomorphology,** v. 74, n. 1, p. 152-163, 2006. ISSN 0169-555X.

STRUNDEN, J. et al. Spatial and temporal variations in rockfall determined from TLS measurements in a deglaciated valley, Switzerland. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface,** v. 120, n. 7, p. 1251-1273, 2015. ISSN 21699003.

SUN, X. 1.15 - Lidar Sensors From Space. In: LIANG, S. (Ed.). **Comprehensive Remote Sensing**. Oxford: Elsevier, 2018. p.412-434. ISBN 978-0-12-803221-3.

SYZDYKBAYEV, M.; KARIMI, B.; KARIMI, H. A. Persistent homology on LiDAR data to detect landslides. **Remote Sensing of Environment,** v. 246, p. 111816, 2020. ISSN 0034-4257.

TAROLLI, P. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. **Geomorphology,** v. 216, n. 0, p. 295-312, 7/1/ 2014. ISSN 0169-555X.

TAROLLI, P.; ARROWSMITH, J. R.; VIVONI, E. R. Understanding earth surface processes from remotely sensed digital terrain models. **Geomorphology,** v. 113, n. 1-2, p. 1-3, 2009. ISSN 0169555X.

TELLING, J. et al. Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. **Earth-Science Reviews,** v. 169, p. 35-68, 2017. ISSN 0012-8252.

TRAVELLETTI, J. et al. Monitoring landslide displacements during a controlled rain experiment using a long-range Terrestrial Laser Scanning (TLS). **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,** v. 37, 01/01 2008.

TREVISANI, S.; CAVALLI, M.; MARCHI, L. Reading the bed morphology of a mountain stream: A geomorphometric study on high-resolution topographic data. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions,** v. 14, 11/27 2009.

VAN DEN EECKHAUT, M. et al. Object-oriented identification of forested landslides with derivatives of single pulse LiDAR data. **Geomorphology,** v. 173, p. 30-42, 2012. ISSN 0169-555X.

VAN DEN EECKHAUT, M. et al. Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. **Earth Surface Processes and Landforms,** v. 32, n. 5, p. 754-769, 2007. ISSN 1096-9837.

VENTURA, G. et al. Tracking and evolution of complex active landslides by multi-temporal airborne LiDAR data: The Montaguto landslide (Southern Italy). **Remote Sensing of Environment,** v. 115, n. 12, p. 3237-3248, 2011. ISSN 00344257.

VERICAT, D.; SMITH, M. W.; BRASINGTON, J. Patterns of topographic change in sub-humid badlands determined by high resolution multi-temporal topographic surveys. **Catena,** v. 120, p. 164-176, 2014. ISSN 03418162.

VIANELLO, A.; CAVALLI, M.; TAROLLI, P. LiDAR-derived slopes for headwater channel network analysis. **CATENA,** v. 76, n. 2, p. 97-106, 2009. ISSN 0341-8162.

VOSSELMAN, G.; MAAS, H.-G., Eds. **Airborne and Terrestrial Laser Scanning**: CRC Press, p.318ed. 2010.

WALKER, I. J.; EAMER, J. B. R.; DARKE, I. B. Assessing significant geomorphic changes and effectiveness of dynamic restoration in a coastal dune ecosystem. **Geomorphology,** v. 199, p. 192-204, 2013. ISSN 0169555X.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning—an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,** v. 54, n. 2–3, p. 68-82, 7// 1999. ISSN 0924-2716.

WENG, Q., Ed. **Advances in environmental remote sensing: sensors, algorithms, and applications**. Remote Sensing Applications Series: CRC Press, Remote Sensing Applications Seriesed. 2011.

WOOLARD, J. W.; COLBY, J. D. Spatial characterization, resolution, and volumetric change of coastal dunes using airborne LIDAR: Cape Hatteras, North Carolina. **Geomorphology,** v. 48, n. 1-3, p. 269–287, 2002.

YANG, L.; MENG, X.; ZHANG, X. SRTM DEM and its application advances. **International Journal of Remote Sensing,** v. 32, n. 14, p. 3875-3896, 2011/07/20 2011. ISSN 0143-1161.

YERMOLAEV, O. P.; GAFUROV, A. M.; USMANOV, B. M. Evaluation of Erosion Intensity and Dynamics Using Terrestrial Laser Scanning. **Eurasian Soil Science,** v. 51, n. 7, p. 814-826, 2018. ISSN 1556-195X.

YOUSEF, F. et al. Using LiDAR to reconstruct the history of a coastal environment influenced by legacy mining. **Journal of Great Lakes Research,** v. 39, p. 205-216, 2013. ISSN 0380-1330.