

Considerações sobre o LiDAR na análise de instabilidade de vertentes

Considerations about LiDAR on slope instability assessment

Consideraciones sobre el LiDAR en análisis de inestabilidad de vertientes

Tiago D. Martins

<https://orcid.org/0000-0002-1213-1441>

td.martins@unifesp.br

Universidade Federal de São Paulo, UNIFESP, São Paulo, SP

Chisato Oka-Fiori

<http://lattes.cnpq.br/5447522894267625>

chisato@ufpr.br

Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR

Bianca Carvalho Vieira

<https://orcid.org/0000-0001-7060-2830>

biancav@usp.br

Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP

Carlos Bateira

<https://orcid.org/0000-0002-5039-6053>

carlosbateira@gmail.com

Riskam, CEG, ULisboa/FLUP/UP, Portugal

Resumo: Os modelos digitais de representação do relevo permitem a realização de diversos tipos de análises geomorfológicas, a exemplo de avaliações para indicar áreas sujeitas a processos de movimentos de massa. Dentre o conjunto de dados que possibilitam a elaboração de tais modelos, a tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) tem se destacado devido a sua capacidade em representar, com detalhes, certas características do relevo. Este trabalho teve como objetivos principais apresentar um conjunto de estudos que fizeram uso do LiDAR voltados para a análise de instabilidades de vertentes, e descrever um teste de interpolação da nuvem de pontos para a geração de um Modelo Digital de Terreno, a partir da combinação de diferentes procedimentos de interpolação em uma área afetada por escorregamentos rasos. Os resultados mostraram que a ferramenta empregada se mostrou eficiente, ao se adotar a combinação do *Natural Neighbor* com a Triangulação.

Palavras-chave: Modelo Digital de Terreno, Escorregamentos, Sensoriamento Remoto.

Abstract: The digital models of landform representation allow several types of geomorphological analysis, such as assessing prone areas to the mass movement. Among the data set that applied to elaborate such models, LiDAR (Light Detection and Ranging) technology has stood out due to its capacity to represent in detail terrain specific characteristics. This work aimed to present a variety of studies based on LiDAR to evaluate slope instability and to describe an interpolation test of LiDAR raw data to generate a Digital Terrain Model considering different interpolation approaches, in an area affected by shallow landslides. The results show that the tool applied is efficient when combined Triangulation to Natural Neighbor methods.

Keywords: Digital Terrain Model, Landslides, Remote Sensing.

Resumén: Los modelos digitales de elevación permiten la realización de diversos tipos de análisis geomorfológicos, como por ejemplo la evaluación para definir áreas susceptibles a procesos de remociones en masa. Entre el conjunto de datos que posibilitan la elaboración de tales modelos, la tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*) se ha destacado debido su capacidad en representar, en detalles, ciertas características del relieve. Este estudio tuvo como objetivos principales presentar un conjunto de investigaciones que hicieron uso del LiDAR aplicándolo para el análisis de inestabilidad de vertientes, y describir una prueba de interpolación de la nube de puntos para la generación de un Modelo Digital del Terreno, a partir de la combinación de distintos procedimientos de interpolación en un área afectada por deslizamientos superficiales. Los resultados muestran que dicha herramienta demostró eficiencia cuando aplicada en combinación del Natural Neighbor con Triangulación.

Palabras clave: Modelo Digital del Terreno, Deslizamiento, Detección Remota.

INTRODUÇÃO

Os modelos digitais capazes de representar o relevo permitem a realização de diversos estudos geomorfológicos, a exemplo de avaliação de áreas sujeitas a processos de movimentos de massa. Esses modelos podem derivar de diferentes técnicas e tecnologias, como as tradicionais curvas de nível, dados de radar e mesmo sistemas de varredura como o LiDAR (*Light Detection and Ranging*), que permite a elaboração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) com resolução suficiente para representar o relevo com mais detalhamento.

O LiDAR é um sensor remoto ativo que emite um feixe laser até um alvo, podendo este ser vertical ou horizontal. O princípio básico da operação se dá pela relação entre a emissão e o retorno do pulso laser, permitindo a geração de um conjunto de dados com informações tridimensionais. No caso dos dados de elevação, esses podem representar tanto os objetos sobre a superfície (Modelo Digital de Superfície - MDS), quanto exclusivamente o terreno (Modelos Digitais de Terreno - MDT). Uma das características mais marcantes dessa tecnologia são os diferentes níveis de retorno do sinal capazes de classificar informações variadas da superfície (Ackermann, 1996, Flood & Gutelius, 1997, Axelsson, 1999, Killian, Haala & Englich, 1996).

A variedade de dados derivados do LiDAR gerou uma série de trabalhos que investigaram o procedimento de filtragem dos níveis de sinal (Axelsson, 1999), a precisão e a acurácia (Becker & Centeno, 2013), a associação/qualidade com o levantamento aerofotogramétrico (Kersting, 2011), extração de parâmetros morfométricos (Ashraf, Zhao, Bourque & Meng, 2012) e ainda em investigações arqueológicas (Chase Chase, Fisher, Leisz & Weishampel, 2012).

Essa tecnologia é bastante utilizada em estudos geomorfológicos, como as investigações de movimentos de massa, demonstrando resultados positivos, por exemplo, na identificação de feições de eventos pretéritos e na elaboração de inventários (Schulz, 2004; Baum et al. 2005). Entretanto, um ponto recorrente na literatura refere-se à interpolação dos pontos para a criação de um dado de superfície contínua (*grid* regular). Liu (2008) destaca que a interpolação assume um caráter empírico não havendo um claro consenso para a definição de um único método, devido à variedade de dados, aos padrões do terreno e ao propósito do estudo. A escolha de um interpolador para esta operação tem sido tratada em diversos trabalhos, que destacam haver resultados positivos ou negativos a depender dos tipos de métodos empregados na análise do produto gerado (Barber & Shortridge, 2005; Botelho, Silva, Schoeninger & Centeno, 2005; Guo, Li, Yu & Alvarez, 2010; Pacheco, Centeno, Assunção & Botelho, 2011; Goulden, Hopkinson, Jamienson & Sterling, 2014).

Os estudos geomorfológicos de análise de instabilidade de vertentes utilizando modelos matemáticos em bases físicas e/ou os modelos estatísticos, possuem forte apoio na representação do relevo, seja para a obtenção de parâmetros morfométricos (ex.: declividade) ou para a definição do direcionamento de fluxo e a indicação de área de contribuição a montante. Deste modo, este trabalho teve como objetivos principais apresentar um conjunto de estudos que fizeram uso do LiDAR voltados para a análise de instabilidades de vertentes, e descrever um procedimento de interpolação da “nuvem” de pontos para a geração de um MDT, a partir da combinação de diferentes procedimentos de interpolação.

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MDT-LIDAR EM ANÁLISES DE INSTABILIDADE DE VERTENTES

A partir dos anos 2000 MDTs derivados do LIDAR passaram a ser empregados em estudos de movimentos de massa. Por exemplo, Schulz (2004) usou esse tipo de dado para mapear os escorregamentos junto à zona costeira de Seattle (EUA), comparando os resultados com mapeamentos anteriores. O autor identificou que a qualidade dos dados (um ponto/m²) permitiu a representação de feições com pelo menos 30 metros de extensão. Entretanto, destacou que as feições menores que 2 metros foram mais bem definidas a partir de ortofotos. Na mesma região, Baum et al. (2005) empregaram o LiDAR para desenvolver um banco de dados e mapear áreas potencialmente instáveis (ao longo do tempo), definindo limites críticos de precipitação pluvial para a sua deflagração. Os autores demonstraram que os dados LiDAR foram mais eficientes em áreas sob a vegetação mais densa, permitindo identificar terrenos instáveis mesmo com poucos dados geológicos e geotécnicos. Glenn, Streutker, Chadwick, Thackray e Dorsch (2006) também destacaram

similar potencial na diferenciação de componentes morfológicos no interior dos escorregamentos e na classificação de tipo de material mobilizado.

Schulz (2007), por sua vez, empregou a tecnologia para mapear vertentes afetadas por escorregamentos para elaborar um inventário e fazer uma comparação com mapeamentos anteriores. Segundo este autor, em relação a fotografias aéreas, o MDT-LiDAR permitiu uma melhor identificação de escorregamentos antigos e dos escorregamentos complexos. Não obstante, a qualidade dos dados foi inadequada para discernir limites de escorregamento recentes, ainda assim, foi possível mapear ao menos quatro vezes mais escorregamentos em relação os métodos tradicionais.

Ardizzone, Cardinali, Galli, Guzzetti e Reichenbach (2007) fizeram uso do LiDAR para a elaboração de um inventário de movimentos de massa na região da Umbria (Itália) e concluíram que os dados permitiram uma identificação mais precisa das feições quando comparado a mapas topográficos. Godt, Baum, Savage, Salciarini e Harp (2008) também se apoiaram nesse tipo de dado, como parâmetro topográfico, para inventariar escorregamentos no estado de Washington (EUA). Os autores compararam diferentes técnicas de obtenção de dados geotécnicos a serem utilizados em um modelo matemático, além de discutirem a influência da qualidade do MDT em mapeamentos preditivos. Ainda nos Estados Unidos, Highland e Bobrowsky (2008) produziram mapas em áreas com ocorrência de deslizamentos e consideraram que o LiDAR pode gerar mapas mais detalhados e com maior clareza, revelando também, em certos casos, evidências de deslizamentos pretéritos que se mostram atualmente cobertos pela vegetação.

Outros trabalhos também destacaram uma maior acurácia do LiDAR, como Guzzetti, Mondini, Cardinali, Fiorucci, Santangelo e Chang (2012), que ao rever as ferramentas para elaboração de inventários de escorregamentos, constataram a maior eficiência do LiDAR na identificação de feições como a curvatura e a rugosidade. Além disso, Razak, Santangelo, Van Westen, Straatsma e Jong (2013) apontaram uma maior acurácia no mapeamento e na elaboração de inventários, permitindo uma espacialização apurada das feições, mesmo em zona de floresta equatorial.

Ainda como contribuição do LiDAR em estudos geomorfológicos, Haugerud (2014) apresentou uma proposta preliminar de classificação cronológica de depósitos de escorregamentos no noroeste dos EUA. Por meio da análise da rugosidade do relevo, o autor identificou depósitos referentes a escorregamentos pretéritos, que serviram de base para posteriores investigações de cronologia dos eventos usando técnicas de datação (La Husen, Duvall, Booth & Montgomery, 2016).

Soma-se a esses exemplos a experiência do *Oregon Department of Geology and Mineral Industries* (Burns & Madin, 2009) e do *Pudget Sound LiDAR Consortium* (Harding & Berghoff, 2000; Haugerud, Harding, Johnson, Harless, Weaver & Sherrod, 2003; Schulz, 2005), que empregaram o LiDAR para o mapeamento e a elaboração de inventários voltados ao monitoramento de áreas potencialmente instáveis para fins de zoneamento territorial. E ainda a disponibilização gratuita dos dados LiDAR a partir do *3D Elevation Program* (United States Geological Survey [USGS], 2020).

No Brasil, Michel, Kobiyama e Goerl (2014) avaliaram o desempenho de dois modelos de indicação de áreas instáveis usando o LiDAR para geração de curvas de nível e

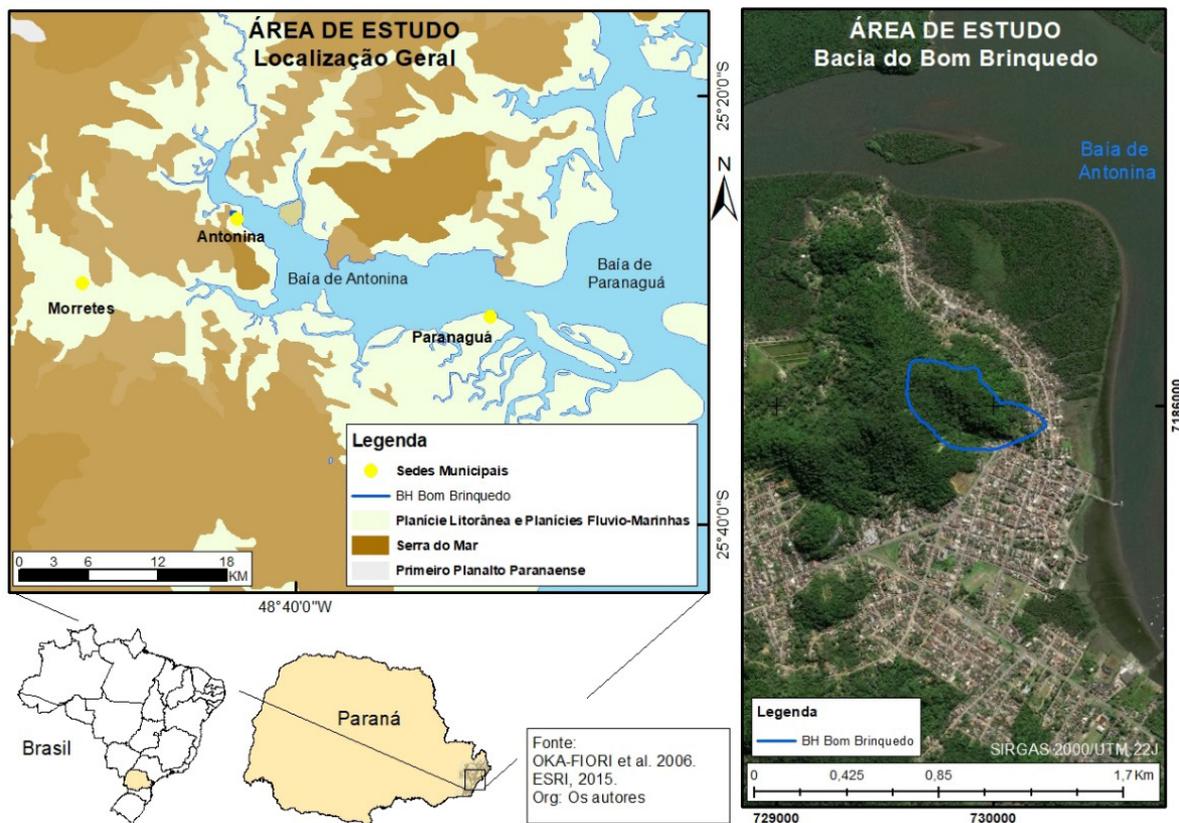
subsequente construção do MDT. Martins, Oka-Fiori, Vieira, Bateira e Montgomery (2017) avaliaram a resposta de um modelo instabilidade variando o parâmetro topográfico, entre um MDT-LiDAR e as tradicionais curvas-de-nível. Araújo, Guimarães e Fernandes (2019) aplicaram a tecnologia para a reconstrução topográfica de uma área afetada por escorregamentos, buscando estimar o volume do material mobilizado.

No que se refere à disponibilidade gratuita desses dados, destaca-se o *Programa Pernambuco Tridimensional¹* (PE3D), com a possibilidade de acessar tanto a nuvem de pontos quanto os produtos *raster* de vários municípios daquele estado e o portal GEOSAMPA², com a disponibilização de nuvem de pontos do município de São Paulo.

MATERIAIS E MÉTODO

Para realização do teste de interpolação dos dados LiDAR foi selecionada a Bacia Hidrográfica do Bom Brinquedo (BHBB), com 0,16km², localizada no setor norte do perímetro urbano do município de Antonina, PR (Fig. 1). A área foi afetada por diversos escorregamentos em março de 2013 (Minerais do Paraná S.A. [MINEROPAR], 2013; Soares, Picanço, Mesquita & Moraes, 2013).

Figura 1: Localização da área de estudo.



1 Disponível em <http://www.pe3d.pe.gov.br/>

2 GEOSAMPA. *Mapa Digital da Cidade de São Paulo*. 2020. Disponível em http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx

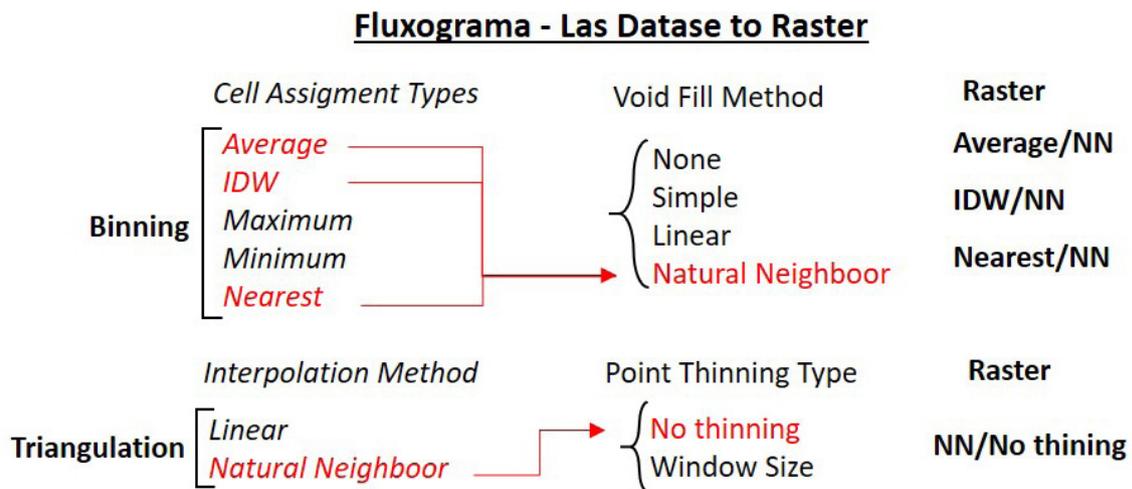
Os dados LiDAR foram obtidos juntamente com um levantamento aerofotogramétrico, para geração de ortofotos em escala 1:2.000, realizado em 30 de Abril de 2013, no qual foi usado o equipamento OPTECH 2050 (fabricado em 2000) com frequência de 50 kHz possibilitando uma densidade de 400.000 a 4.000.000 de pontos. Os parâmetros adotados para o aerolevanteamento foram: altura de voo de 1.600m e sobreposição de 20% entre as faixas do *laser*.

Sobre esse modelo de equipamento, Macedo, Santos e Soares (2013) identificaram um erro médio de 0,5 m para coordenadas x/y , e 0,21 m para altimetria (z), em uma varredura de uma área florestada com relevo ondulado. Estes foram considerados pelos autores como aceitáveis dentro do padrão cartográfico para a escala pretendida. Não obstante, Cruz et al. (2011), ainda em um estudo preliminar, defenderam que os erros contidos nos dados desse equipamento não atenderam ao padrão de exatidão cartográfica nível A para uma escala 1:2.000.

Para a elaboração do MDT-LiDAR foram utilizadas as ferramentas *LAS Dataset* e *LAS Dataset to raster*, disponíveis em ArcGIS 10.3. A primeira ferramenta (*LAS Dataset*) executa a manipulação e a filtragem da ‘nuvem de pontos’, permitindo uma seleção de dados referente apenas às informações do terreno. Esta operação se baseia na seleção da identidade de cada ponto, conforme uma classificação definida pela American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (2010). Dessa forma, a ferramenta seleciona automaticamente apenas os pontos correspondentes ao terreno (*ground*), separando-os daqueles que identificam o dossel florestal ou outros objetos sobre a superfície.

A segunda ferramenta (*LAS Dataset to raster*) (Fig. 2) permite a interpolação da ‘nuvem de pontos’ para a geração do dado *raster* a partir de duas técnicas: *binning* e *Triangulation*. O *binning* define o valor da célula (*pixel*) usando os pontos que ocorrem no interior da própria célula, sendo necessária a definição do tipo de atribuição para a célula (*Cell Assignment Type*) e o método de preenchimento de vazios (*Void Fill Method*) (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2015).

Figura 2: Fluxograma da operação *Las Dataset to Raster*, indicando em vermelho os quatro testes realizados neste trabalho (NN = *Natural Neighbor* e IDW= *Inverse Distance Weighted*).



O *Cell Assignment Type* define qual o valor do ponto LiDAR no interior da célula será considerado, variando em cinco opções, a saber:

- a) *Average*, que considera um valor médio de todos os pontos no interior de uma mesma célula para definir o valor da célula;
- b) *Minimum*, que define para toda a célula o menor valor encontrado nos pontos no interior da mesma célula;
- c) *Maximum*, que define para toda a célula o maior valor encontrado no interior da mesma célula;
- d) *IDW*, que usa a interpolação *Inverse Distance Weighted* para definir o valor de cada célula;
- e) *Nearest* que usa o método do *Nearest Neighbor* para determinar o valor da célula (ESRI, 2015).

Importante destacar que os métodos *Minimum* e *Maximum* não foram avaliados pois, entende-se, que são mais adequados na ausência de uma filtragem prévia da 'nuvem de pontos', sendo indicados para definir apenas os pontos com menor valor altimétrico (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2014, ESRI, 2015).

Na sequência define-se o *Void Fill Method* para as células que ocorrem com ausência de pontos, sendo considerados quatro operações:

- a) *None*, nenhum valor será adotado;
- b) *Simple*, define um valor baseado na média da célula imediatamente próxima;
- c) *Linear*, realiza uma triangulação por entre áreas vazias de pontos e usa triangulação linear para determinar o valor da célula;
- d) *Natural Neighbor*, que usa o método de interpolação homônimo para definir o valor da célula (ESRI, 2015).

No segundo método de interpolação, o *Triangulation (Triangulação de Delaunay)*, os valores das células são definidos com base no *Triangulated Irregular Network (TIN)*, associando dois métodos a) *Linear*, que usa o interpolador linear para determinar o valor da célula e; b) *Natural Neighbor*, que usa o interpolador homônimo (vizinho natural) para determinar o valor da célula. Esta opção permite, ainda, desconsiderar pontos externos a célula para agilizar o processamento por meio da ferramenta *Window Size Selection Methods* (ESRI, 2015); contudo, não foi aplicada na presente pesquisa.

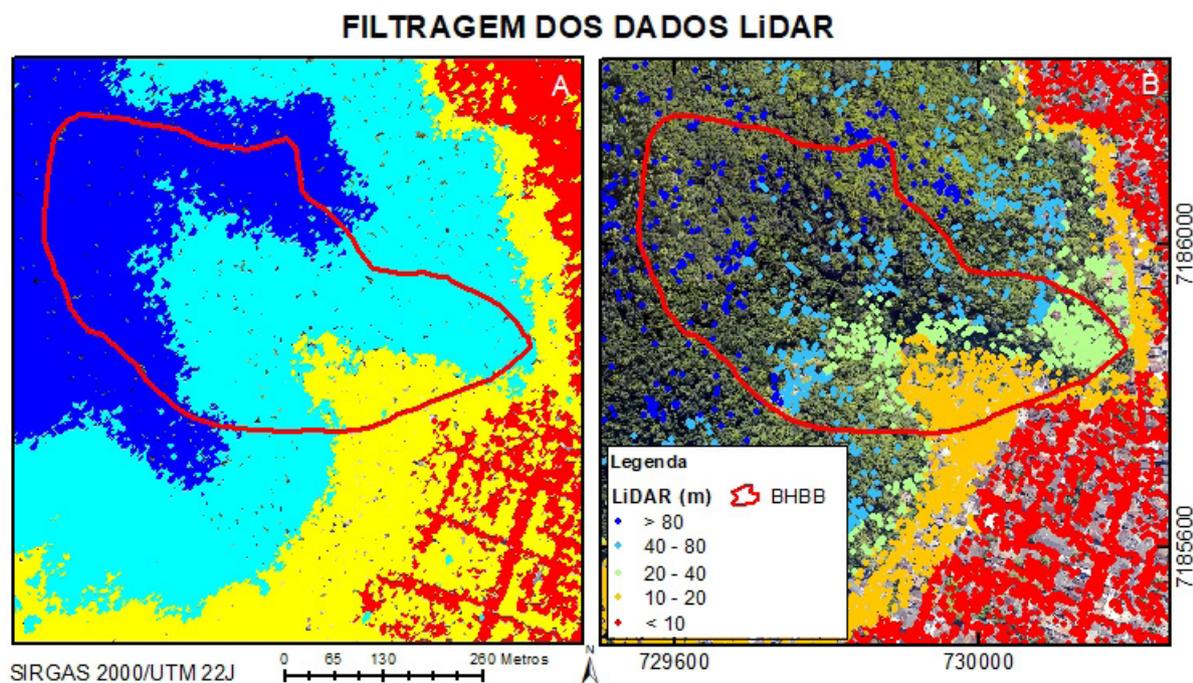
Em suma optou-se em considerar quatro combinações de procedimentos de interpolação (*binning/average/Natural Neighbor*; *binning/IDW/Natural Neighbor*; *binning/nearest/Natural Neighbor*; e *Triangulation/Natural Neighbor*), gerando-se quatro MDTs com resolução de 1 metro, que foram comparados entre si.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Filtragem dos pontos

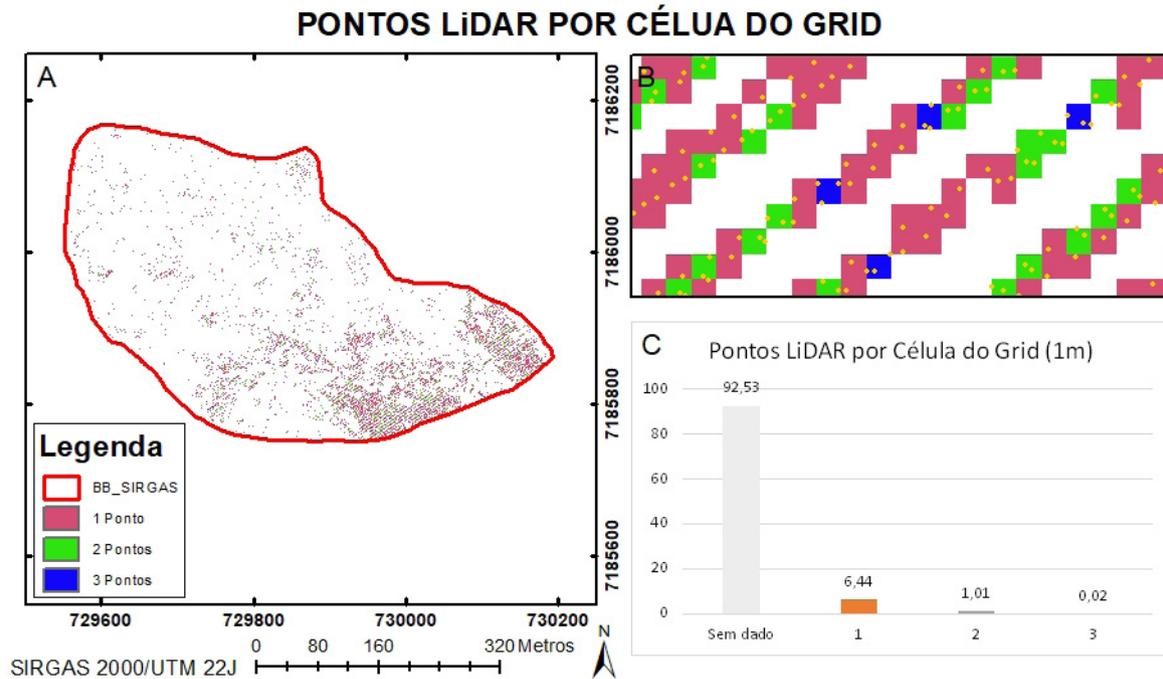
Foram registrados 126.741 pontos totais e 14.004 referentes apenas ao terreno, quantificando-se 0,08 pt/m² na bacia (Fig. 3). Esses valores são bastante distintos daqueles obtidos, por exemplo, por Quantum Spatial (2014) usando o modelo Leica ALS50 Phase II (altura de voo de 900 metros) da área afetada por escorregamento no estado de Washington (EUA). Nesse trabalho foram obtidos 13,80 pt/m² de pontos totais de 1,98 pt/m² no terreno com a filtragem. Em outro levantamento (Oregon/EUA) se obteve 1,26 pt/m² no terreno usando os modelos Leica ALS 50 e ALS 70 (WSI, 2013). É importante destacar que ambos os trabalhos definiram uma quantidade mínima de 8 pt/m² previamente ao levantamento. Esta intensidade, entretanto, foi alcançada com uma maior sobreposição de faixas de voo (50%) com o uso de equipamentos de maior intensidade do sinal (WSI, 2013; Quantum Spatial, 2014).

Figura 3: Resultado da operação de filtragem da ‘nuvem de pontos’ LiDAR, sobreposta à ortofotos da área da BHBB. A) antes da filtragem e B) depois da filtragem.



Para o caso da bacia aqui analisada, representada pelo *grid* de 1 metro (Fig. 4), nota-se que mais de 92% das células não possuem pontos LiDAR e apenas 6,44% possuem até um ponto, havendo ainda uma ocorrência mínima, próximo a 1%, de dois e três pontos por célula nos restante da área. A maior concentração ocorreu na área urbanizada seguida pelas áreas afetadas por escorregamentos (cicatrizes), onde houve a supressão da vegetação. Cabe notar que nas áreas florestadas, sobretudo nos trechos à montante, os pontos se dão de forma esparsa e irregular.

Figura 4: Distribuição dos pontos LiDAR para cada célula do *grid* (1m). A) Distribuição para a BHBB; B) Detalhe dos pontos por célula do *grid*; C) Percentual de distribuição.



Teste de Interpolação

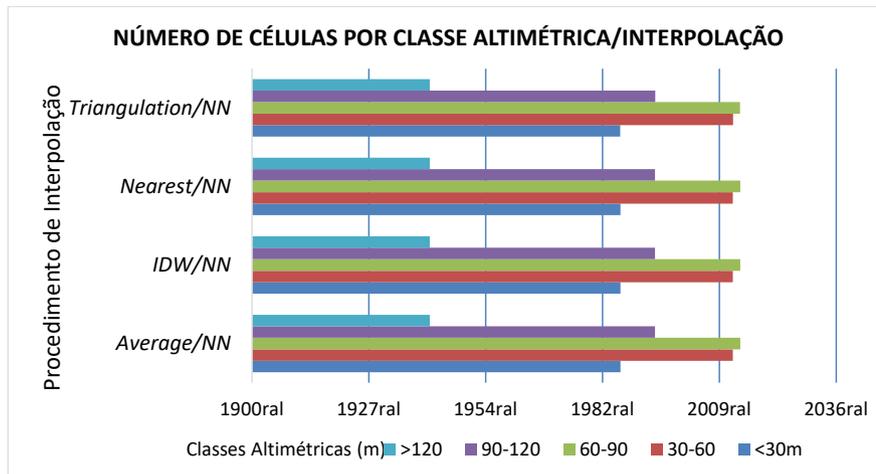
Os valores das quatro diferentes operações para a elaboração dos MDTs também foram semelhantes (Tab. 1), havendo uma diminuta variação na casa centesimal no que se refere ao valor mínimo das células. Isso também é *válido* para a distribuição de células em relação a variação altimétrica, tomando como base cinco classes com intervalos iguais de 30 metros (Fig. 5).

A diferença identificada foi no número de *sinks* (256), menor no procedimento que combinou a interpolação por *Natural Neighbor* por meio de triangulação (*Triangulation*). Esse mesmo procedimento também revelou o menor valor dentre os maiores valores das célula para bacia (153,78), porém o desvio padrão se manteve similar aos demais.

Tabela 1: Valores das células de cada MDT (NN = *Natural Neighbor* e IDW= *Inverse Distance Weighted*).

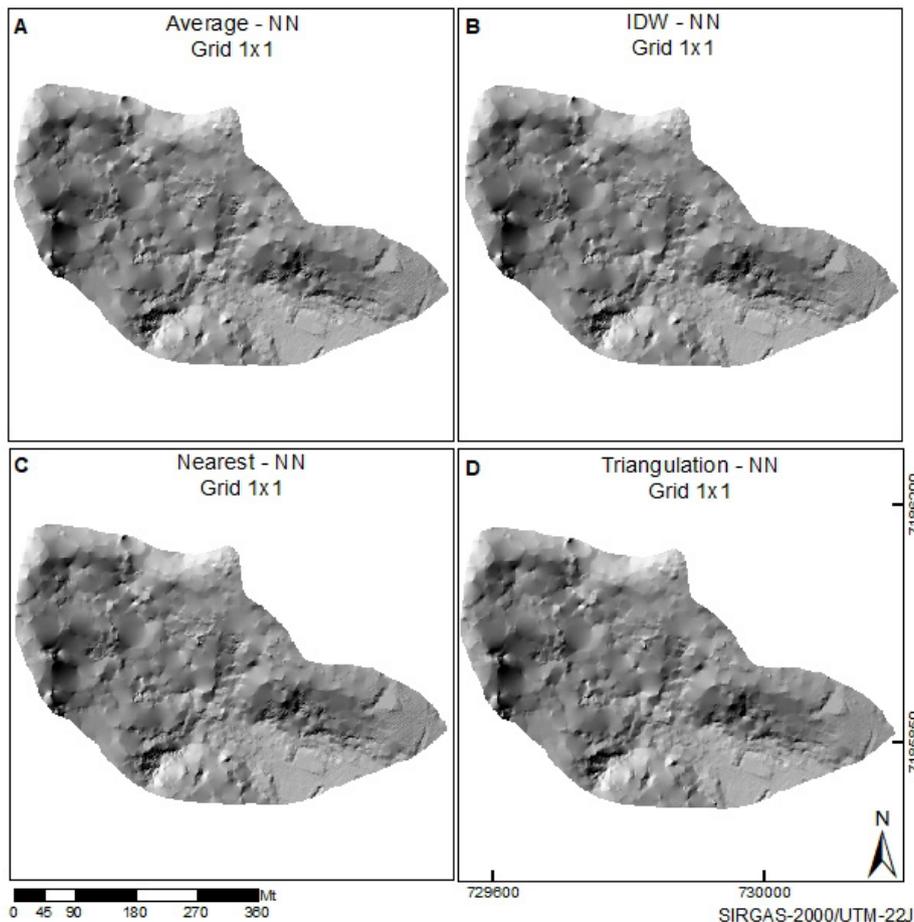
Operação	Total	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Sinks
Average/NN	164.181	154,16	8,76	67,88	36,59	584
IDW/NN	164.181	154,16	8,74	67,88	36,59	574
Nearest/NN	164.181	154,16	8,67	67,88	36,59	603
Triangulation/NN	164.181	153,78	8,94	67,89	36,59	256

Figura 5: Distribuição do número de células do *raster* para cinco classes altimétricas, considerando os quatro procedimentos de interpolação.



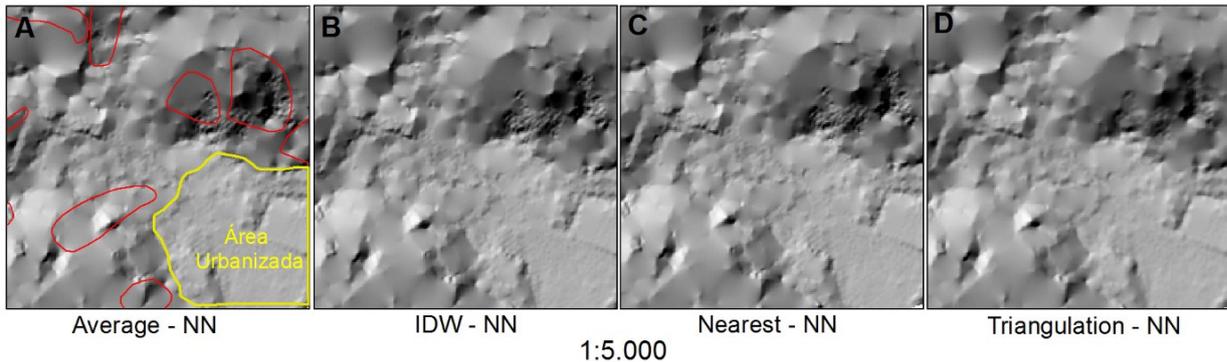
Barber e Shortridge (2005) também trataram da questão do número de *sinks* em um MDT-LiDAR com resolução de 6m, quando comparado a um MDT de 30m. Os autores realizaram análises hidrológicas em duas bacias hidrográficas, sendo que para uma delas o MDT-LiDAR identificou 624.568 *sinks*, enquanto para outra apenas 1.693 *sinks*.

Figura 6: Relevo sombreado da BHBB gerado a partir de um *raster* com *grid* de 1 metro por diferentes interpoladores, sendo: A) *Average/NN*; B) *IDW/NN*; C) *Nearest/NN* e D) *Triangulation/NN*.



Visualmente não há diferenças nas representações do relevo (Fig. 6). Quanto à ocorrência de maior concentração de pontos, sobretudo em área urbanizada, a superfície apresenta-se com maior continuidade e menos discrepâncias visuais do que àquelas onde houve um preenchimento maior de vazio entre os pontos, com destaque para as áreas com dossel florestal denso (Fig. 7).

Figura 7: Detalhe do relevo sombreado da BHBB para cada ferramenta/interpolador utilizada na elaboração do MDT-LiDAR, sendo: A) *Average/NN*, com destaque em vermelho para o perímetro de cicatrizes e em amarelo a área urbanizada; B) *IDW/NN*; C) *Nearest/NN* e D) *Triangulation/NN*.



A eficiência de MDTs provenientes de dados LiDAR tem sido tratada na literatura a partir de diferentes análises e os resultados variam conforme a quantidade de pontos e as características do terreno (Liu, 2008; Bater & Coops, 2009; Guo, Li, Yu & Alvarez, 2010; Chu, Wang, Huang, Lee, Liu & Lin (2014). Como já mencionado, o LiDAR apresenta vantagens na rapidez de coleta de dados, com destaque para qualidade de precisão dos pontos em relação aos valores em x, y e z (Becker & Centeno, 2013). Contudo, assim como demais produtos de sensores remotos, também apresenta limitações em aplicações específicas, como por exemplo em análises hidrológicas (Barber & Shortridge, 2005).

Liu (2008) aponta que um dos primeiros desafios impostos a sua utilização foi a operação de filtragem dos dados, separando pontos entre terreno e não terreno. Neste trabalho o autor traz uma revisão dos conhecimentos sobre diferentes métodos de filtragem adotados até então, como o filtro baseado na morfologia do terreno ou no gradiente de inclinação das feições, destacando as potencialidades e limitações para diferentes objetivos de análise.

Igualmente, é importante analisar os parâmetros para definir a eficiência do interpolador ou dimensão do *grid* diante do estudo pretendido. Na presente pesquisa, o número de *sinks* pode ser considerado um indicador de qualidade do MDT; assumindo que a utilização do método de Triangulação combinado com o interpolador NN trouxe um melhor resultado. Ainda é possível avaliar que a ferramenta aqui utilizada (*Las dataset to raster*) mostrou-se eficiente para aplicação deste interpolador, devido a sua disponibilidade em ambos os procedimentos.

Como fator limitante da aplicação do LiDAR neste trabalho, pode-se destacar a densidade de pontos referentes apenas ao terreno e, por consequência, a interpolação desses pontos em uma superfície contínua e precisa. Tal efeito, tende a refletir diretamente

na qualidade do *grid* e na resolução do *raster*, sendo possível inferir que a quantidade de pontos por m² da área da bacia é insuficiente para gerar um MDT com 1 metro de resolução espacial, pois não há uma distribuição homogênea dos pontos, uma vez que 92% de células não possuem ponto algum.

Cowen, Jensen, Hendrix, Hodgson e Schill (2000) trataram desse tema ao analisaram a interferência da densidade do dossel florestal na quantidade de pontos referentes ao terreno, estimando que entre 10% e 40% dos pulsos *laser* irão atingir a superfície do terreno em uma área com cobertura florestal entre 80% a 90%. Em suma, a densidade de pontos verificada no trabalho em tela diferiu em muito daqueles consultados, o que pode ser explicado pelos parâmetros de voo empregados e a potência do equipamento.

Por fim, pode-se deduzir uma outra potencial limitação do emprego do LiDAR referente a sua disponibilidade e, em havendo, os padrões empregados para seu levantamento. Conforme destacam Hopkinson, Masaki Hayashi e Peddle (2009) pode haver um maior benefício no emprego de dados convencionais para estudos em escalas de menor detalhe. Como explicitado anteriormente, no Brasil não há muitas experiências de disponibilização gratuita do LiDAR e mesmo as plataformas de livre acesso (PE3D e GEOSAMPA) não indicam quais os padrões adotados para o levantamento, o que, como visto, pode comprometer a densidade de pontos no terreno.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tecnologia LiDAR possui grande capacidade de obtenção remota de dados para a geração de Modelos Digitais de Terreno de alta resolução e não há dúvidas quanto ao seu potencial, em particular para estudos de movimentos de massa. A maior parte dos trabalhos consultados fez uso dessa tecnologia para a elaboração de inventários das feições dos movimentos de massa e, em menor medida, para a elaboração de MDTs a fim de testar suas eficiências frente a outros dados. Tais estudos permitem, portanto, a investigação detalhada da morfologia da feição frente a outras tecnologias, mas pouco se trata da relação custo-benefício de sua aplicação para análises de modelagens em diferentes escalas.

Um ponto fundamental se refere à densidade de pontos no terreno, que influenciará a qualidade do MDTs (resolução), implicando na necessidade de avaliação preliminar dos dados disponíveis que, por vezes, podem não ter sido levantados para fins de estudos geomorfológicos, por exemplo. Os trabalhos consultados indicaram uma diferença marcante na densidade de pontos em relação aos dados aqui testados.

Em suma, este trabalho verificou que em áreas com vegetação densa os pontos no terreno se deram de forma esparsa, enquanto as áreas urbanizadas ou àquelas afetadas por movimentos de massa, concentraram uma maior quantidade de pontos, uma vez que havia supressão da vegetação. Dentre as combinações disponíveis na ferramenta descrita, a opção *Triangulation*, associada ao interpolador *Natural Neighbor* mostrou-se eficiente quando comparado o número de *sinks* resultantes nos MDTs, considerando pontos tão esparsos.

AGRADECIMENTOS

Aos revisores do periódico por suas contribuições. A Fiducial Engenharia pela cessão dos dados LiDAR mediante o programa Curitiba Tecnológica/ISS Tecnológico (01-088616/2012).

REFERENCIAS

- Ackermann, F. (1996). Airborne Laser Scanning of Elevation Model. *GIM International Journal of Geomatics*, 10:24-25.
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (2010). *Superseded ASPRS LAS 1.4 Format Specification, October 24*. Recuperado de <http://www.asprs.org/Committee-General/LASer-LAS-File-Format-Exchange-Activities.html>
- Ashraf, M.I., Zhao, Z., Bourque, C.P.A., & Meng, F.R. (2012). GIS-evaluation of two slope-calculation methods regarding their suitability in slope analysis using high-precision LiDAR digital elevation models. *Hydrological Process*, 26:1119-1133.
- Araújo, J.P.C., Guimarães, R. F., & Fernandes, N.F. (2019). Reconstrução topográfica digital de áreas afetadas por movimentos de massa e cálculo do volume de material mobilizado. In: L.S. Pinheiro, & A. Gorayeb (Org.) *Geografia Física e as Mudanças Globais*. Fortaleza: Ed. UFC.
- Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2007). Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne LiDAR. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7:637-650.
- Axelsson, P. (1999). Processing of laser scanner data—algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54:138-147.
- Barber, C.T., & Shortridge, A. (2005). Lidar Elevation Data for Surface Hydrologic Modeling: Resolution and Representation Issues. *Cartography and Geographic Information Science*, 32(4):401-410.
- Bater, W.B., & Coops, N.C. (2009). Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. *Computer & Geosciences*, 35:289-300.
- Baum, R.L., Coe, J.A., Godt, J.W., Harp, E.L., Reid, M.E., Savage, W.Z., ... & Michel, J.A. (2005). Regional Landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA. *Landslides*, 2:266-279.
- Becker, J.H., & Centeno, J.A.S. (2013). Avaliação de Métodos de Filtragem de Nuvem de Pontos Derivados do Sistema Laser Scanner Aerotransportado para Obtenção de MDT. *Revista Brasileira de Cartografia*, 4(65):651-659.
- Botelho, M.F., Silva, C.R., Schoeninger, E.R., & Centeno, J.A.C. (2005). Comparação dos resultados de interpoladores “Vizinho mais próximo” e “Inverso de uma distância” no cálculo de volume a partir de dados do laser scanner. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, GO, Brasil, 12*. (pp. 731-736).
- Burns, W.J., & Madin, I.P. (2009). Protocol for Inventory Mapping of Landslide Deposits from Light Detection and Ranging (LiDAR) Imagery. *Oregon Department of Geology and Mineral Industries, Special Paper 42*.
- Chase, A.F., Chase, D.Z., Fisher, C.T., Leisz, S.J., & Weishampel, J. F. (2012). Geospatial revolution and remote sensing LiDAR in Mesoamerican archaeology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(32):12916-12921
- Chu, H.J., Wang, C.K., Huang, M.L., Lee, C.C., Liu, C.Y., & Lin, C.C. (2014). Effect of point density and interpolation of LiDAR-derived high- resolution DEMs on landscape scarp identification. *GIScience & Remote Sensing*, 51(6):731-747.

- Cowen, D.J., Jensen, J.R., Hendrix, C., Hodgson, M.E., & Schill, S.R. (2000). A GIS-assisted rail construction econometric model that incorporates LIDAR data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(11):1323-6.
- Cruz, C.B.M., Barros, R.S., Cardoso, P.V., Reis, R.B., Rosário, L.S., Barbosa, ... & Lourenço, J.S.Q. (2011). Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR. *Anais Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, 15 (p.5463).
- Environmental Systems Research Institute (2015). *ArcGis, Spatial Analyst, 3D Analyst*. 10.3.
- Flood, M., & Gutelius, B. (1997). Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airborne laser radar. *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, 63:327-329; 363-366.
- Glenn, N.F., Streutker, D.R., Chadwick, D.J., Thackray, G.D., & Dorsch, S.J. (2006). Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73:131-148.
- Godt, J.W., Baum, R.L., Savage, W.Z., Salciarini, D., Schulz, W.H., & Harp, E.L. (2008). Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. *Engineering Geology*, 102:214-226.
- Goulden, T., Hopkinson, C. Jamienson, R., & Sterling, S. (2014). Sensitivity of watershed attributes to spatial resolution and interpolation method of LiDAR DEMs in three distinct landscapes. *Water Resources Research*, 50:1908-1927.
- Guo, Q., Li, W., Yu, H., & Alvarez, O. (2010). Effects of Topographic Variability and Lidar Sampling Density on Several DEM Interpolation Methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(6):1-12.
- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K.T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112:42-66.
- Haugerud, R.A., Harding, D.J., Johnson, S.Y., Harless, J.L., Weaver, C.S., & Sherrod, B.L. (2003). High-resolution LIDAR topography of the Puget Lowland, Washington: *GSA Today*, 13(6):4-10.
- Haugerud, R.A. (2014). *Preliminary Interpretation of Pre-2014 Landslide Deposits in the Vicinity of Oso*. Reston: USGS Open-File Report 2014-1065.
- Highland, L.M., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook: A guide to understanding landslides* Reston: U.S. Geological Survey Circular 1325.
- Killian, J., Haala, N., & Englich, M. (1996). Capture and Evaluation of Airborne Laser Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31(3):383-388.
- Hopkinson, C., Masaki Hayashi, M., & Peddle, D. (2009). Comparing alpine watershed attributes from LiDAR, Photogrammetric, and Contour-based Digital Elevation Models. *Hydrological Process*, 23: 451-463.
- Kersting, A.P.B. (2011). *Quality Assurance of Multi-Sensor System*. (Tese de Doutorado em Engenharia Geomática). Calgary: School of Engineering/ UnC.
- La Husen, S.R., Duvall, A. R., Booth, A. M., & Montgomery, D.R. (2016). Surface roughness dating of long-runout landslides near Oso, Washington (USA), reveals persistent postglacial hillslope instability. *Geology*, 44(2):111-114.
- Liu, X. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1):31-49.
- Macedo, R.C., Santos, J.R. & Soares, J.V. (2013). Validação de Modelo Digital de Terreno em Área Florestal Com Relevo Ondulado, Gerado a Partir de Dados LiDAR. *Revista Brasileira de Cartografia*, 4(65):695-702.
- Martins, T.D., Oka-Fiori, C., Vieira, B.C., Bateira, C.V.M., & Montgomery, D.R. (2017). Avaliação de MDT na Modelagem de Instabilidade de Vertentes. *Ra'e'ga*, 41:7-19. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v41i0.47607>
- Michel, G.P., Kobiyama, M., & Goerl, R.F. (2014). Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*, 14:1266-1277.

- Minerais do Paraná S.A. (2013). *Avaliação geotécnica de vertentes na área urbana de Antonina. Relatório Técnico*. Curitiba. 2v.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (2014). *Lidar Provisional Guidance for the Digital Coast Data Access Viewer*.
- Oka-Fiori, C., Santos, L.J.C., Canali, N. E., Fiori, A.P., Silveira, C.T., Silva, J.M.F., & Ross, J.L.S. (2006). *Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000*. Curitiba: MINEROPAR.
- Pacheco, A.P., Centeno, J.A.S., Assunção, M.G.T.A., & Botelho, M.F. (2011). Classificação de pontos LiDAR para a geração do MDT. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 17(3): 417-438.
- Quantum Spatial (2014). *Oso Landslide/Stillaguamish River LiDAR: Technical Data Report*. WA/OR.
- Razak, K.A., Santangelo, M., Van Westen, C.J., Straatsma, M.W., & Jong, S.M. (2013). Generating an optimal DTM from airborne laser scanning data for landslide mapping in a tropical forest environment. *Geomorphology*, 190:112-125.
- Schulz, W.H. (2004). *Landslides mapped using LIDAR imagery*. Seattle: US Geological Survey Open-File Report.
- Schulz, W.H. (2005). *Landslide Susceptibility Estimated from Mapping Using Light Detection and Ranging (LIDAR) Imagery and Historical Landslide Records*. Seattle: US Geological Survey Open-File Report 2005-1405
- Schulz, W.H. (2007). Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington. *Engineering Geology*, 89:67-87.
- Soares, L.F.L., Picanço, J.L., Mesquita, M.J., & Moraes, M.M.G. (2013). Avaliação preliminar dos escorregamentos no Morro do Bom Brinquedo - Antonina-PR. *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 14 (pp.113-114).
- United States Geological Survey. *The National Map – Data Delivery*. Recuperado de <https://www.usgs.gov/core-science-systems/ngp/tnm-delivery>.
- WSI (2013). *Applied Remote Sensing and Analysis. OLC Lane County: Delivery 1. Data collected for: Oregon Department of Geology and Mineral Industries*.

Data de submissão: 12/maio/2020

Data de aceite: 08/agosto/2020