# Influência da interpolação na geração de MDTs a partir de pontos classificados LiDAR

Carlos Alberto Silva<sup>1</sup> Veraldo Liesenberg<sup>2</sup> Carine Klauberg<sup>1</sup> Andrew Hudak<sup>3</sup> Robert Liebermann<sup>3</sup> Luiz Carlos Estraviz Rodrigues<sup>1</sup>

 <sup>1</sup> Universidade de São Paulo - USP/ESALQ Caixa Postal 96 - 13416-000 - Piracicaba - SP, Brasil carlos\_engflorestal@yahoo.com.br carine\_klauberg@hotmail.com lcer@usp.br
 <sup>2</sup> Freiberg University of Mining and Technology - TUBAF Bernhard-von-Cotta-Str. 2 - 09599 – Freiberg (Sachsen), Germany veraldo@gmail.com
 <sup>3</sup> Rocky Mountain Research Station- USDA Forest Service 1221 South Main Street – 83843 Moscow - Idaho, USA ahudak@fs.fed.us rjl@mail.ru

Abstract. The generation of digital terrain models (DTMs) from airborne LiDAR (Light Detection and Ranging) data is an important task for both ecological studies and forest management purposes. However, besides a proper ground filtering, a correct choice of the interpolation method is also important step. We evaluated three interpolation methods for the generation of DTMs (i.e. kriging, inverse distance weighted and nearest neighbor). Our study area is located in western Washington State (USA). The area contains different land use classes ranging from bare soil to shrubland, log forest and then dense forest. We compare the different interpolated DTM results each other and with a topographic map. The results showed that significant differences between interpolation methods were associated with abrupt changes in relief and also related to specific land use classes. However, the higher differences (i.e. up to 5m) were found using the nearest neighbor approach. The best methods for the selected area were kriging and inverse distance weighted. Further investigation should take into account the influence of different land use types on the interpolation results and evaluate the impact of topography on the extraction of individual trees.

Palavras-chave: ALS, LiDAR, remote sensing, MDT, MDE, forest management, ground classification.

### 1. Introdução

O modelo digital de terreno (MDT, do inglês digital terrain model (DTM)) é uma representação da superfície nua do solo. Entre as diferentes aplicações do MDT nas geociências está à delimitação de bacias hidrográficas e extração de hidrografia, análises geológicas, determinação do comprimento e inclinação de rampa na modelagem do potencial erosivo dos solos, planejamento de estradas e terraplenagem entre inúmeros outros usos (Reutebuch et al., 2005). Atualmente, a geração do MDT têm sido realizada por meio de fotogramétrica (Mikhail, 2001), imagens orbitais aerorestituição equipolares ou interferométricas (Gama, 2006) e mais recentemente por tecnologia de laser aerotransportado ou LiDAR (do inglês, Light Detection And Ranging; Briese et al., 2001, Kraus e Pfeifer, 1998, 2001, e Evans e Hudak, 2007). Entretanto, os dois primeiros produtos estão mais relacionados com o modelo digital de elevação (MDE) devido aos diferentes mecanismos de interação dos alvos que não necessariamente representam a superfície nua do terreno. Estes são devidos a elementos chamados "residuais", a exemplo de benfeitorias e/ou vegetação.

Sob a perspectiva do sistema LiDAR, três tipos de erros devem ser minizados, quando da geração do MDT: a) os erros altimétricos, b) os erros planimétricos, e c) os erros decorrentes do processo de rotulação dos dados e sua posterior interpolação. Os dois primeiros resultam

de uma combinação das efemêrides do sensor, altitude de vôo, calibração interna so sistema imageador e relação sinal-ruído. O terceiro resulta da extração adequada dos pontos de solo que representem fielmente a superfície nua do terreno (Hodgson e Bresnahan, 2004).

Em qualquer aplicação LiDAR, o processo de extração por meio de filtragem dos pontos correspondentes ao terreno nu, isto é, sem vegetação ou benfeitorias é uma etapa fundamental. Aspectos sobre métodos de filtragem e suas aplicações podem ser encontradas em (Briese et al., 2001, Kraus e Pfeifer, 1998, 2001, e Evans e Hudak, 2007). No entanto, como resultado da filtragem, os pontos correspondentes ao solo não necessariamente cobrem a totalidade da superfície do solo. Em áreas com predominância de vegetação arbórea por exemplo, a maioridade dos pontos está em geral distribuída sobre as copas. Dependendo da estrutura e cobertura do dossel em questão, além da densidade e a orientação das plantas, alguns pontos podem eventualmente vir a atingir o solo propriamente dito. Assim, para fins de geração de MDTs, uma interpolação dos dados pontuais LiDAR se faz necessária.

A interpolação de dados pontuais pode ser realizada usando-se diferentes métodos. Entretanto, não existe nenhum concenso na literatura sobre a escolha do método mais adequado. Basicamente, cada método consiste em atribuir um valor em locais não amostrados a partir de pontos amostrados na vizinhança ou região. Alguns autores por exemplo, têm feito uso de krigagem para a geração de MDTs, enquanto que outros pelo método do inverso das distâncias (do inglês, *inverse distance weighted* - IDW). Entretanto, boa parte dos aplicativos atualmente disponíveis para processamento de dados LiDAR, oferece apenas o *triangular irregular network* (TIN) e sua posterior conversão para uma grade regular a uma pré-definida resolução espacial.

O uso inadequado de interpoladores pode introduzir artefatos na geração de MDTs. O mesmo pode ser verdade em áreas com considerável variabilidade de dados pontuais. Áreas vegetadas ou com benfeitorias, são exemplos de situações extremas aonde a quantidade de pontos sobre a superfície do solo é extremamente reduzida. O principal objetivo deste trabalho é o de comparar o desempenho de diferentes interpoladores na geração de DTMs. Ainda, uma comparação dos resultados com cartas topográficas também é realizada.

### 2. Descrição da área de estudo

O presente trabalho foi realizado com dados LiDAR disponibilizados no portal do Remote Sensing Applications Center (RSAC) pertencente ao Serviço Florestal Americano (US Forest Service). A área em estudo, citado por McGaughey (2012) e Andersen et al. (2005) está localizada em Capitol State Forest no oeste do estado de Washington (EUA) (Figura 1). A floresta é composta por espécies de coníferas, tais como, douglas-fir (Pseudotsuga menziessi), hemlock ocidental (Tsuga heterophylla), cedro-vermelho ocidental (Thuja plicata), incluindo também espécies de madeira resistentes, tais como amieiro (Alnus rubra) e plátano (Acer macrophyllum).



Figura 1. Detalhe da área de estudo no contexto nacional (A), fotografia aérea ortoretificada da *Capitol Forest* com detalhe a seleção de dois perfis para futura análise da elevação (B) e visualização 3D da área de estudo com dados aerotransportados LiDAR (C). Fonte: *Washington State Department of Natural Resources*.

A área em especifico é um ambiente de estudo e pesquisas silviculturais, tais como investigação dos efeitos causados por diferentes tipos e manejo de colheita florestal. Na área encontram-se solo exposto, campos arbustivos, florestas manejadas com corte seletivo e florestas com vegetação densa.

Segundo Andersen et al. (2005), o sobrevôo LiDAR foi realizado na primavera de 1999 utilizando sensor de retorno discreto com um estreito campo de visada. O sistema "Saab TopEye" foi embarcado em um helicóptero que sobrevoou toda a área de estudo (Figura 1). Complementarmente a aquisição LiDAR, fotografias ortoretificadas foram adquiridas com uma resolução espacial de 30cm (Figura 1B). Os dados foram gentilmente cedidos para fins educacionais pela *Washington State Department of Natural Resources* (McGaughey, comunicação pessoal). A Tabela 1 apresenta os parâmetros de vôo e as configurações dos equipamentos utilizados para a aquisição dos dados LIDAR. Para cada retorno, foram incluídos o número de pulsos, número de retorno por pulsos, a correspondente localização em X e Y, elevação, ângulo de aquisição e intensidade de retorno.

| Atributos                 | Valores                  |
|---------------------------|--------------------------|
| Altitude de vôo           | 200 m                    |
| Velocidade de vôo         | 25 m/s                   |
| Largura da faixa imageada | 70 m                     |
| Campo de imageamento      | $\pm 8$ graus            |
| Densidade de pontos       | 4 pontos/ m <sup>2</sup> |
| Taxa dos pulsos           | 7.000 pontos/s           |
| Máximo retorno por pulso  | 4                        |
| Diâmetro do feixe         | 40 cm                    |

Tabela 1. Especificações dos dados aerotransportados LiDAR e dados gerados.

## 3. Material e Métodos

O algoritmo usado para a classificação dos dados LiDAR foi o desenvolvido inicialmente por Kraus e Pfeifer (1998) e incorporado por McGaughey (2012) no aplicativo *GroundFilter*, pertencente ao Fusion (GF, <u>http://forsys.cfr.washington .edu/fusion</u>; McGaughey, 2012). Ainda, um visualizador é incorporado como uma ferramente adicional ao Fusion (LDV, *LiDAR data visualization*). O aplicativo Fusion/LDV foi desenvolvido pelo *US Forestry Science Pacific Northwest Research Station* e é de livre acesso. O aplicativo faz parte de um coletânea de aplicativos para processamento de dados LiDAR. O *GroundFilter* se baseia no princípio de interpolação da nuvem de pontos do topo para a base. Em função da alta densidade de pontos por m<sup>2</sup> dos dados (Tabela 1), optou-se por selecionar o critério mais rigoroso para a extração dos pontos de solo.

Após a determinação dos pontos de superfície, procedeu-se com a conversão para uma grade regular com uma resolução espacial de 1m. O método de interpolação testados foram: 1) krigagem linear, 2) inverso das distâncias ponderadas (do inglês, *inverse distance weighted* - IDW), e o 3) vizinho mais próximo (do inglês, *K-nearest neighbor* - KNN) (Figura 2). Uma carta topográfica gerada a partir de restituição aerofotogramétrica foi usada para aferição dos resultados (Whashington, 2012). A mesma possui uma resolução espacial de 10m.

Os resultados obtidos pelas superfícies interpoladas foram comparadas com os dados da carta topográfica. Um total de 10 mil pontos selecionados aleatoriamente sobre a carta topográfica foram usados para fins de validação dos resultados. Apesar da carta topográfica estar mais relacionada a um modelo digital de elevação (MDE), a comparação ainda é válida em função da indisponibilidade de medições mais precisas de campo baseadas em GPS

diferencial. A comparação entre os dados obtidos pelos classificadores foi então comparada estatísticamente baseados no erro médio quadrático (RMSE; Equação 1), seu coeficiente de variância do erro médio quadrático (CV; Equação 2) e o erro absoluto médio (MAE; Equação 3).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (y_i - x_i)^2}$$
(1)

$$CV - RMSE (\%) = \frac{RMSE}{\bar{x}} * 10$$
<sup>(2)</sup>

$$MAE(\%) = \frac{(\bar{y} - \bar{x})}{\bar{x}} * 100$$
 (3)

O y<sub>i</sub> é o valor calculado (dado LiDAR classificado como solo) e x<sub>i</sub> é o valor observado (valor correspondente da carta topográfica). O  $\overline{\mathbf{x}}$  é a média do valor observado e  $\overline{\mathbf{y}}$  é a média do valor calculado. A Figura 2 mostra o fluxograma de atividades realizado nesse trabalho.



Figura 2. Fluxograma do processamento de dados LiDAR. Uma detalhe da visualização 3D da nuvem de pontos é apresentada em (A), os pontos classificados em (B), e a superfície interpolada em (C).

### 4. Resultados e Discussões

O resultado da filtragem do solo pelo aplicativo Fusion é apresentado na Figura 3A. O número de pontos correspondentes ao solo nú esteve relacionado com o tipo de uso do solo. Em áreas de solo exposto, a densidade foi de 4 pontos m<sup>-2</sup> enquanto que em áreas de floresta densa inferior a 1 ponto m<sup>-2</sup>. Os resultados corroboram com a literatura disponível sobre o tema em questão em ambientes diversos (Ribas, 2010, Pacheco et al., 2011).

Os resultados dos três interpoladores é ilustrado nas Figuras 3B, 3C e 3D. Apesar da similaridade visual entre os diferentes interpoladores (Figura 3B, 3C, 3D), observou-se uma diferença significativa entre os diferentes métodos empregados. As diferenças observadas variam modularmente em até 5m (Figura 4F). As menores diferenças em altitude foram encontradas pela krigagem simples e IDW (Figura 4B). As maiores direnças em altitude foram observadas quando pelo uso da abordagem K-NN (Figura 4D, 4F).

As diferenças de altitude quando confrontados sobre a fotografia aérea ortoretificada (Figura 1B), MDTs (Figuras 3A, 3C, 3E) e MDE (restituição aerofotogramétrica) mostram que os artefatos estiveram presentes em áreas de transição de classes de uso de solo, e em mudanças abruptas de relevo. As diferenças podem então ser realçadas de acordo com a escolha do interpolador. Enquando a variação modular é maior para o método K-NN, o valor tende a ser menor para os demais métodos utilizados.



Figura 3. Resultado da filtragem do Fusion (A). Representação tridimensional dos DTMs gerados por meio dos interpoladores krigagem simples (B), IDW (C) e K-NN (D).

A Tabela 2 mostra os resultados dos testes estatísticos empregados. Os três métodos de interpolação apresentaram resultados similares de RMSE, CV-RMSE e MAE. Os maiores valores estiveram atribuídos ao interpolador IDW. A seleção dos pontos pode ter sido uma das razões sobre a discrepância observada pelas diferenças em altitude observadas nas Figuras 4B, 4D e 4F.

| Interpoladores — | Testes Estatísticos |             |         |
|------------------|---------------------|-------------|---------|
|                  | RMSE                | CV-RMSE (%) | MAE (%) |
| Krigagem         | 25.7089             | 7.7764      | -0.0914 |
| IDW              | 25.7137             | 7.7781      | -0.0876 |
| K-NN             | 25.6780             | 7.7670      | -0.0923 |

| Tabela 2. | Resultados | dos testes | estatísticos. |
|-----------|------------|------------|---------------|
|-----------|------------|------------|---------------|

Embora com resultados estatísticos similares, uma análise dos histogramas obtidos pelos diferentes classificadores é demonstrada na Figura 5. Observa-se uma similaridade entre os histogramas de altitude entre os diferentes interpoladores (Figuras 5B, 5C, 5D). Observa-se também algumas diferenças entre os histogramas dos diferentes interpoladores com a carta topográfica (Figura 5A). Tal fato é atribuído a geração do mesmo por meio de restituição

aerofotogramétrica. A geração do MDE tende a superestimar os valores de MDT em áreas de vegetação.



Figura 4. MDTs gerados pelo método da krigagem simples (A), K-NN (B) e IDW (C). As diferenças em altitude para os diferentes métodos são apresentadas em (D), (E) e (F).



Figura 5. Histogramas da carta topográfica (A), e dos interpoladores krigagem simples (B), IDW (C), e K-NN (D).

#### 5. Conclusões e Recomendações

O uso de diferentes interpoladores mostraram diferenças significativas na geração de MDTs. Os melhores resultados estiveram associados com o uso da krigagem e inverso das distâncias. Artefatos na geração de MDTs foram encontrados em áreas de relevo acentuado bem como transição de classes de uso do solo. Entretanto, a qualidade dos MDTs gerados devem ser constados preferencialmente em campo com medições de GPS diferencial para aferição dos resultados.

Futuros estudos devem envolver uma análise mais detalhada dos resultados em diferentes classes de uso do solo. Os efeitos de uma adequada interpolação podem então ser avaliadas para a determinação de árvores individuais de maneira similar ao proposto por Oliveira et al. (2012).

#### 6. Agradecimentos

À *Washington State Department of Natural Resources* pela cessão dos dados aerotransportados LiDAR e imagens para a realização desse estudo. A FAPESP e ao CNPq pelas bolsas concedidas.

## 7. Referências Bibliográficas

Andersen, H.-E., McGaughey, R.J., Reutebuch, S.E. Forest Measurement and Monitoring using hgh-resolution airborne LiDAR. Productivity of Western Forests: A Forest Products Focus, 2005.

Briese, C.; Pfeifer, N. Airborne Laser Scanning and Derivation of Digital Terrain Models. Fifth Conference on Optical 3-D Measurement Techniques. Vienna, Austria, 2001.

Evans, J.S.; Hudak, A.T. A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return lidar in forested environments. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, p. 1029-1038, 2007.

Gama, F.F. Estimativa de parâmetros biofísicos de povoamentos de *Eucalyptus* através de dados SAR **Ambiência**, v.2, p. 29-42, 2006.

Hodgson, M.E.; Bresnahan, P. Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation : Empirical Assessment and Error Budget. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 70, n. 3, p. 331-339, 2004.

Kraus, K., Pfeifer, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 53, p. 193-203, 1998.

Kraus, K; Pfeifer, N. Advanced DTM Generation from LiDAR data. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, n. 3/W4, p. 23-30, 2001.

McGaughey, R.J. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. V.3.10. Washington DC: USDA/Forest Service, p. 170, 2012.

Mikhail, M, E., Bethel, S, J., McGlone, C, J., Photogrammetric products. In: Introduction to Modern Photogrammetry, pp. 225-246, 2001.

Oliveira, L.T.; Carvalho, L.M.T.; Ferreira, M.Z.; Oliveira, T.C.A.; Acerbi Junior, F.W. Application of LiDAR to Forest Inventory for tree count in stands of *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v. 18, n. 2, 2012.

Pacheco, A.P.; Centeno, J.A.S.; Assunção, M.G.T.; Botelho, M.F. Classificação de pontos LiDAR para a geração do MDT. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 17, n. 3, p. 417-438, 2011.

Reutebuch, S. E., Andersen, H.-E. and McGaughey, R. J. Light detection and ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory. **Journal of Forestry**, v. 103, n. 6, p. 286-292, 2005.

Ribas, R.P. Mapeamento de córregos de cabeceira sob dosséis florestais utilizando dados LiDAR. Revista Brasileira de Cartografia, v. 63, p. 123-129, 2010.

Washington. Disponível em:< http://gis.ess.washington.edu/data/raster/tenmeter/byquad/index.html>. Acesso em 10 nov. 2012