

Validação de modelo digital de terreno em área florestal com relevo ondulado, gerado a partir de dados LiDAR

Rodrigo de Campos Macedo¹
João Vianeí Soares¹
João Roberto dos Santos¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{macedo, vianeí, jroberto}@dsr.inpe.br

Abstract. This paper had used the hypothesis that the altimetric error of the LiDAR DTM is compatible with the 0.5m error tolerance, in a mountain forest. The purpose was validate the DTM using field data as reference. The study area is an eucalyptus plantation for pulp production, located on Igarata, São Paulo estate. The field survey had as main finality obtaining reference data for the DTM validation, on the four following situations: i) flat and without forest cover; ii) flat with forest cover; iii) slope and without forest cover and; iv) slope with forest cover. The final positional precision was 0.12m (XY coordinates) and 0.21m (Z coordinate), satisfactory to the desired validation. Through an airborne survey it was obtained a 3D point cloud, which was filtered and classified as terrain; after that, the points were resampled in a regular grid, generating the DTM using linear interpolation. The validation was realized with longitudinal profiles, using the RMSE (Root Mean Square Error) as a statistical measure of error. At the most complex situation (slope and forest cover), the RMSE was 0.50m. This is explained by the microrelief details, like holes, ditches, branches, stumps, etc. The initial hypothesis was accepted, ie, the LiDAR DTM presents altimetric error acceptable to cartographic production used on forest planning.

Palavras-chave: Laserscanner, Digital Elevation Model, Filtering, Topography, Modelo Digital de Elevação, Filtragem, Topografia.

1. Introdução

O relevo é um elemento de extrema importância para a gestão e planejamento florestal, pois determina a declividade, o comprimento de rampa e a área de superfície. A declividade e o comprimento de rampa influenciam sobremaneira o tipo de uso de cada área, ou seja, se um determinado local deve ser conservado ou utilizado com finalidades econômicas e, neste caso, se é possível mecanizá-lo e até mesmo, que tipo de mecanização é possível. Além disso, a mensuração da área “real” de uma superfície ondulada (também chamada de área de superfície) deve ser diferenciada da área calculada com base em projeção plana, como pode ser visualizado na Figura 1 e formalizado na Equação 1. Em locais com relevo ondulado, esta diferença pode chegar a 15%, prejudicando atividades vinculadas ao planejamento florestal, tais como estimativa de quantidade de mudas e de fertilizantes e herbicidas a serem aplicados, ou mesmo a extrapolação de biomassa madeireira (MACEDO, 2008).

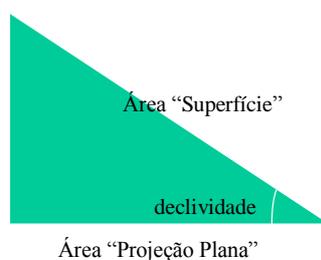


Figura 1 – Diferenciação entre área de superfície e área de projeção plana

$$AS = \frac{AP}{\cos d} \quad (1)$$

Onde: AS = Área de Superfície; AP = Área projetada no plano; d = declividade (radianos)

O relevo pode ser representado através de Modelo Digital de Elevação (MDE). Estes podem ser gerados a partir de dados topográficos, geodésicos, estereoscópicos (fotogramétricos ou radargramétricos), interferométricos e pontos obtidos a partir de varredura laser (TOUTIN, 1999; PINHEIRO, 2006; LIU, 2008). Cracknell e Hayes (1987) revisaram diversos artigos para comparar fotogrametria, interferometria e varredura *laser* em áreas florestais e, concluíram que este último apresentou precisões mais altas, levantamentos rápidos, porém alto custo. Baltsavias (1999), Brandalize (2005) e Zandoná (2006) fizeram comparativos com fotogrametria, citando algumas vantagens do *laserscanner*, tais como amostragem satisfatória em áreas com vegetação densa e aquisição direta de coordenadas tridimensionais XYZ. Behera e Roy (2002), comparando RaDAR e LiDAR, comentam sobre as vantagens do LiDAR para mensuração de distâncias nos pulsos com alta energia, que podem ser emitidos em curto intervalo de tempo.

O MDE que representa o terreno independentemente de sua cobertura (construções, árvores, etc.) é chamado de Modelo Digital de Terreno (MDT). Quando gerado com LiDAR apresenta erro altimétrico nominal em torno de 0,15m em áreas planas, mas a cobertura florestal e a declividade podem aumentar substancialmente este erro (HARDING et al., 2001; ZANDONÁ et al., 2005). Porém, é necessário validá-lo com alguma referência com precisão conhecida, podendo esta ser coletada em campo ou a partir de MDT's já previamente validados. A validação consiste em comparar os valores do modelo gerado com os valores da referência altimétrica adotada. Um MDT com exatidão e precisão altimétrica conhecida é muito importante, pois através dele podem ser derivados diversos produtos, como curvas de nível (isolinhas), classes de declividade e de comprimento de rampa, rede de drenagem e, principalmente, o planejamento de uso da terra, alocação de estradas e características operacionais em relação ao tipo de mecanização.

Diante deste cenário, o presente artigo partiu da hipótese que o erro altimétrico presente no MDT gerado a partir de dados LiDAR, em relevo ondulado sob dossel florestal, seja compatível com a tolerância de 0,5m – erro máximo esperado para a elaboração das cartas necessárias ao planejamento florestal. O objetivo foi validar o MDT utilizando-se dados de campo como referência.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

A área de estudo deste trabalho foi escolhida por ser utilizada para plantação de eucaliptos, destinados à produção de pasta celulósica de fibra curta, localizada no município de Igaratá, Estado de São Paulo, na região conhecida como Vale do Paraíba. A plantação de eucaliptos está localizada em uma fazenda que possui 267,98 ha de área total, sendo que 145,46 ha estão ocupados com eucaliptos, 61,35 ha destinados a Reserva Florestal Legal e 45,37 ha de Área de Preservação Permanente.

2.2. Procedimentos

A Figura 2 apresenta o esquema metodológico utilizado, diferenciando os insumos (dados primários e derivados), processos e produtos, salientando que a validação consiste em uma comparação estatística dos valores altimétricos presentes no MDT e nos perfis longitudinais mensurados em campo, utilizados como referência.

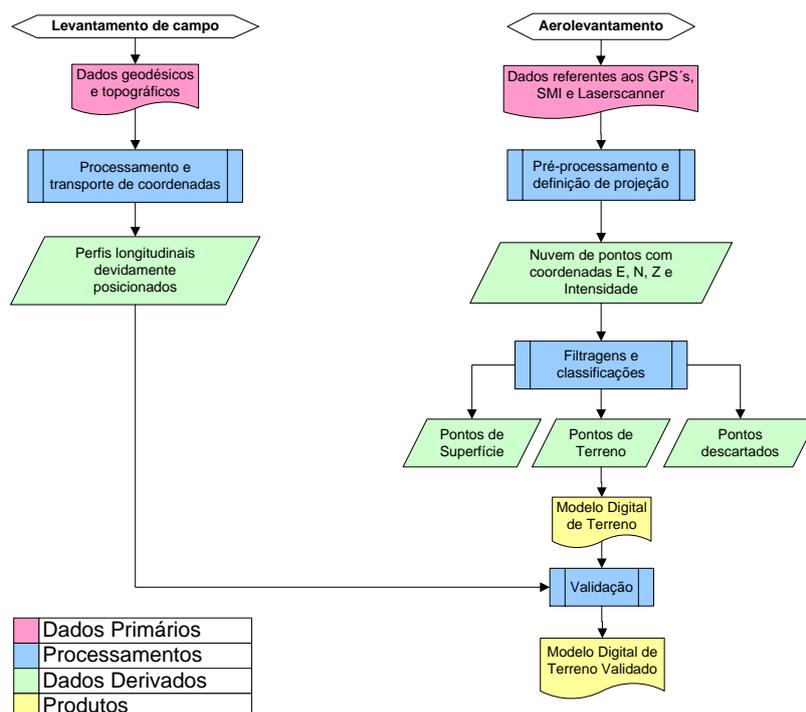


Figura 2 – Fluxograma metodológico adotado

2.2.1 Levantamento de Campo

Como referência para a validação, optou-se pela instalação e mensuração de perfis longitudinais. Em relação ao desenho e procedimento amostrais, foram realizados transectos representativos de quatro situações distintas: i) sem cobertura arbórea e em nível; ii) sem cobertura arbórea e em desnível; iii) com cobertura arbórea e em nível e; iv) com cobertura arbórea e em desnível. Considerando a discussão de Jonas e Byrne (1999) sobre a influência negativa da presença de sub-bosque herbáceo na exatidão da modelagem de terreno, todos os perfis foram alocados em áreas sem a presença deste tipo de vegetação, restando apenas a declividade e a cobertura florestal como influência significativa. Foram medidas as seguintes variáveis: a diferença de nível (utilizando-se nível óptico) e declividade (utilizando-se clinômetro de precisão) em cada ponto amostral ao longo dos transectos. O cálculo de cotas utilizou a abordagem de Veras (1997).

Para conhecer as coordenadas dos vértices dos perfis, foi realizada uma poligonal aberta (utilizando-se estação total). No processamento destas coordenadas foi utilizado o método de ajustamento por propagação de erros, proposto por Gemael (1994). Todos os erros foram ponderados e resultaram no erro final. Este erro final foi compatível com a validação pretendida (WRIGHT, 1982). Stumpf (1993), afirma que a incompatibilidade entre a precisão posicional do transecto amostral e a rugosidade presente no micro relevo pode ser a maior fonte de erro durante o processamento dos resultados.

2.2.2 Aerolevantamento

O sensor utilizado foi o Optech ALTM 2050 (50kHz), que atua na região espectral de 1064 nm com resolução radiométrica de 8 bits, 2 retornos registrados, com sistema de varredura com espelho oscilante (Z-Scan). O aerolevantamento foi realizado a 1.000m de altura e utilizou os seguintes parâmetros: diâmetro do feixe de 25 cm, frequência de varredura de 58,7 Hz, ângulo de varredura de 15°, largura de faixa de 263 m, percentual de recobrimento de 30%, densidade de pontos de 5 pontos/m², erro planimétrico de 0,5 m (1 sigma) e erro altimétrico de 0,15 m (1 sigma). O apoio planialtimétrico foi referenciado ao datum

planimétrico SIRGAS2000 e altimétrico de Imbituba/SC, utilizando o sistema de projeção UTM. Foi estabelecida a base no aeroporto de São José dos Campos/SP

2.2.3 Pré-Processamento

Após o aerolevanteamento, os dados primários são constituídos por parâmetros obtidos por três subsistemas: *Laserscanner* (tempo entre transmissão e recepção para cada alvo), GPS (tempo-GPS e coordenadas X, Y, Z) e SMI (ângulos *alpha*, *phi*, *omega*). Com o pré-processamento, são interpolados todos estes parâmetros e incorporados os parâmetros de calibração obtidos com a realização de vôos em direções opostas, alturas constantes e parâmetros de perfilamento conhecidos, de forma a anular os erros posicionais, gerando-se os dados brutos, ou seja, a nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais e intensidade. Todo o pré-processamento foi realizado no aplicativo Terra Suite.

2.2.4 Filtragens e Classificações

A primeira filtragem realizada foi a eliminação de ruídos (*outliers*). Trata-se de alvos como nuvens e corpos d'água e demais pontos que prejudicaram a qualidade dos modelos gerados. Foram utilizados dois critérios: i) altimétrico – descartando-se todas as altitudes abaixo de 500 m e acima de 1.000 m; ii) radiométrico – descartando-se valores anômalos (SILVÁN-CÁRDENAS e WANG, 2006). Após a eliminação dos *outliers*, houve a necessidade de se classificar os pontos referentes ao terreno, separando-se os pontos que refletiram o chão dos pontos que refletiram os alvos presentes na superfície. Utilizou-se o classificador implementado no programa Terra Scan e recomendado por Axelsson (1999), por considerar valores originais da nuvem de pontos na geração dos modelos. A idéia desse classificador é a de que, para uma das diferenças de altura entre dois pontos, a probabilidade do ponto mais alto não pertencer ao terreno aumenta com a diminuição da distância linear entre eles (SITHOLE e VOSELMAN, 2003; 2004). A rotina de classificação é iterativa através da construção de modelos de superfícies triangulares temporários. O início da rotina ocorre com a seleção de alguns pontos baixos, assumindo como premissa que estes pontos tocam o terreno. Esta seleção inicial utiliza um parâmetro chamado “tamanho máximo das construções”, ou seja, a cada “área máxima construída” pelo menos um ponto toca a superfície do terreno, sendo este ponto o mais baixo dentro desta área. O algoritmo requer outros parâmetros, tais como ângulo e distância de iteração, que podem ser visualizados na Figura 3.

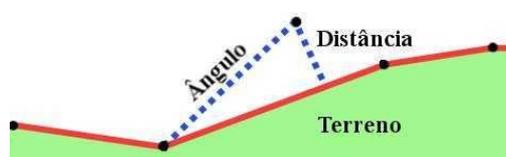


Figura 3 – Parâmetros de ajuste para classificação de pontos
Fonte: Zandoná (2006).

O valor utilizado para o ângulo do terreno foi compatível com o ângulo de varredura adotado no aerolevanteamento. Os demais parâmetros foram definidos experimentalmente com base na análise visual dos resultados de diversos testes de filtragem, estão dentro dos limites sugeridos pelos produtores do programa (LOCH et al, 2004; SOININEN, 2005) e podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros e valores da classificação de pontos de terreno

Parâmetro da Classificação	Valor
Ângulo do terreno	15°
Ângulo de iteração	7°
Tamanho máximo das “construções”	2 m
Distância de iteração	1m

Os pontos devidamente classificados como terreno foram reamostrados em uma grade regular (*raster*), utilizando interpolação linear com tamanho de célula de 0,25 m, compatível com a densidade de pontos/m². Após a geração do MDT, foram imprescindíveis a análise e a edição manual, visando eliminar erros que se mantiveram após as filtragens.

2.2.5 Validação

A validação do MDT foi realizada com os dados provenientes dos perfis longitudinais, utilizando o RMSE (*Root Mean Square Error*) como medida estatística da magnitude do erro.

3. Resultados e Discussão

Foram implantados 170 pontos de apoio, sendo os dois primeiros correspondentes a pontos de apoio DGPS. Na Figura 4 é possível visualizar a localização dos perfis.

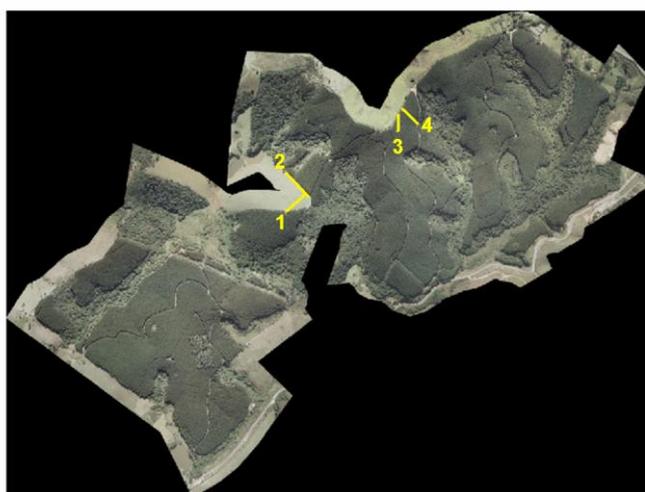


Figura 4 – Localização dos perfis topográficos

Para os perfis 1 e 3 (em nível), foram cotados pontos a cada 10 m. Já para os perfis 2 e 4 (desnível), houve a necessidade de cotar pontos a cada 2,5 m, devido à impossibilidade de se realizar visada morro acima no ponto inicial da régua topográfica. A Tabela 2 expressa as medidas dos perfis longitudinais.

Tabela 2 – Medidas dos perfis longitudinais

Perfil	Comprimento (m)	Desnível (m)	Declividade (°)		
			Média	Máxima	Mínima
Sem cobertura, em nível	90,00	-6,69	3,93	5,50	1,70
Sem cobertura, em desnível	137,50	-66,89	19,19	31,10	2,00
Com cobertura, em nível	100,00	16,89	5,30	9,80	0,70
Com cobertura, em desnível	87,50	-47,00	18,25	27,80	6,80

A alta variação na declividade medida nos pontos cotados indica a relevância das características presentes em detalhes da escala fina de análise (micro-relevo), mostrando que a exatidão posicional planimétrica possui uma influência na exatidão posicional altimétrica, característica agravada pelo fato de existir pequenas variações tais como troncos e galhos caídos, buracos, sulcos e voçorocas que podem comprometer a comparação entre os dados de campo e o MDT. As coordenadas dos vértices dos perfis foram devidamente transportadas através de cálculo de azimutes de cada ponto. O erro planimétrico médio foi de 0,12m e o altimétrico foi de 0,21m, compatíveis com a validação pretendida.

A filtragem/classificação dos pontos pertencentes ao terreno foi avaliada a partir do conhecimento prévio de campo e a visualização de feições, tais como uma estrada de terra e um curso d'água. O resultado da filtragem mostrou que 12% do total de pontos foram classificados como terreno. Na Figura 5 é possível visualizar o MDT gerado, com valores altimétricos compatíveis com a região estudada.

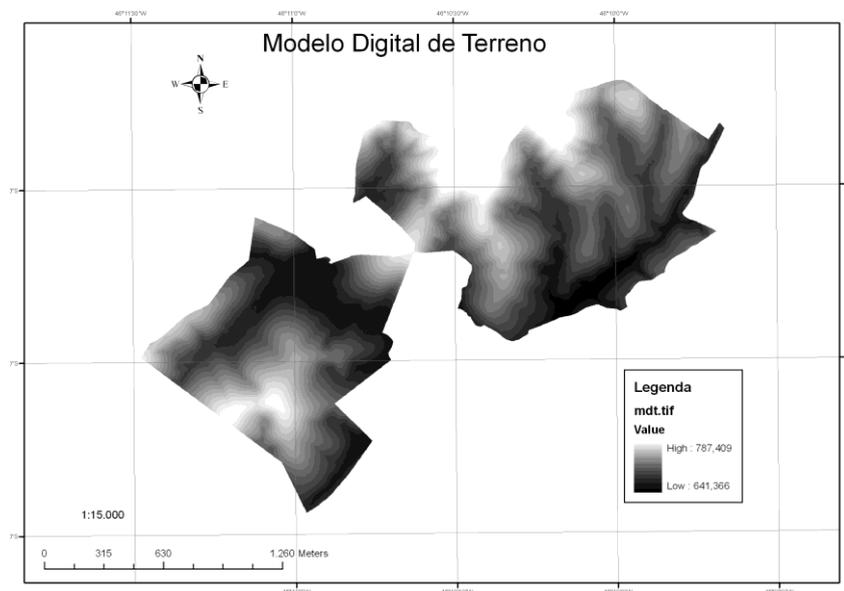
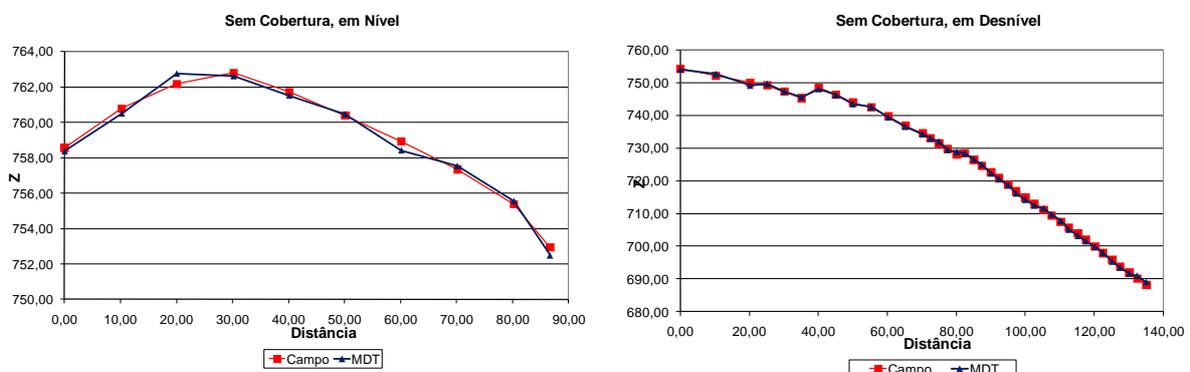


Figura 5 – Modelo Digital de Terreno

Na Figura 6 há a comparação do MDT derivado do LiDAR com os 4 perfis longitudinais obtidos através do levantamento topográfico e os resultados numéricos estão expressos na Tabela 3.



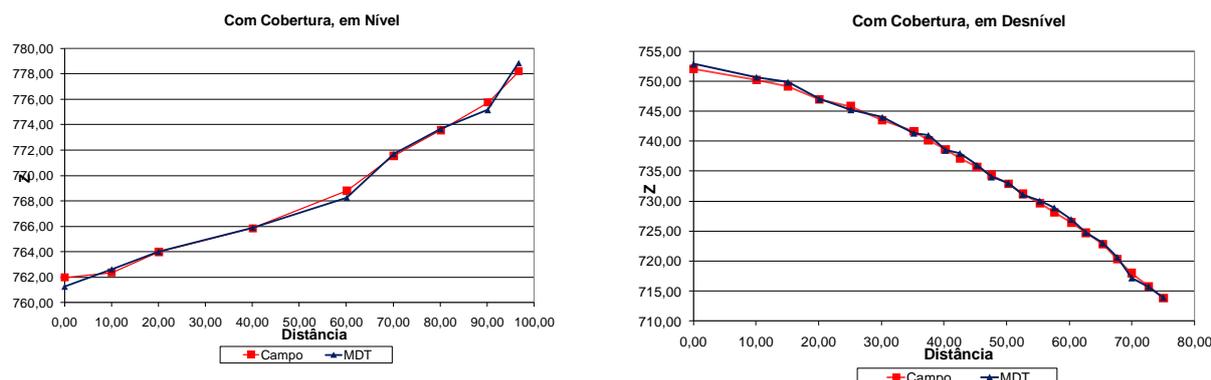


Figura 6 – Comparação entre o MDT e os perfis longitudinais

Tabela 3 – Resultados da comparação entre pontos cotados em campo e extraídos do MDT

Perfis	Campo		MDT		RMSE (m)
	Cota (m)		Cota (m)		
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	
Sem cobertura arbórea, em nível	752,93	762,81	752,49	762,75	0,33
Sem cobertura arbórea, em desnível	688,10	754,21	689,00	754,03	0,47
Com cobertura arbórea, em nível	761,99	778,19	761,26	778,86	0,44
Com cobertura arbórea, em desnível	713,83	752,08	713,90	752,87	0,50
Média					0,44

Na situação mais complexa (com cobertura e em desnível), o RMSE obtido foi de 0,50 m. É importante frisar que os locais escolhidos para a instalação dos perfis não continham vegetação herbácea, que pode ser um fator de erro relevante para áreas florestais com sub-bosque.

4. Considerações Finais

O objetivo proposto foi atingido, ressaltando que a diferença entre o MDT gerado e a referência de campo excedeu os 0,15 m de erro altimétrico nominal – fato esperado em uma área florestal com relevo ondulado e presença de diversos elementos perturbadores no micro-relevo, tais como galhos, troncos, buracos, sulcos, etc. – mas não excedeu os 0,50 m de erro tolerável requerida para a confecção das cartas utilizadas em planejamento florestal. Diante dos resultados apresentados, aceita-se a hipótese inicial, ou seja, o MDT gerado a partir de dados LiDAR apresenta erro altimétrico satisfatório para as demandas presentes no gerenciamento e planejamento florestal.

Sugere-se uma avaliação econômica do uso desta tecnologia no setor florestal, contemplando a cadeia de custos do planejamento florestal como um todo, ou seja, cartas temáticas (estradas, hidrografia, curvas de nível, áreas de preservação permanente, reserva florestal legal, outras fisionomias), planejamento de estradas, de corte/baldeio, atualização cadastral de informações como área, declividade e perímetro e, inventário florestal. Sua viabilização econômica está atrelada a uma mudança de paradigma no planejamento florestal.

Referências Bibliográficas

AXELSSON, P. Processing of laser scanner data/algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 54, n. 2/3. p. 138-147. 1999

BALTSAVIAS, E. P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, n. 54. p. 83-94. 1999

BEHERA, M. D.; ROY, P. S. Lidar remote sensing for forestry applications: The Indian context. **Current Science**, v. 83, n. 11. p. 1320 – 1329. 2002

BRANDALIZE, A. A. **Perfilamento a LASER : Comparação com Métodos Fotogramétricos**. Nota Técnica: Fotogrametria. ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S.A. 2005

CRACKNELL, A. P.; HAYES, L. W. B. **Remote Sensing Yearbook**. Taylor & Francis. London. 1987. 690p.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações**. UFPR. Curitiba/PR. 1994

HARDING, D. J.; LEFSKY, M. A.; PARKER, G. G.; BLAIR, J. B. Laser altimeter canopy height profiles. Methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 76. p. 283-297. 2001

LIU, X. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. **Progress in Physical Geography**, v. 32, n. 1. p. 31–49. 2008

LOCH, R. E. N.; VARGAS, R. M. A.; SCHÄFER, A. G. Filtragem e classificação de pontos laser scanner utilizando o software Terrascan. In: **Geodesia online**, n. 4. 2004. Disponível em: <<http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/2004/04.1/>>. Acesso em: 15 dez. 2008

MACEDO, R. C. Modelo digital de elevação e sua importância em inventários florestais. In: I Seminário Nacional sobre Dinâmica de Florestas, 2008, Curitiba. **Anais...** EMBRAPA, 2008

PINHEIRO, E. S. Comparação entre dados altimétricos *Shuttle Radar Topography Mission*, cartas topográficas e GPS: numa área com relevo escarpado. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 58, v. 01. 2006

SILVÁN-CÁRDENAS, J. L.; WANG, L. A multi-resolution approach for filtering LiDAR altimetry data. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 61. p. 11–22. 2006

SITHOLE, G.; VOSSelman, G. Comparison of Filters. **Report: ISPRS Commission III, Working Group 3**. 29p. 2003

SITHOLE, G.; VOSSelman, G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 59. p. 85–101. 2004

SOININEN, A. **TerraScan User's Guide**. Terrasolid. Finland. 2005. 169p.

STUMPF, K. A. The estimation of forest vegetation cover descriptions using a vertical densitometer. In: **Joint Inventory and Biometrics Working Groups session at the SAF National Convention**, Indianapolis, IN. 1993

TOUTIN, T. Map making with remote sensing data. In: Advanced Research Workshop on Remote Sensing for Environmental Data in Albania: A Strategy for Integrated Management (NATO), 1999, Tirana, Albania. **Proceedings...** 1999. p. 65-87

VERAS, R. de C. **Topografia: Roteiro para cálculo de uma poligonal. Método Analítico**. Universidade Federal do Piauí. Teresina/PI. 1997. 52p.

WRIGHT, J. **Ground and air survey for Field Scientists**. Clarendon Press. Oxford. 1982. 327p.

ZANDONÁ, D. F. Potencial uso de dados Laserscanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR. 2006. 92p.

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; MÜLLER, M.; MARTINS, M. A. R. Avaliação da precisão altimétrica do mapeamento digital a laser em áreas de cobertura vegetal densa In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 757-762. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.21.45>>. Acesso em: 14 dez. 2008