

Avaliação da modelagem tridimensional do tronco de *Pinus elliottii* a partir de dados *laser* terrestre

Evaluation of three-dimensional trunk modeling of *Pinus elliottii* from terrestrial laser data

André Leonardo Bortolotto Buck^{1(*)}

Matheus Nunes Silva²

Christel Lingnau¹

Álvaro Muriel Lima Machado¹

Rorai Pereira Martins Neto¹

Vagner Alex Pesck¹

Resumo

Este trabalho teve como objetivo realizar a cubagem de uma árvore utilizando modelagem tridimensional da nuvem de pontos *laser scanner* terrestre e comparar os resultados com a cubagem rigorosa tendo o valor obtido no xilômetro como parâmetro para validação. O objeto de estudo foi um indivíduo de *Pinus elliottii* de um povoamento inequiano. A árvore foi submetida a varredura múltipla com *laser scanner* terrestre e mensurada em campo após ser derrubada. Para facilitar a operacionalização no xilômetro o tronco foi dividido em seções (toras) de um metro de comprimento. A modelagem tridimensional consistiu em duas etapas: pré-processamento e processamento da nuvem de pontos. Modelos tridimensionais das toras foram construídos com rede triangular irregular possibilitando a obtenção dos volumes e a comparação com a cubagem de Huber (fita métrica e suta). A avaliação dos resultados indica que os volumes, utilizando a modelagem tridimensional de dados *laser*, foram mais próximos do valor paramétrico nas seções iniciais livres de galhos e acículas. Para as demais seções, o método de Huber utilizando dados da suta é apontado como mais adequado. Foi possível constatar que na parte superior da árvore a alta densidade de acículas impediu que a varredura *laser* alcançasse a superfície do tronco, impossibilitando a modelagem tridimensional. O desenvolvimento da filtragem automática de pontos que não representam a superfície do tronco e a reconstrução da parte superior da árvore devem ser aprimorados para melhoria dos resultados obtidos na modelagem tridimensional.

Palavras-chave: Modelagem tridimensional; *laser scanner* terrestre; volume do tronco; xilômetro.

1 Universidade Federal do Paraná – UFPR; Endereço: Av. Lothário Meissner, 900, CEP: 80210-170, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mails: andre.buck@sulflorestas.com.br (*) Autor para correspondência / lingnau@ufpr.br / alvaroml@ufpr.br / vagnerapesck@hotmail.com

2 SF Consultoria - Sul Florestas; Endereço: Avenida Papa João XXIII, 740, CEP: 88505-200, Lages, Santa Catarina, Brasil. E-mail: matheus.silva@sulflorestas.com.br

Recebido para publicação em 23/07/2012 e aceito em 11/09/2012

Ambiência Guarapuava (PR) v.8 Ed. Especial p. 549 - 557 Outubro 2012 ISSN 1808 - 0251
DOI:10.5777/ambiencia.2012.04.09

Abstract

This study aimed at performing the cubage of a tree using the three-dimensional modeling of a terrestrial laser scanner point cloud and compare the results with the cubage using the value obtained in xylometer as parameter for validation. The object of study was an individual of *Pinus elliottii*. The tree was subjected to multiple scan with terrestrial laser scanner and measured in the field after overthrown. To facilitate the operationalization in xylometer the trunk was divided into sections (logs) of a meter long. The three-dimensional modeling consisted of two stages: pre-processing and processing the point cloud. Three-dimensional models were built of logs with triangular irregular network enabling the achievement of volumes compared to cubage Huber (tape measure and calipers). The evaluation of results indicates that the volume measurements obtained by using three-dimensional modeling of laser data was closer to the parametric value in the initial sections of the trunk, till the free section of branches. For other sections, the method using data from Huber caliper is pointed out as more appropriate. It was found that at the top of tree the high density of needles prevented the scanning laser to reach the surface of the trunk, and thus preventing the three-dimensional modeling. The development of automatic filtering of points which do not represent the surface of the trunk and the reconstruction of the top of the tree should be studied to improve the results obtained in three-dimensional modeling.

Key words: three dimensional modeling; terrestrial laser scanner; trunk volume; xylometer.

Introdução

A quantificação de recursos florestais se fez necessária em meio a um cenário de elevação do valor da madeira e de seus produtos, vinculado à considerável redução dos maciços florestais na Europa, berço da dendrometria (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006).

O volume do tronco foi alvo de pesquisadores na área florestal, os quais desenvolveram métodos de cubagem para obtenção desta variável (*Smalian, Huber, Newton, Hohenadl* entre outros). Em estudos confrontando métodos de cubagem absolutos com o valor paramétrico do volume do tronco de *Pinus* spp. foi demonstrado que a cubagem por *Huber* apresenta-se como melhor fórmula

para se obter o volume acurado (MACHADO; NADOLNY, 1991; FIGUEIREDO FILHO et al., 2000).

Segundo Machado e Figueiredo Filho (2006), considera-se como valor paramétrico ou volume verdadeiro aquele obtido pelo método de Deslocamento da Água (xilômetro). Assim, fórmulas e métodos que resultam os denominados volumes reais, são na verdade, estimativas do volume verdadeiro.

Avanços tecnológicos têm proporcionado a introdução de diferentes equipamentos para se obter diâmetros, alturas e até mesmo volume de árvores em pé, dentre estes, cabe destaque aos sistemas *laser scanner* terrestre (LICHTI et al., 2000, 2002), que tem apresentado potencial do uso na mensuração de árvores.

O grande benefício de se utilizar a tecnologia *laser scanner* é a possibilidade de automatização de procedimentos de coleta e processamento dos dados dendrométricos, eliminando possíveis erros humanos advindos da coleta e disponibilizando medidas sem que ocorra o abate da árvore.

Em campo a varredura de dados *laser* pode ser realizada de forma simples ou múltipla. Na varredura simples a aquisição dos dados será de parte do fuste, enquanto que na varredura múltipla é possível se obter o fuste completo (THIES; SPIECKER, 2004).

Ao se trabalhar com a varredura múltipla é possível realizar a reconstituição do objeto em três dimensões utilizando técnicas de triangulação entre pontos (ASCHOFF et al., 2004). O ajuste de cilindros na nuvem de pontos para obtenção da forma do tronco foi proposto por Pfeifer et al. (2004) e Pfeifer e Winterhalder (2004). Algoritmos para a modelagem da área transversal em fatias ao longo do fuste foram descritos pelos autores Pereira e Pereira (2009), Brolly e Király (2009), e Király e Brolly (2010).

Este trabalho teve como objetivo realizar a cubagem de uma árvore utilizando modelagem tridimensional da nuvem de pontos *laser scanner* terrestre e comparar os resultados com a cubagem rigorosa tendo o valor obtido no xilômetro como parâmetro para validação.

Objeto de Estudo

Para realização deste estudo foi selecionada uma árvore de *Pinus elliottii* Engelm. de um povoamento inequiâneo, estabelecido pela dispersão de sementes de indivíduos próximos, caracterizado pelo espaçamento irregular entre árvores e densidade heterogênea. A árvore estudada

apresentava altura total (h) de 17,1 metros, galhos secos da base até 60% de h e sua copa composta por galhos verdes com alta densidade de acículas até o ápice. Uma poda parcial foi realizada até quatro metros de altura.

Metodologia

A metodologia do estudo consistiu na obtenção da volumetria do tronco por meio de três métodos distintos: varredura *laser scanner* terrestre; cubagem rigorosa; deslocamento de água (xilômetro).

Varredura Laser Scanner Terrestre

A utilização do equipamento *laser scanner* terrestre aplicado a estudos de volumetria de uma árvore obedece basicamente uma sequência de etapas que podem ser definidas como: levantamento em campo; pré-processamento e processamento da nuvem de pontos.

Levantamento em Campo

O *laser scanner* terrestre Leica HSD3000 foi utilizado para a aquisição da nuvem de pontos de coordenadas tridimensionais.

Em campo, o equipamento foi posicionado de forma a coletar a maior quantidade de pontos da superfície do tronco. Três estações *laser* foram utilizadas para o recobrimento total da árvore, caracterizando assim um levantamento de pontos de varredura múltipla. Quando se utiliza a varredura múltipla o emprego de alvos é necessário à etapa de registro das nuvens de pontos adquiridas em diferentes estações. Desta forma, três alvos foram posicionados em campo ao entorno da árvore como

referência espacial à união da nuvem de pontos. O primeiro foi alocado em uma altura de aproximadamente 0,15 metros, o segundo a 1,5 metros e o terceiro a 2,5 metros em relação ao solo. Os alvos foram dispostos de maneira que fossem visualizados de todas as estações de varredura.

A distância entre o equipamento e a superfície do tronco foi de aproximadamente a altura total da árvore para as duas primeiras varreduras. A segunda varredura foi realizado do lado oposto (180° em relação ao objeto). A terceira foi realizada a uma distância de cinco metros com o objetivo de obter partes do tronco que não foram contempladas nas estações anteriores. Os parâmetros de varredura: distância vertical entre pontos, distância horizontal entre pontos e range podem ser visualizados na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de varredura laser scanner

Varredura _(m)	Resolução		Range _(m) ¹
	Horizontal (m)	Vertical (m)	
1	0,005	0,010	17
2	0,005	0,010	17
3	0,005	0,010	5

Nota: ¹ Range: garante que existirá pelo menos 1 ponto da resolução pré-definida para determinada distância

A resolução da varredura do tronco diferencia-se nos sentidos horizontal/vertical devido a necessidade de precisão para obtenção de diâmetros ao longo do tronco. As referências espaciais (alvos) foram levantadas individualmente com alta resolução, pontos/0,001 metros (horizontal/vertical), o que possibilita a redução no resíduo da união das varreduras.

Com base nestas configurações cada varredura foi realizada em aproximadamente

25 minutos, incluindo-se neste tempo o levantamento da árvore e dos alvos. Entre cada estação, o tempo de deslocamento e instalação do equipamento foi de aproximadamente 10 minutos.

Pré-processamento

O pré-processamento (detalhes podem ser encontrados em BUCK, 2012) consistiu no registro das varreduras, o qual permite a união das nuvens de pontos em um sistema de coordenadas comum (Figura 1a). O resíduo encontrado no processo de registro foi inferior a 0,004 metros. Como o objetivo deste estudo é apenas analisar a volumetria do tronco, foi necessário identificar e filtrar da nuvem de pontos da árvore apenas os dados que representassem a superfície do tronco. Este procedimento foi realizado utilizando ferramentas de edição da nuvem de pontos (seleção e recorte), (Figura 1b).

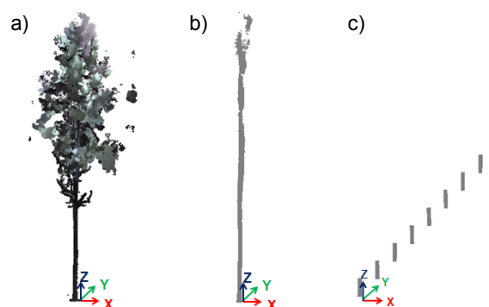


Figura 1. Nuvem de pontos: (a) árvore, (b) tronco filtrado, (c) tronco em seções.

Figure 1. Point Cloud: (a) tree, (b) trunk, (c) sections of the trunk.

Processamento da Nuvem de Pontos

Os dados selecionados na etapa de pré-processamento podem ser caracterizados como uma representação do tronco da árvore (Figura 1b). O modelo tridimensional pode

ser obtido utilizando técnicas de triangulação entre pontos (ASCHOFF et al., 2004).

A modelagem do tronco foi realizada utilizando a nuvem de pontos em seções (toras) de um metro a partir da altura de 0,10 metros da árvore (Figura 1c). Este procedimento foi adotado com a finalidade de comparar os volumes das seções obtidos no modelo tridimensional com os dados de cubagem em campo. O modelo tridimensional das toras (Figura 2) foi produzido empregando rede triangular irregular (EDELSBRUNNER, 2001; ASCHOFF et al., 2004).

florestal (suta e fita métrica), foram efetuados empregando a fórmula de *Huber*, a qual necessita apenas do comprimento e da medida da secção transversal do meio da tora (equação 1).

$$v_t = g_m * l \quad (1)$$

Onde:

v_t é o volume da tora (m^3);

g_m é a área transversal da secção do meio da tora (m^2);

l é o comprimento da tora (m).

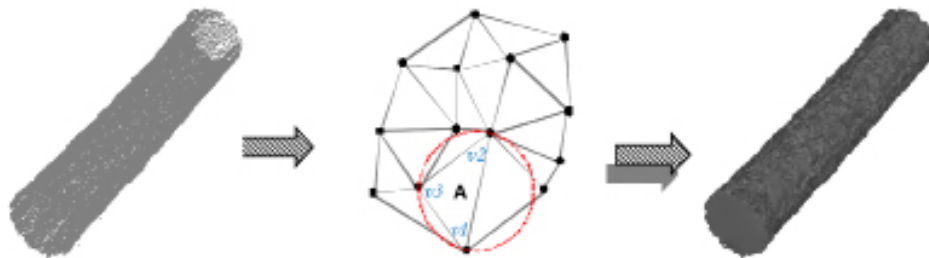


Figura 2. Rede triangular irregular e modelagem tridimensional da primeira seção

Figure 2. Irregular triangular network and three-dimensional modeling of the first section

FONTE: Adaptado de ET SPATIAL TECHNIQUES (2011)

A modelagem tridimensional e o volume dos sólidos do tronco da árvore foram obtidos via processamento computacional em *software* específico.

Cubagem Rigorosa

A árvore foi derrubada e seccionada em toras de um metro de comprimento para a realização da cubagem rigorosa. Este procedimento tem sido tradicionalmente empregado para proporcionar volumes ditos “reais” por meio da utilização de fórmulas matemáticas que utilizam variáveis dendrométricas supostamente obtidas com “rigor” por instrumentos de mensuração no campo. Os cálculos de cubagem rigorosa com os dados coletados em campo na mensuração

O somatório dos volumes dos toretes adicionando o volume da ponta disponibiliza o valor do volume total do tronco. O volume da ponta é definida como um tronco de cone (Equação 2).

$$v_p = \frac{g_n * l_p}{3} \quad (2)$$

Onde:

v_p é o volume da ponta do tronco (m^3);

g_n é a área transversal da secção da base da ponta (m^2);

l_p é o comprimento da ponta (m).

Deslocamento de Água (Xilômetro)

O volume verdadeiro do tronco, valor paramétrico, pode ser alcançado utilizando

o método do deslocamento de água. O instrumento utilizado para este fim é designado na Engenharia Florestal como “Xilômetro”. O princípio do método pode ser entendido de acordo com o seguinte raciocínio: em um recipiente onde o volume inicial de água (pré-imersão da tora) é estabelecido e determinado por certo nível, é possível verificar a mudança de altura da água na escala graduada (pós-imersão do torete) e obter o volume pela quantidade de água deslocada aplicando a equação 3.

$$V_t = V_{i+t} - V_i \quad (3)$$

Onde:

V_t = volume da tora;

V_{i+t} = volume pós imersão da tora;

V_i = volume inicial de água.

Resultados e Discussão

Os resultados da aplicação dos diferentes métodos de obtenção do volume do tronco em seções (toras) de um metro de comprimento podem ser visualizados na figura 3.

De acordo com a ilustração é possível avaliar que a determinação do volume obtido pela modelagem tridimensional a partir dos dados *laser* é muito próxima ao volume determinado pelo xilômetro para as quatro primeiras seções do tronco. A partir da seção número quatro, o volume do tronco é melhor representado pelo método de Huber utilizando os valores de diâmetro obtidos com a suta. O método de Huber utilizando a fita métrica apresenta resultados ligeiramente inferiores ao da curva Huber (suta). O comportamento da curva do modelo tridimensional a partir da quarta seção pode ser atribuído à presença de pontos que não representam a superfície do tronco, como por exemplo, galhos e acículas. Tendo em vista que o povoamento é inequidâneo e sem tratamentos silviculturais, foi realizada uma poda até 4 metros de altura. Acima de quatro metros ainda havia muitos galhos e alta densidade de acículas, dificultando assim a visualização do tronco.

A análise da distribuição dos resíduos foi realizada com base no volume determinado pelo xilômetro (Figura 4). A distribuição de resíduos permite atestar a qualidade

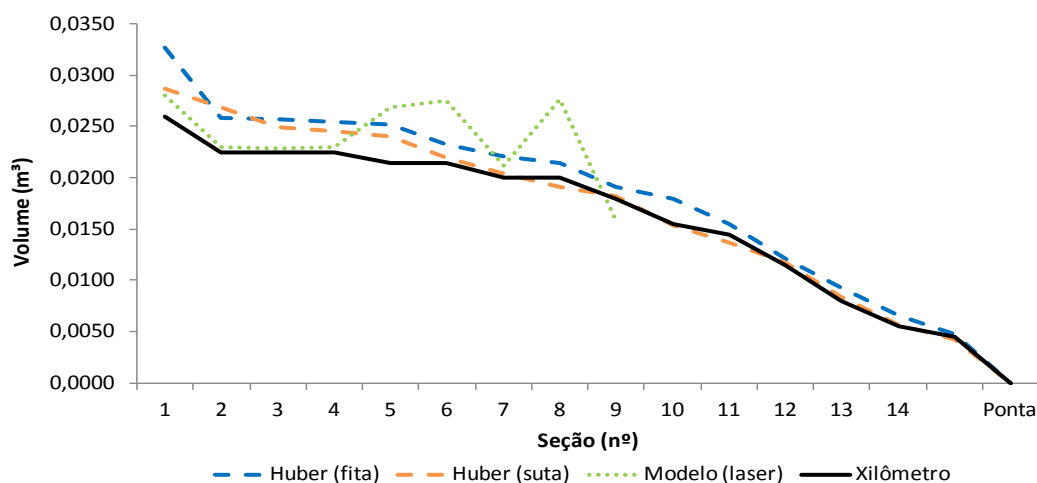


Figura 3. Perfil do tronco obtido por diferentes métodos de determinação de volume

Figure 3. Trunk profile obtained from different volume determination methods

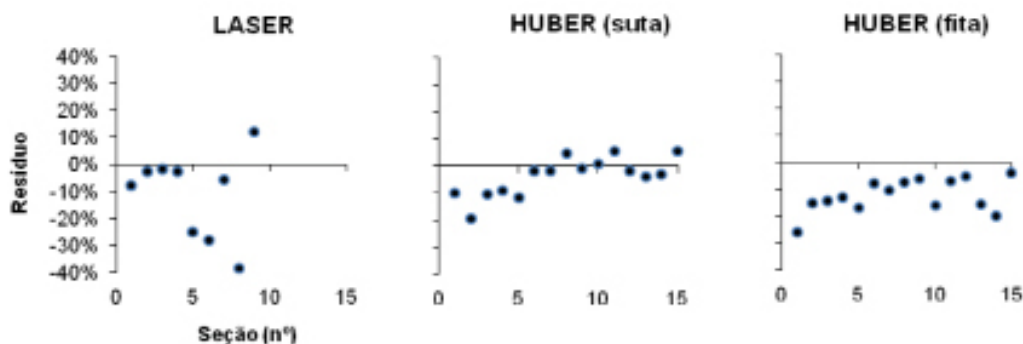


Figura 4. Distribuição de resíduos para os diferentes métodos de cubagem

Figure 4. Distribution of waste to the different cubage methods

dos resultados do modelo tridimensional até o limite compreendido pela seção de número quatro. Após este limite ocorre a superestimação dos volumes no modelo tridimensional até a seção número oito. A seção de número nove é subestimada e ocorre que desta seção em diante a nuvem de pontos não apresentou o formato de tronco da árvore o que impediu a aplicação da modelagem tridimensional deste limite em diante.

O método de Huber utilizando valores de diâmetro levantados com a suta apresentou uma distribuição de resíduos com erros compensantes a partir da sétima seção, contudo superestimou os valores de volume das seções iniciais do tronco (Figura 4). Quando analisado o método de Huber utilizando como valores de referência a circunferência levantada com a fita métrica, é possível constatar a superestimação dos volumes em todas as seções do tronco (Figura 4).

Conclusões

O modelo tridimensional, gerado por varredura laser scanner terrestre, quando comparado com métodos de determinação de

volume convencionais, apresentou resultados mais próximos do valor paramétrico para variável volume nas seções iniciais do tronco, até a seção livre de galhos e acículas.

A presença de galhos inseridos junto ao tronco ocasionou a superestimação do volume obtido do modelo tridimensional. Este fato está ligado a deficiência no processo de filtragem, ficando caracterizado a dificuldade de determinar um limiar entre tronco e galhos.

Na parte superior da árvore a alta densidade de acículas impediu que ocorresse a varredura pelo *laser* diretamente sobre a superfície do tronco, impossibilitando assim sua modelagem tridimensional.

Se considerado que o maior valor comercial de uma árvore para a indústria madeireira encontra-se nas seções abaixo da copa, os valores de resíduo apresentados pelo modelo tridimensional indicam que o método apresenta resultados acurados.

O desenvolvimento da filtragem automática de pontos que não representam a superfície do tronco, bem como a reconstrução da parte superior da árvore, devem ser aprimorados para melhoria do modelo tridimensional.

Referências

- ASCHOFF, T.; SPIECKER, H. Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.36, n.8/w2. Freiburg, 2004.
- ASCHOFF, T.; THIES, M.; SPIECKER, H. Describing forest stands using terrestrial laser-scanning. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.35, comm.5, p.237- 241, 2004.
- BROLLY, G.; KIRÁLY, G. Algorithms for stem mapping by means of Terrestrial Laser Scanning. **Acta Sylvatica et Lignaria Hungarica**, v.5, p.119-130, 2009.
- BUCK, A. L. B. **Análise de métodos de filtragem em dados laser scanner terrestre aplicados à modelagem tridimensional do tronco de *Pinus spp.*** 2012. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, 2012.
- EDELSBRUNNER, H. **Geometry and Topology of Mesh Generation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 209p. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=v6BybEYVGqYC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&ad=0#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 25 out. 2011.
- ET SPATIAL TECHNIQUES - **Triangulated Irregular Network**. Disponível em: <http://www.ian-ko.com/resources/triangulated_irregular_network.htm>. Acesso em: 23 abr. 2011.
- FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S. A.; CARNEIRO, M. R. A. Testing accuracy of log volume calculation procedures against water displacement techniques (xylometer). **Canadian Journal of Forest Research**, v.30, p.990-997, 2000.
- KIRÁLY, G; BROLLY, G. Volume calculations of single trees based on terrestrial laser scanning. In: SILVILASER, 10º, 2010, Freiburg. **Proceedings...** Freiburg, 2010. 1 CD-ROM.
- LICHTI, D. D.; GORDON, S. J.; STEWART, M. P. Ground-based laser scanners: operation, systems applications. **Geomatica**, v.56, p.21-33, 2002.
- LICHTI, D. D.; STEWART, M. P.; TSAKIRI, M.; SNOW, A. J. Benchmark tests on a three-dimensional laser scanning system. **Geomat. Res. Aust**, v.72, p.1-23, 2000.
- MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2 ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2006.
- MACHADO, S. A.; NADOLNY, M. C. Comparação de métodos de cubagem de árvores e de diversos comprimentos de secção. In: CONGRESSO FLORESTAL E DO MEIO AMBIENTE DO PARANÁ, 3., Curitiba, **Anais...** Curitiba. Associação Paranaense de Engenheiros Florestais, Curitiba, 1991, p.89-104.

PEREIRA, A. R.; PEREIRA, R. G. **Extração automática de árvores e áreas de secções transversais a partir de dados laser terrestre.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica) - Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal do Paraná, 2009.

PFEIFER, N.; GORTE, B.; WINTERHALDER, D. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)**, v.35, n.5, part b, p.114 – 119, 2004.

PFEIFER, N.; WINTERHALDER, D. Modelling of tree cross sections from terrestrial laser scanning data with free-form curves. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.36, n.8/w2. Freiburg, 2004.

THIES, M.; SPIECKER, H. Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.36, n.8/w2. Freiburg, 2004.