

ESPACIALIZAÇÃO DO ESTOQUE DE MADEIRA EM PLANTIOS FLORESTAIS USANDO LiDAR (LIGHT DETECTION AND RANGING)

R. de P. Pires^{1,2}, J. F. Ferreira¹, M. A. Figura¹, E. R. Schoeninger¹, A. B. Schikowski¹, Y. Accioly¹

¹Klablin SA, Brasil

² Universidade Federal de Viçosa, Brasil

Comissão IV – Sensoriamento Remoto, Fotogrametria e Interpretação de Imagens

RESUMO

O propósito deste trabalho foi provar a viabilidade de tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) para a espacialização do estoque de madeira, volume comercial, de plantios de *Pinus taeda* L. Para isso, foi gerado um modelo de regressão linear que relaciona as métricas LiDAR com as variáveis de Inventário Florestal Contínuo obtidas em campo. O coeficiente de determinação ajustado (r^2) foi 0,973, e a correlação entre os valores observados e estimados foi de 0,987. Também foi feita uma validação em nível de blocos, onde o volume estimado foi contrastado com a aferição volumétrica através de balança, e as diferenças entre estes dois métodos foram de -10,6% à 3,65%. Assim, este estudo provou a viabilidade da tecnologia LiDAR para aferição do estoque de madeira da floresta, bem como indicar, espacialmente, variações na quantidade de madeira dentro dessa floresta.

Palavras-chave: *Pinus taeda*, Volumetria, LiDAR Aéreo.

ABSTRACT

The purpose of this work was to prove the feasibility of LiDAR (Light Detection and Ranging) technology for the spatialisation of the wood stock, commercial volume, of *Pinus taeda* L. plantations. For this, a linear regression model that relates LiDAR metrics with the Continuous Forest Inventory variables obtained in the field was generated. The adjusted coefficient of determination (r^2) was 0,973, and the correlation between the observed and estimated values was 0,987. A validation was also carried out at the block level, where the estimated volume was contrasted with volumetric measurements through scale, and the differences between these two methods ranged from -10.6% to 3.65%. Thus, this study has proved the viability of LiDAR technology for assessing forest wood stock as well as spatially indicating variations in the amount of wood within that forest.

Keywords: *Pinus taeda*, Volumetry, Airborne LiDAR.

1- INTRODUÇÃO

As florestas plantadas no Brasil somam 7,79 milhões de hectares, correspondem a 0,9% do território nacional, e ainda, são responsáveis por 91% de toda madeira produzida no país (IBA, 2015). Com extensas áreas plantadas, é alta também a demanda por novas técnicas de inventário florestal para aferir informações sobre quantidades e qualidades dos recursos florestais e de outras características das áreas nas quais as árvores estão localizadas (Husch et al., 2003).

Quando se avalia o povoamento florestal sob o ponto de vista de produção, torna-se necessário conhecer quanto, quando, onde e como serão manejados estes indivíduos (ZANDONA et al., 2008). Dessa forma, as empresas devem possuir uma base cartográfica de qualidade e informações cadastrais bem detalhadas compondo seu sistema de informações geográficas, pois só assim é possível uma gestão de

dados com respostas rápidas que demonstrem resultados satisfatórios e mais confiáveis para a companhia.

Sistemas de perfilamento a laser aerotransportado baseados na tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) integrados com Sistemas de Informações Geográficas tornam possíveis, não somente calcular o volume individual da árvore, como também visualizar sua distribuição espacial em todo o povoamento (ZANDONA et al., 2008).

Essa técnica consiste na interpretação de informações geradas a partir do voo da área de interesse com escaneamento a LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), o que resulta em informações da floresta obtidas da faixa do visível com pontos interceptando o terreno e os objetos encontrados na superfície do mesmo, sendo

todos gravados com referências tridimensionais (Peinhopf, 2012).

Resultados como informações de altura, diâmetro e volume das florestas podem ser obtidos e utilizados para, por exemplo, o mapeamento de risco de incêndios em florestas (González-Olabarria et al., 2012) ou de variáveis como estoque de carbono acima do solo de um povoamento florestal ao longo do tempo (Fekety et al., 2015), fornecendo assim informações que podem ser utilizadas em modelos de prognose da produção, além de fornecer parâmetros refinados para o planejamento estratégico das empresas do setor madeireiro (Toloni et al., 2012).

Dessa maneira, o objetivo deste trabalho foi provar a viabilidade da tecnologia LiDAR para aferir o estoque de madeira em florestas plantadas e assim melhorar a qualidade das informações a partir da espacialização do volume de madeira.

2- MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 – Dados utilizados

Foram utilizados dados LiDAR do tipo ALS (*Airborne LASER Scanner*), obtidos em 2012, através de um sistema LiDAR Harrier 681 da Trimble, acoplado a uma aeronave voando a 666,16 metros de altura e 234 km/h, admitindo-se uma variação de 5%. O laser foi emitido a 300 kHz para frequência de varredura e a 130 kHz para a taxa de repetição do laser. O ângulo de varredura (FOV) foi ajustado para 60°, sendo o *footprint* foi de 0,33m. A densidade média de pontos foi de 4 pontos/m². Os dados foram gravados no sistema de coordenadas foi UTM e o datum SIRGAS 2000. A sobreposição lateral do voo foi de 30%, as precisões altimétrica e horizontal de 15 e 10 cm, respectivamente.

Já as medições florestais provêm de parcelas de Inventário Florestal Contínuo (IFC) medidas em datas com até três meses de diferença em relação ao levantamento LiDAR, localizadas no município de Telêmaco Borba, PR e municípios adjacentes (FIGURA 1). Os dados destas parcelas foram cedidos para este estudo pela empresa Klabin SA – Unidade Florestal de Monte Alegre.

A área de onde provêm os dados deste estudo possui altitude variando de 520 a 1020 metros. A temperatura média anual é de 23,0°C e precipitação média anual oscila em torno de 1.470 mm. De acordo com o sistema climático de Köppen, o clima da região corresponde ao subtropical úmido mesotérmico (Cfb), com verões frescos e geadas severas e frequentes. (Fonte: dados históricos da empresa).

As parcelas correspondem a plantios de *Pinus taeda* L., de origem seminal, variando de 4 a 20 anos de idade, plantados no espaçamento de 2,5m por 2,5m. A área de cada parcela é de 625 m² e a intensidade amostral é de uma parcela a cada 15 hectares plantados com a espécie.

Em cada parcela foram mensuradas as circunferências à altura do peito (CAP), a 1,3 metros do solo, de todas as árvores; bem como as alturas das dez árvores da primeira linha. A altura das demais foram obtidas de modo indireto, sendo estimadas via modelos que relacionam as alturas que foram medidas e seus respectivos CAP. O volume comercial foi calculado através da equação polinomial do quinto grau descrita por Schoepfer (1996), que com base no CAP e altura de cada indivíduo traça o perfil longitudinal da árvore, sendo o volume do tronco obtido pela integral da equação, considerando um sólido de revolução (Ahrens e Holbert, 1981).

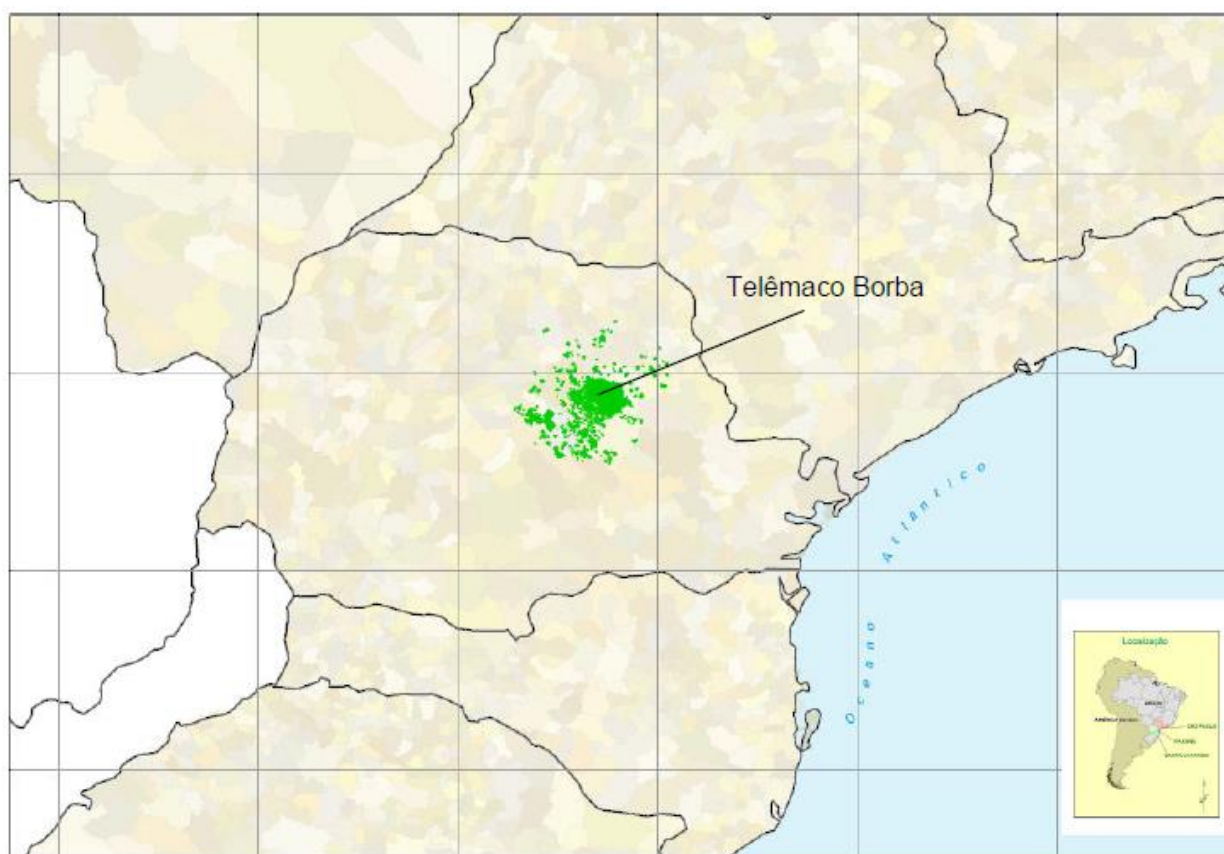


Figura 1 - Localização geográfica da área de estudo, unidade florestal de monte alegre, pertencente à Klabin SA. Fonte: FIGURA (2010).

2.2 – Análise exploratória

Das nuvens de pontos provenientes do voo LiDAR foram extraídas as nuvens de pontos das parcelas. Logo em seguida estas foram normalizadas, processo que compreende em atribuir valor de altura zero aos pontos de solo e interpolar os valores acima, obtendo assim a altura dos retornos acima do solo. Para cada arquivo normalizado obtido foram extraídas as seguintes métricas: percentis (Altura na qual uma determinada porcentagem de retornos se encontra abaixo) e fatias (porcentagem de retornos em faixas de altura, sendo que a nuvem é dividida em dez faixas, começando na altura 0,5m até a altura do maior retorno).

De posse destas métricas e dos dados aferidos na floresta, foi feita a análise exploratória destas variáveis em relação ao volume comercial (Vcom) de cada parcela, buscando sempre as métricas de maior correlação, objetivando a criação de um modelo linear que correlacione as variáveis LiDAR aos dados de campo.

2.3 – Escolha e validação do modelo

O modelo foi escolhido com base na correlação de Pearson das métricas com Vcom, na

dispersão gráfica dos resíduos e no coeficiente de determinação (r^2).

Para validação foram escolhidos seis blocos contínuos de floresta, com idades variando de 11 a 18 anos entre blocos, e datas de colheita variando 3 meses em relação do voo, a fim de se comparar o volume estimado por LiDAR nestas áreas com os registros de pesagem de madeira de cada um dos blocos. Os valores de passagem foram obtidos em toneladas e logo em seguida convertidos para metros cúbicos (m^3) de acordo com o fator de conversão correspondente ao tempo de secagem da madeira em campo.

Estes blocos foram divididos em várias células de cálculo, de 900 m^2 cada. Em cada célula foram extraídas as métricas e o modelo ajustado foi aplicado gerando um resultado de volume comercial por célula. A média dos volumes destas células foi considerada o volume médio por hectare de cada bloco.

Por fim, foram gerados mapas unindo as informações das células de cálculo dos blocos florestais analisados. E estes mapas foram comparados com a nuvem de pontos, a fim de se observar se variações na nuvem refletiam no mapa.

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 – Modelo Volumétrico

O percentil e fatia de maior correlação de Person foram o percentil 45 (p45) e a fatia 10 (f10), com valores de 0,974 e 0,937 respectivamente (Tabela 1). Foram feitas transformações com estas variáveis, bem como com o Volume Comercial de forma a melhorar o desempenho da regressão.

O melhor modelo foi:

$$Vcom = e^{\beta_0 + \beta_1 * \log(P45) + \frac{\beta_2}{\sqrt{f10}}} + \varepsilon \quad (1)$$

Onde:

f10 = Porcentagem de pontos na faixa superior da nuvem.

p45 = Altura abaixo da qual se encontram 45% dos retornos.

Vcom = Volume Comercial.

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = Coeficientes ajustados pelo método dos mínimos quadrados, iguais a, respectivamente, 2,022, 1,484 e -0,362.

O coeficiente de determinação ajustado (r^2) foi 0,973, e a correlação entre os valores observados e estimados foi de 0,987. Zonete (2009) encontrou valores equivalentes para r^2 e correlação (0,957 e 0,956 respectivamente), em plantios origem clonal do gênero *Eucalyptus*, enquanto Nilsson (1996) e Naesset (2004), encontram r^2 de 0,78 e variando de 0,83 a 0,86 respectivamente em seus estudos.

Na validação com os dados de pesagem dos blocos florestais escolhidos, observam-se diferenças entre o volume estimado através do modelo e a pesagem de -10,6% a 3,65%, o que prova a acurácia do modelo volumétrico e a viabilidade da tecnologia para estimativa em nível de bloco contínuo, como observado na Tabela 2.

De modo geral, o inventário florestal é baseado na teoria da amostragem, em que são realizadas as medições de parcelas que estatisticamente devem refletir o todo a que representam. A utilização de dados LiDAR possibilita diretamente a melhoria da qualidade dessa informação, ainda que essas parcelas em campo sejam necessárias para calibração dos modelos.

Tabela 1 - Análise de Correlação (Pearson) entre as principais métricas LiDAR e o volume comercial. P20.h – Altura do Percentil 20; P45.h – Altura do Percentil 45; P80.h – Altura do Percentil 80; P95.h – Altura do Percentil 95; P99.h – Altura do Percentil 99.

	P20	P45	P80	P95	P99	Fatia 10
Volume Comercial	0.973	0.974	0.974	0.963	0.944	0.937

Tabela 2 – Diferença percentual entre os volumes estimados pelo modelo e observados na pesagem da madeira e convertidos para m³.

Bloco	Volume observado (m ³)	Volume Estimado (m ³)	Idade (anos)	Área (ha)	Diferença Percentual
1	95074,88	93913,89	18	158,74	1,22
2	32922,75	32385,46	18	48,62	1,63
3	9992,90	9849,80	15	22,28	1,43
4	6405,07	6171,46	14	15,48	3,65
5	3739,29	4135,72	14	10,39	-10,60
6	6545,88	6399,70	16	16,95	2,23

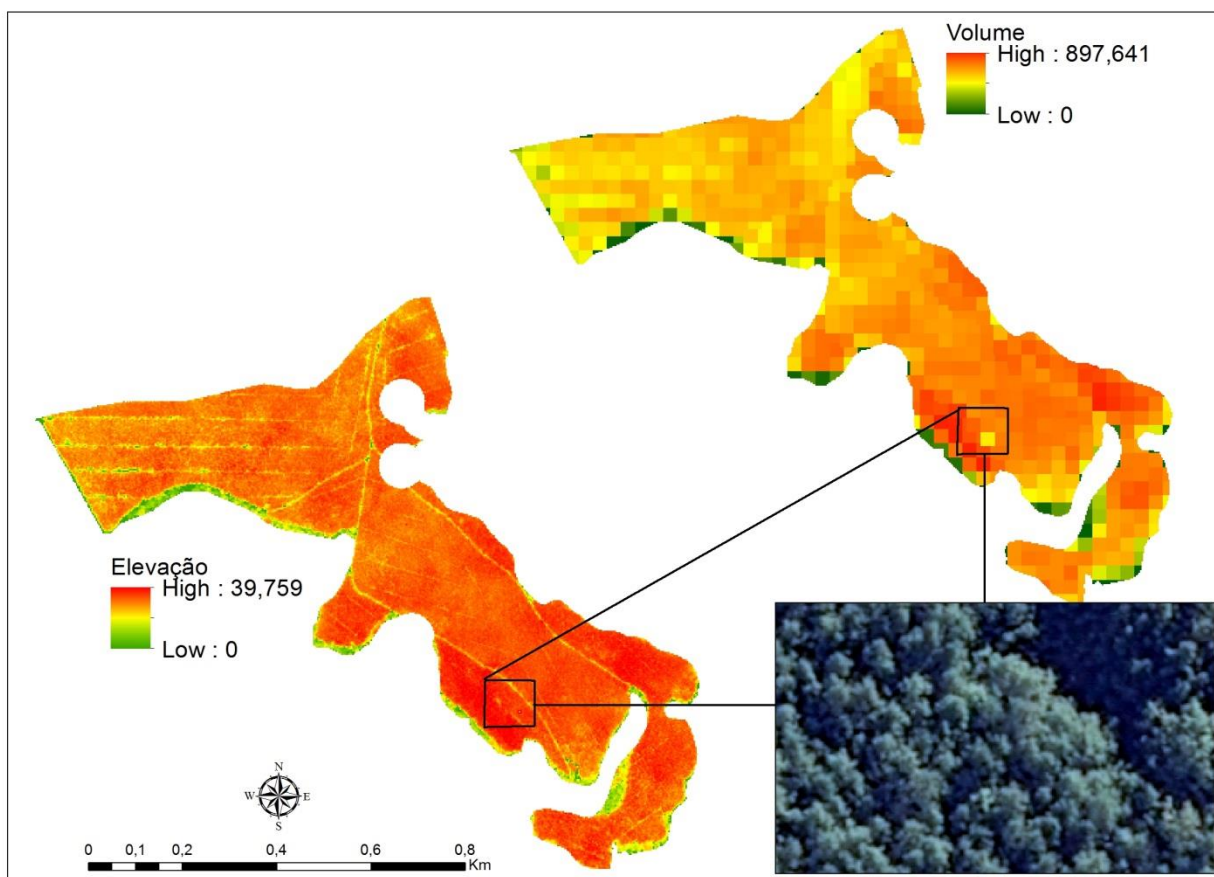


Figura 2 – Elevação (m) do retorno dos pontos do LiDAR da área de estudo e volume (m³/hectare) em uma resolução de 30m.

3.2 – Mapeamento do Estoque de madeira

Fekety et al. (2015) e González-Olabarria et al. (2012) usaram a tecnologia LiDAR para mapear mudanças no estoque de carbono ao longo do tempo e também risco de incêndios em povoamentos florestais, contudo, neste estudo os mapas gerados por bloco florestal tem a finalidade de auxiliar a tomada de decisão do planejamento quanto as operações florestais, uma vez que esta informação reflete na concentração de madeira por região da mesma plantação. Com essa mesma finalidade, Toloni *et al.* (2012) gerou mapas com a distribuição espacial do volume em células de 1200 m² obtendo bons resultados.

4- CONCLUSÃO

Com base no presente estudo foi possível evidenciar a eficiência das estimativas do volume baseadas em dados LiDAR, e também abrir a possibilidade da espacialização dessa variável para futuras utilizações, como auxílio na tomada de decisão do planejamento florestal, uma vez que o inventário de campo por si só não é capaz de indicar a distribuição espacial do estoque de madeira.

AGRADECIMENTOS

À empresa Klabin SA. por ter possibilitado o desenvolvimento deste trabalho, bem como a toda gerencia de Pesquisa & Desenvolvimento e Planejamento pela colaboração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, S.; HOLBERT, D. Uma função para forma de tronco e volume de *Pinus taeda* L. Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, n. 3, p. 37-68, 1981.

FEKETY, P. A. FALKOWSKI, M. J. T. HUDAK, A. T. Temporal transferability of LiDAR-based imputation of forest inventory attributes. *Canadian Journal of Forest Research*. v. 45. p422–435. 2015.

FIGURA, M.A. A DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL NA DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DIAMÉTRICA DE *Eucalyptus grandis*: UM ENFOQUE SOBRE O MÉTODO DOS MOMENTOS. 2010. 95p. Dissertação (Metrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

HUSCH, B. MILLER, C. I. KERSHAW, J. *Forest Mensuration*. 4. Ed. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2003. 443 p.

IBA – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório 2015, São Paulo. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf>. Acessado em Julho de 2017.

NAESSET, E. Practical large-scale forest stand inventory using small-footprint airborne scanning laser. *Scand J Fore Res* 19: 164–179, 2004.

NILSSON, M. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. **Remote Sens Environ** 56:1–7. 1996

José-Ramón GONZÁLEZ-OLABARRIA, J. R. RODRÍGUEZ, F. FERNÁNDEZ-LANDA, A. MOLA-YUDEGO. B. Mapping fire risk in the Model Forest of Urbión (Spain) based on airborne LiDAR measurements. **Forest Ecology and Management**. v. 282, p149–156. 2012.

PEINHOPF, C. **Determinação de variáveis dendrométricas de Eucalyptus urograndis com dado LiDAR aerotransportado**. 2012. 68 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR.

SCHOEPFER, W. Automatisierung des masen, Sorten und Wertberechnung stenender Waldbestände Schriftenreihe Bad. Berlin Wurt-Forstl. 1996. n.p.

TONOLLI, S. DALPONTE, M. VESCOVO, L. RODEGHIERO, M. BRUZZONE, L. GIANELLE, D. Mapping and modeling forest tree volume using forest inventory and airborne laser scanning. **European Journal of Forest Research**. V. 130. p569–577. 2011.

ZANDONA, D. F. LINGNAU, C. NAKAJIMA, N. Y. Varredura a Laser Aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v.36, n.80, p. 295-306, dez. 2008.

ZONETE, M. F. **Análise do uso da tecnologia laser aerotransportado para inventários florestais em plantios clonais de Eucalyptus sp. no sul da Bahia**. 2009. 95 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.