

Inventário florestal com tecnologia *laser* aerotransportada de plantios de *Eucalyptus spp* no Brasil

Forest inventory with airborne laser technology of *Eucalyptus spp* plantations in Brazil

Luiz Carlos Estraviz Rodriguez¹

Jefferson Lordello Polizel²

Silvio Frosini de Barros Ferraz³

Matheus Felipe Zonete⁴

Maria Zelia Ferreira⁵

Resumo

O presente artigo faz uma breve apresentação e análise da informação gerada pela tecnologia laser aerotransportada LIDAR em um levantamento das características altimétricas em plantios clonais de *Eucalyptus* no Sul da Bahia, Brasil. Uma revisão dos princípios da tecnologia LIDAR é seguida de uma descrição dos dados gerados para um subconjunto de parcelas amostrais sobrevoadas em Setembro de 2008. Os resultados do levantamento LIDAR são apresentados conjuntamente com os dados de medições convencionais de inventário florestal realizadas no campo. Considerando-se a alta precisão observada para os parâmetros diretamente relacionados com a altura das árvores, e o potencial de redução significativa da intensidade amostral de campo, barateando assim o custo final das atividades de inventário florestal, justifica-se o uso dessa tecnologia aerotransportada. Assim, será possível reduzir os extenuantes e, por vezes, imprecisos e ineficientes procedimentos de campo usados em levantamentos de extensas áreas florestadas.

Palavras-chave: LIDAR; laser aerotransportado; inventário florestal; planejamento florestal.

1 Livre-docência; Engenheiro Agrônomo; Professor do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ-USP; Avenida: Pádua Dias, 11 - LCF, 13.418-900 - Piracicaba, SP, Brasil, E-mail: luiz.estraviz@esalq.usp.br

2 Dr.; Técnico em informática da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ-USP; E-mail: jpolize@esalq.usp.br

3 PhD; Engenheiro Florestal; Professor do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ-USP; E-mail: sfbferra@esalq.usp.br

4 Engenheiro Florestal; SAVCOR Forest Group, Avenida João Guilhermino, 261, cj. 152, 12.210-131 – São José dos Campos, SP, Brasil; E-mail: matheus.zonete@savcor.com

5 MSc.; Engenheira Florestal; VERACEL Celulose S.A., Caixa Postal 23, 97.820-970 - Eunápolis, Bahia, Brasil; E-mail: maria.zelia@veracel.com.br

Abstract

This paper briefly presents and evaluates the information produced by the LIDAR airborne laser technology used to assess altimetric characteristics in cloned plantations of Eucalyptus in Southern Bahia, Brazil. A revision of the main principles of the LIDAR technology is followed by the description of data generated for a sub set of sample plots assessed in September 2008. The LIDAR assessment results are jointly presented with forest inventory data produced by conventional field measurements. Considering the observed high accuracy of the parameter directly related to tree height, and the significant potential of reduction of intensity in sample field, lowering forest inventory total costs, the use of the airborne technology is justifiable. Therefore, it will be possible to reduce the tiresome, and many times imprecise and inefficient, field procedures used to assess in extensive forest areas.

Key words: LIDAR; airborne laser; forest inventory; forest planning.

Introdução

Os métodos dendrométricos, usados para a mensuração de características florestais como, por exemplo, a altura média das árvores e volume de madeira e biomassa, vêm sendo desenvolvidos há décadas por gerações de profissionais da área florestal. Mais especificamente, esses métodos estimam as características biofísicas de uma floresta, a partir da medição direta de árvores individuais em parcelas amostrais representativas da população de árvores que constituem a floresta. A dendrometria, usada de forma recorrente em inventários florestais, vem se modernizando com os frequentes avanços tecnológicos nas áreas da física ótica, da transmissão remota de dados e da informática em geral. Todavia, apesar de especialistas reconhecerem que a tecnologia laser aerotransportada é uma das mais promissoras para a dendrometria, o seu uso prático é, de fato, ainda pouco disseminado.

É curioso, entretanto, observar que em outras áreas o uso dessa tecnologia

já é corriqueiro e ocorre há vários anos, devido aos perceptíveis ganhos de precisão e eficiência. São bons exemplos os casos nos quais o mapeamento altimétrico de extensas áreas é essencial. Nesses casos, o melhor exemplo é o emprego de técnicas de varredura, rastreamento ou perfilhamento a *laser* ou LIDAR (do inglês *Light Detection And Ranging*), como também são conhecidas as tecnologias laser aerotransportadas. Podem ser citados também os estudos em projetos de expansão e manutenção de redes viárias e de transmissão elétrica, e em estudos envolvendo a construção de hidroelétricas.

Apesar de as aplicações florestais serem ainda poucas no Brasil, aplicações LIDAR florestais se encontram consolidadas há anos na Escandinávia e na América do Norte. Nessas regiões o perfilhamento a laser de extensas superfícies com cobertura florestal, para fins de quantificação e qualificação da biomassa, mostra-se, técnica e economicamente justificado há vários anos. É de se esperar que, no Brasil, isso também ocorra, pois já se observa queda no custo dos principais itens dessa tecnologia,

crescente disponibilidade de rotinas de processamento de dados específicos para as nossas condições e necessidades, e um número maior de técnicos habilitados e melhor qualificados para o uso desses recursos em levantamentos silviculturais e em atividades de monitoramento biométrico.

De fato, a tecnologia já existe no Brasil, mas as rotinas de processamento e análise de dados ainda não foram devidamente padronizadas e adequadas à realidade dos plantios florestais voltados para o abastecimento industrial. Assim que os primeiros procedimentos sistematizados comecem a se mostrar precisos e eficientes, a adesão de grandes e médios empreendimentos florestais se fará com grande velocidade. Os principais equipamentos que constituem a tecnologia *laser* aerotransportada são importados, mas esse não é o principal obstáculo à sua utilização. De fato, o que tem impedido a sua disseminação é a ainda incipiente disponibilidade, entre os profissionais da área, de programas e rotinas computacionais prontas para o processamento do massivo volume de dados gerados pelos sobrevoos de maciços florestais. Todavia, é necessário registrar, no Brasil, as seguintes experiências recentes com levantamentos LIDAR na área florestal: Zonete et al. (2010), Macedo (2009) e Zandoná et al. (2007).

Nelson et al. (1984), na América do Norte e Næset (1997a, 1997b), na Europa, são precursores do uso da tecnologia LIDAR como ferramenta aerotransportada para estudos altimétricos em avaliações florestais. Ambos, apesar da distância e do tempo que separa as suas primeiras publicações, ajudaram a consolidar os alicerces que hoje estruturam as aplicações da varredura *laser* para a estimação de parâmetros florestais, como a altura média de árvores e volume de madeira

em extensas áreas. Na Escandinávia, o seu uso em escala operacional na área florestal já é uma realidade desde 2002, e avaliações científicas rigorosas do desempenho desse método têm demonstrado precisão comparável aos convencionais métodos que envolvem intenso trabalho de campo. Nessa parte da Europa, onde as aplicações florestais se encontram mais arraigadas, o custo se mostra comparável aos métodos convencionais baseados em estéreo fotogrametria e fotointerpretação (PACKALEN; MALTAMO, 2007, 2008).

Os resultados mais recentes das experiências do Serviço Florestal norte-americano com a tecnologia LIDAR demonstram adequação às necessidades dos levantamentos e podem ser encontrados em Reutebuch et al. (2003); Andersen et al. (2005); e Andersen et al. (2006). É de um membro desse grupo de pesquisadores, inclusive, a autoria de uma excelente introdução ao uso da tecnologia LIDAR na área florestal (MCGAUGHEY, 2010), principal referência para o conjunto de programas de livre acesso desenvolvidos e distribuídos por esse pesquisador e Reutebuch et al. (2010).

A tecnologia LIDAR aerotransportada pode ser vista como um conjunto de quatro instrumentos: a unidade de emissão e recebimento *laser* acoplada à aeronave; as unidades de posicionamento global (GPS) no avião e no chão; um sensor inercial (IMU) acoplado à unidade *laser* para medir *roll*, *pitch* e *yaw* (guinada, arfada e rolamento) e um computador para controlar o sistema e armazenar os dados (MCGAUGHEY, 2010). Os emissores *laser* aerotransportados atuais emitem até duzentos mil pulsos de luz por segundo, iluminando qualquer superfície que se interponha no seu caminho.

Os sistemas LIDAR, de uso tipicamente florestal, são geralmente do

tipo *discrete-return small-footprint*. O termo *discrete-return* descreve a forma como o laser é emitido em pulsos com certa frequência, formando uma série discreta (não contínua) de emissões e retornos. O termo *small footprint* define a relativamente pequena dimensão da área instantaneamente iluminada pelo pulso laser (círculos com diâmetros entre quinze e noventa centímetros). Basicamente, ao serem usados em aplicações florestais, esses sistemas permitem o posicionamento preciso em três dimensões de superfícies reflexivas no solo e nos elementos constituintes da vegetação (folhas, ramos e troncos).

Para gerar medidas de posicionamento, o sistema laser mantém, integrado à unidade emissora, um sensor que captura a luz refletida e calcula o tempo decorrido entre a emissão e a detecção. Esse intervalo é usado para computar a distância percorrida entre a unidade *laser* e o solo. As unidades GPS e IMU determinam a precisa localização e altitude da unidade *laser* no momento da emissão, e uma exata coordenada é calculada para cada ponto. A unidade *laser* usa um espelho ou prisma oscilante para que o feixe de pulsos forme um leque e varra uma determinada faixa sob a aeronave, bastando uma série de sobrevoos em linhas paralelas para que áreas mais largas que essa faixa seja integralmente cobertas.

Um mesmo pulso, ao ser emitido, pode encontrar as seguintes situações: (i) ser integralmente interceptado e refletido por uma única superfície no dossel, produzindo um único retorno, (ii) ser parcialmente interceptado a diferentes alturas antes de atingir o solo, produzindo um primeiro retorno e vários retornos intermediários; (iii) ser interceptado a diferentes alturas, produzindo retornos intermediários e um último retorno no nível do solo; e (iv)

atravessar o dossel e ser integralmente refletido no solo, produzindo um único retorno.

Para cada pulso, o sistema LIDAR identifica e armazena as leituras de primeiro retorno (r_p), de retorno intermediário (r_i) e de último retorno (r_u), produzindo um arquivo de dados que pode ser segmentado de diferentes formas. Para a modelagem digital de terreno é de se imaginar que apenas as alturas de r_u sejam necessárias, enquanto que, para alturas de árvores, a diferença entre as alturas de r_p e r_u seja mais útil. As alturas de r_i são geralmente desconsideradas, pois acabam introduzindo mais ruído nas análises do que ganho de qualidade.

Resumidamente, a precisa determinação de altura e localização dos pulsos produz medidas diretas em três dimensões da superfície terrestre. Esses milhões de medidas armazenadas criam uma nuvem tridimensional que, processada por programas específicos, permite em pouco tempo, a obtenção de resultados que técnicas de mapeamento anteriores levariam meses ou até anos. O aparente custo alto, observado quando o levantamento com o sistema LIDAR é feito em pequenas áreas, deixa de existir quando extensões maiores são sobrevoadas. Nesses casos o valor, hoje, pode cair para valores inferiores a U\$ 5/ha.

Em aplicações florestais, o levantamento LIDAR é usado para extrapolar medições convencionais, feitas em parcelas amostrais, para o nível de povoamento. As parcelas, distribuídas nas áreas sobrevoadas, produzem estimativas de altura, volume, área basal etc. que, de acordo com princípios alométricos – ou leis da proporcionalidade do crescimento – podem ser extrapoladas para o povoamento. Dessa forma, um levantamento LIDAR, sob condições de trabalho menos arriscadas

e extenuantes, permite menor intensidade amostral no campo e gera, em nível de povoamento, estimativas tão ou mais precisas que os métodos convencionais.

Várias métricas calculadas a partir do processamento das alturas de primeiros e últimos retornos (r_p e r_u) vêm sendo utilizadas em levantamentos florestais. A alta correlação entre as alturas de r_p e a altura das árvores já é conhecida há vários anos, assim como a importância de se dar maior peso às maiores alturas de r_p obtidas (NÆSSET, 1997). Em termos práticos, isso significa que, do grande número de dados gerados em um levantamentos LIDAR, apenas os r_p mais altos por unidade de área deveriam ser retidos para análise. Essa constatação revelou a importância do conceito de percentil para a maioria das análises e métricas propostas (MAGNUSSEN; BOUDEWYN, 1998). Em aplicações LIDAR, o percentil q identifica, por exemplo, o valor da altura de r_p abaixo do qual estão $q\%$ de todos os valores. Ou seja, se um levantamento apresenta percentil 90% igual a 34 metros, é de se esperar que apenas 10% dos primeiros retornos observados tenham valor superior a 34 metros. Além de estimativas precisas para a altura de árvores em povoamentos florestais, os levantamentos LIDAR também têm se mostrado úteis para a estimação da área basal e do volume em nível de talhão (LIM et al., 2003; NÆSSET et al., 2004; REUTEBUCH et al., 2005; MALTAMO et al., 2007; PACKALEN e MALTAMO, 2007).

Em vários dos trabalhos citados, a tecnologia LIDAR tem resultado em estimativas de parâmetros florestais onde os modelos de predição capturam de 80% a 99% da variação observada no campo. Esses trabalhos tratam de povoamentos com características bastante diferentes dos

plantios de *Eucalyptus* encontrados no Brasil. A mesma confiabilidade das estimativas, entretanto, também foi encontrada quando se utilizou a tecnologia laser aerotransportada em atividades de inventário para plantios de *Eucalyptus* em Portugal (WACK et al., 2003).

Além de aplicações na América do Norte e Europa, resultados semelhantes, também são encontrados para plantios de *Eucalyptus* na África do Sul, por exemplo, onde o LIDAR vem sendo investigado para reduzir os custos das atividades de inventário sem perder a precisão oferecida pelos métodos convencionais. Nesse caso, os dados LIDAR permitiram, inclusive, estimar o número efetivo de fustes por hectare para plantios de *E. grandis* (TESFAMICHAEL et al., 2009). Já no Brasil, apesar de ainda recentes, as aplicações vêm igualmente apresentando bons resultados preliminares. Zandoná et al. (2007), utilizando um equipamento Optech ALTM 2050 a 1200m de altitude, utilizou os dados LIDAR para estimativas volumétricas em nove parcelas instaladas em um plantio de *Pinus sp.* de quarenta anos de idade, numa área de 28,9 ha no município de Pinhais, estado do Paraná. O algoritmo utilizado por esses autores para contagem de árvores mostrou bons resultados (percentual médio de acerto do número de árvores dominantes por parcela de 95,9%). O método para determinação da altura média da parcela, nesse trabalho, mostrou tendência de subestimação do valor real e confirmou tendência já demonstrada na literatura internacional. Os resultados para delimitação de copa foram considerados satisfatórios pelos autores, sendo que a estimação do DAP com base na área de copa e altura foi apenas razoável. Macedo (2009), também utilizando um equipamento Optech ALTM 2050, mas a uma altitude de mil metros

m e footprint de 0,25m, analisou a informação gerada para plantios clonais de *Eucalyptus spp.* com quatro anos de idade, no município de Igaratá, em São Paulo. O levantamento em vinte parcelas, totalizando 1210 árvores e uma área de 7.713m², resultou em percentual de erro de -3,52% para quantidade de árvores, -2,26% para altura, +19,36% para área de copa, +5,33% para DAP e -1,8% para volume. Segundo este autor, o levantamento LIDAR gerou erro amostral e intervalo de confiança para a estimativa de volume dentro dos mesmos limites de tolerância estipulados para os levantamentos convencionais. Para plantios clonais de *E. Urograndis* no sul da Bahia, Zonete et al. (2010), usando como variáveis preditivas os diferentes percentis dos dados LIDAR, obteve bons resultados ao ajustar modelos para a estimação do diâmetro médio ($R^2=0,88$), da altura média ($R^2=0,94$), da altura dominante ($R^2=0,96$), da área basal ($R^2=0,92$), e do volume ($R^2=0,95$).

Para melhor ilustrar o uso da tecnologia LIDAR, como ferramenta de inventário em plantios de *Eucalyptus*, este trabalho apresenta, nas próximas seções, a análise de um subconjunto de dados usados por Zonete et al. (2010) nas suas avaliações.

Material e Método

A área de estudo é constituída por plantações de *Eucalyptus* no estado da Bahia, Brasil, localizadas entre os paralelos 16° e 17° de latitude Sul, e 39° e 39° 30' de longitude Oeste. No sistema referencial de localização terrestre da projeção UTM, a maioria dos referidos plantios se encontra restrita à zona 24 S. O relevo predominante não influencia significativamente o clima da

região, que se caracteriza por ser suavemente ondulado, variando entre os cinquenta e duzentos metros de altitude. Segundo a classificação de Koppen, a região se enquadra no tipo climático Af tropical quente e úmido, apresentando temperaturas médias mensais superiores a 18°C e balanço hídrico praticamente positivo em todos os meses. Essas características, somadas à qualidade dos solos e à eficiente silvicultura empregada, resultam em um dos mais produtivos plantios de *Eucalyptus* do mundo.

As parcelas utilizadas neste trabalho, para ilustrar a utilização da tecnologia LIDAR em plantios de *Eucalyptus*, fazem parte de um conjunto de 195 parcelas circulares de 26 metros de diâmetro sobrevoadas em setembro de 2008. O conjunto completo considera as parcelas três e quatro efetivamente distribuídas em cada um dos 55 talhões florestais para representar diferentes idades e índices de sítio. O posicionamento do ponto central de cada parcela foi obtido a partir de leituras feitas em um Trimble GPS Pathfinder XRS e da correção diferencial em tempo real que utilizou dados gerados pelos satélites orbitais do grupo OmniSTAR (<http://www.omnistar.com/>). A área total dos 55 talhões é de aproximadamente 6.700 hectares, onde se encontravam plantados 28 diferentes clones do híbrido *E. urograndis*. Na região, esses plantios chegam a apresentar incremento médio superior a 60m³/ha/ano (SILVERIO et al., 2007).

Os dados coletados em cada parcela incluíram o diâmetro à altura do peito (DAP) de todas as árvores, e a altura (*H*) de uma a cada sete árvores. As árvores com alturas não medidas tiveram esse parâmetro estimado a partir de uma relação $H=f(DAP)$ ajustada

para os dados coletados. A altura das árvores dominantes (HD) foi estimada com base nas árvores dentro da parcela que representam os cem maiores diâmetros por hectare.

Os dados levantados nas parcelas permitiram a estimação dos seguintes parâmetros: diâmetro médio à altura do peito (DAP_m), altura média (H_m), altura média das árvores dominantes (HD_m), número de fustes (N), área basal (G) e volume (Vol). O volume dos fustes foi estimado a partir de uma relação $V=f(DAP,H)$ ajustada para cada idade e grupo clonal. O conjunto de parâmetros calculados para as parcelas selecionadas (duas para cada idade) são apresentados na tabela 1.

Em datas próximas às medições das parcelas (entre 5 e 9 de setembro de 2008), os dados LIDAR foram coletados com um sistema laser Optech ALTM 3100. Foram sobrevoadas duas faixas de dois por vinte quilômetros, sobrepostas à área onde foram instaladas as parcelas. O aerolevantamento foi realizado pela empresa Geoide Topografia Especializada, a uma altura de voo de aproximadamente mil metros e velocidade de 150km/h. Os parâmetros de emissão do pulso laser, com valor espectral de 1064 nm, 58,7Hz

para a frequência de varredura, 50kHz (50.000 pulsos por segundo) para a frequência do laser, 30° para a abertura da visada e divergência ajustada para 0,3 nm, geraram um *footprint* de vinte centímetros no nível do solo. A faixa de varredura de aproximadamente 727m apresentou percentual de recobrimento de 30% e quantidade de retornos registrados densidade amostral de cerca de 1,5 pulsos por metro quadrado (primeiro e último pulsos). Os erros estimados foram de 0,5m (1,0 sigma) para o planimétrico, 0,15m (1,0 sigma) para o altimétrico. A resolução espacial foi de 0,3m, o tamanho do pixel de 0,23m e a resolução radiométrica de doze bits. O sistema de referência utilizado foi o SAD 69, definido pelo Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

Os dados coletados pelo sistema aerotransportado foram pré-processados pelo *software Optech REALM SURVEY SUITE 3.5*, que auxilia na interpolação dos dados para corrigir a diferença de frequência entre o GPS (1Hz), o SMI (200Hz) e o LASER (50kHz). Em seguida realizou-se o processamento, a filtragem e a classificação dos dados, utilizando-se o *software TERRA SCAN*, que dispõem de diversos recursos de classificação

Tabela 1. Parâmetros florestais de parcelas sobrevoadas com LIDAR (realidade de solo)
Table 1. Forest parameters of sample plots assessed by LIDAR (ground truth)

Parcela	Idade (anos)	DAP _m (cm)	H _m (m)	HD _m (m)	N	G (m ²)	Vol (m ³)
1	2	15,93	22,04	22,72	602,72	12,13	133,99
2	2	15,28	21,95	22,91	809,90	15,05	167,84
3	3	15,25	21,16	22,41	734,56	13,56	117,66
4	3	15,38	21,25	22,53	866,41	16,37	172,22
5	5	18,70	27,53	29,14	828,74	23,01	301,72
6	5	16,32	25,18	27,06	828,74	17,80	220,68
7	7	20,34	31,98	35,60	715,73	24,23	363,15
8	7	20,40	31,85	35,37	828,74	27,89	414,11
9	8	19,23	31,29	33,80	753,40	22,52	341,13
10	8	20,94	32,86	36,60	772,23	27,30	431,49

de nuvens de pontos, e de visualização tridimensional, além de classificação e estratificação dos sinais interceptados pela vegetação e registrados pelo sistema.

Resultados

A altura do pulso interceptado pela copa das árvores nas parcelas foi calculada a partir da diferença entre a coordenada z do pulso e a elevação estimada do terreno. Os pulsos gerados pelo sistema LIDAR, entretanto, permitem análises que vão além da avaliação de alturas, e da relação destas com os parâmetros florestais. De fato, o nível de abertura de copas e a densidade de interceptações abaixo da copa podem também apresentar alta correlação com variáveis como área basal e volume. Para uma análise exploratória mais completa, diversas métricas e estatísticas podem ser propostas a partir das leituras LIDAR. Neste trabalho, ilustra-se esta possibilidade apresentando alguns quantis para os r_p correspondentes aos percentis 10, 30, 50, 70 e 90 (r_{p-10} , r_{p-30} , r_{p-50} , r_{p-70} e r_{p-90}). Além desses parâmetros, foi também

calculado o desvio padrão (r_{p-dp}), a altura média (r_{p-m}) e a proporção de pulsos LIDAR que atingiram a vegetação dois metros acima do nível do solo (r_{p-2m}). Todas essas variáveis foram calculadas com base nas informações provenientes do primeiro pulso laser (r_p) e são resumidas na tabela 2.

Vale destacar a alta correlação, perceptível mesmo sem a realização de análises e testes estatísticos, das variáveis altura média (H_m) e altura média das árvores dominantes (HD_m) apresentadas na tabela 1, com o percentil r_{p-90} e altura do pulso mais alto mostrados na tabela 2. Essas variáveis são de grande importância na área florestal, pois identificam os sítios de melhor qualidade uma vez que é quase perfeita a correlação existente entre produtividade e altura média de árvores dominantes. Duas parcelas amostrais por idade foram escolhidas para capturar as eventuais diferenças de produtividade do sítio entre parcelas. Nota-se, por exemplo, que para as parcelas 5 e 10, esse efeito de sítio observado nos valores de HD_m é simetricamente refletido pela variação observada do percentil r_{p-90} .

Tabela 2. Parâmetros LIDAR das parcelas sobrevoadas
Table 2. LIDAR parameters of assessed sample plots

Parcela	Idade (anos)	r_{p-10} (m)	r_{p-30} (m)	r_{p-50} (m)	r_{p-70} (m)	r_{p-90} (m)	r_{p-m} (m)	r_{p-dp} (m)	r_{p-2m} (%)	Altura do pulso mais alto (m)	Número médio de pulsos por árvore
1	2	13,15	14,95	15,92	17,32	19,73	13,43	5,92	87,10	21,54	43
2	2	15,10	16,48	18,05	19,52	21,19	15,51	6,19	89,00	22,96	14
3	3	14,31	16,14	17,88	18,93	20,05	14,51	6,39	87,67	21,92	16
4	3	14,72	16,53	17,98	19,23	20,32	14,78	6,30	89,64	21,74	31
5	5	21,71	23,91	25,09	26,11	27,14	20,92	8,75	86,62	28,79	24
6	5	15,40	21,78	23,19	24,01	24,94	19,28	7,03	92,52	26,31	11
7	7	22,20	29,62	30,21	30,64	31,35	24,84	9,78	90,80	32,24	18
8	7	24,36	31,29	32,07	32,66	33,44	29,73	5,41	98,72	34,77	38
9	8	26,27	29,67	30,60	31,29	31,96	19,38	13,96	69,47	32,77	12
10	8	26,76	30,57	31,92	33,06	34,14	26,47	10,87	88,49	35,53	14

Tomando como base o conjunto completo de parcelas amostrais, e não apenas o pequeno conjunto usado neste trabalho, Zonete et al. (2010) investigou diversos modelos de regressão para, a partir das métricas baseadas nos *quantis* dos dados LIDAR, estabelecer as melhores relações explicativas de parâmetros florestais como diâmetro médio (DAP_m) altura de árvores dominantes (HD_m), área basal (G) e volume (Vol). Os resultados demonstraram o alto poder preditivo dos percentis gerados pelo levantamento LIDAR, mostrando que a estimação do DAP_m envolve o relacionamento conjunto da idade de dos percentis 10%, 30%, 50% e 90%; para a predição de alturas, o percentil 90% se mostra essencial, podendo até dispensar idade; para área basal, as variáveis

idade, altura média dos pulsos LIDAR e os percentis 10%, 30% e 50% foram suficientes.

Apresenta-se complementarmente na tabela 2, além das estatísticas mencionadas, a altura do pulso mais alto em cada parcela, e o número médio de pulsos por árvore. Esses dados são usados como referência para outras estatísticas, como, por exemplo, a densidade de pulsos nos grupos de maior altura. Tomando como referência o pulso mais alto, foi avaliada a altura média (H_P) e a densidade ($\%H$) da nuvem de pulsos nos estratos 10% (H_{P90} , $\%H90$), 20% (H_{P80} e $\%H80$) e 30% (H_{P70} e $\%H70$) mais altos (Figura 1).

Observa-se, na figura 1, uma característica marcante em plantios de *Eucalyptus*. Se enquanto jovens as árvores

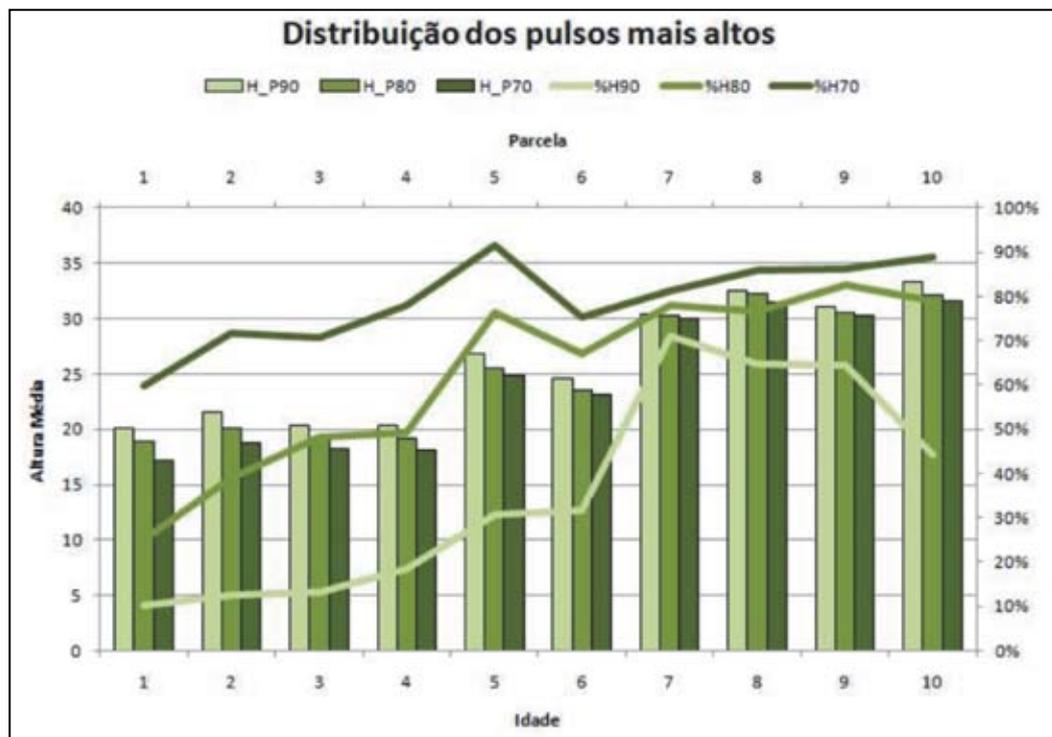


Figura 1. Altura média e densidade dos pulsos acima de 90%, 80% e 70% da altura do mais alto pulso
Figure 1. Average height and density of pulses above 90%, 80% and 70% of the highest pulse height

interceptam apenas 10% dos pulsos no estrato mais alto e 60% em alturas até 70% inferiores ao pulso mais alto, é interessante notar que em plantios mais maduros 80% dos pulsos, já são interceptados no maior estrato (%H90) e aproximadamente 90% desses pulsos são rebatidos a alturas superiores a trinta metros.

A riqueza de informações produzidas por um levantamento LIDAR quanto à estrutura de copa pode ser melhor apreciada em apresentações 3D como as da figura 2. Para a produção desses gráficos foi utilizado o programa FUSION/LDV (*LIDAR Data*

Visualization) de uso aberto, desenvolvido e distribuído por técnicos do Serviço Florestal Norte-Americano (MCGAUGHEY, 2010). Nessa figura, é perceptível a evolução de uma estrutura mais cônica e ainda relativamente aberta típica da fase jovem das árvores (parcelas 1 e 2) para copas mais altas e menos “permeáveis” aos pulsos laser características de árvores que já sentem o efeito da competição por luz e espaço (parcela 10).

A observação atenta da figura 2, e das informações apresentadas na tabela 2, permite notar que a interceptação em um nível entre 14 e 16 pulsos por árvore – mais de 1 por m²

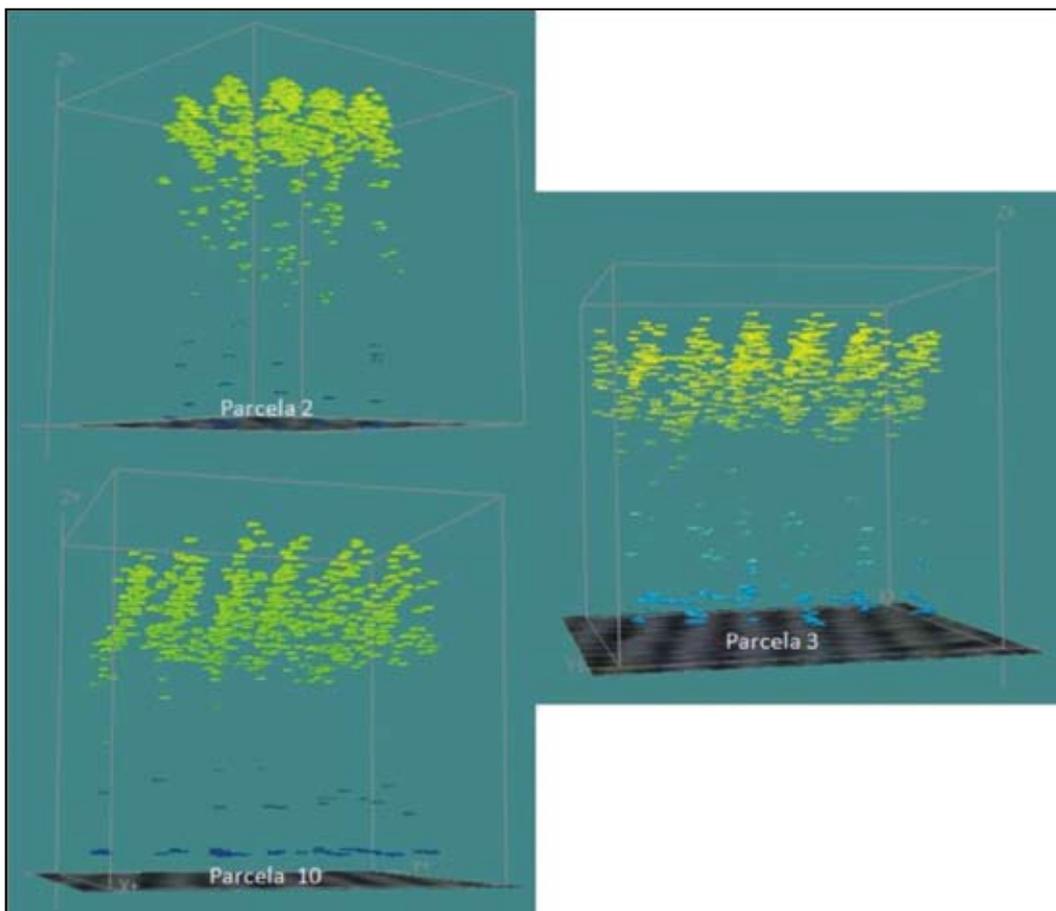


Figura 2. Representação tridimensional de pulsos LIDAR em parcelas jovens (2, 3) e madura (10)
Figure 2. Tridimensional representation of LIDAR pulses from young (2, 3) and mature (10) sample plots

– gera uma resolução suficiente de pulsos para a determinação precisa de parâmetros como alturas médias e altura média de árvores dominantes. É importante, todavia, prosseguir nas investigações para determinar qual o nível ideal. O aumento desse nível, com os equipamentos atuais é perfeitamente possível, mas é importante evitar a geração de custos desnecessários uma vez que o aumento da densidade de pulsos interfere no plano de voo (altitude, velocidade número de faixas etc.) e no esforço de pós-processamento da informação. A figura 3 ilustra com mais detalhes como a distribuição dos pulsos nas referidas parcelas parece não ter interferido na qualidade das estimativas. Se comparada à densidade observada nas demais parcelas,

as parcelas 2, 3 e 10, ilustradas nas figuras 2 e 3, estão no grupo de parcelas que receberam a menor carga de pulsos. Mesmo assim, o percentil obtido para essas parcelas (idades dois, três e oito anos) parece apresentar a mesma capacidade preditiva de H_m e HD_m quando comparado aos demais percentis.

Conclusões

As estimativas obtidas com a tecnologia LIDAR para parâmetros diretamente relacionados com altura são de alta precisão. Quando aplicada a povoamentos homogêneos clonais de *Eucalyptus*, a sua precisão e eficiência se mostraram ainda maiores. A tecnologia

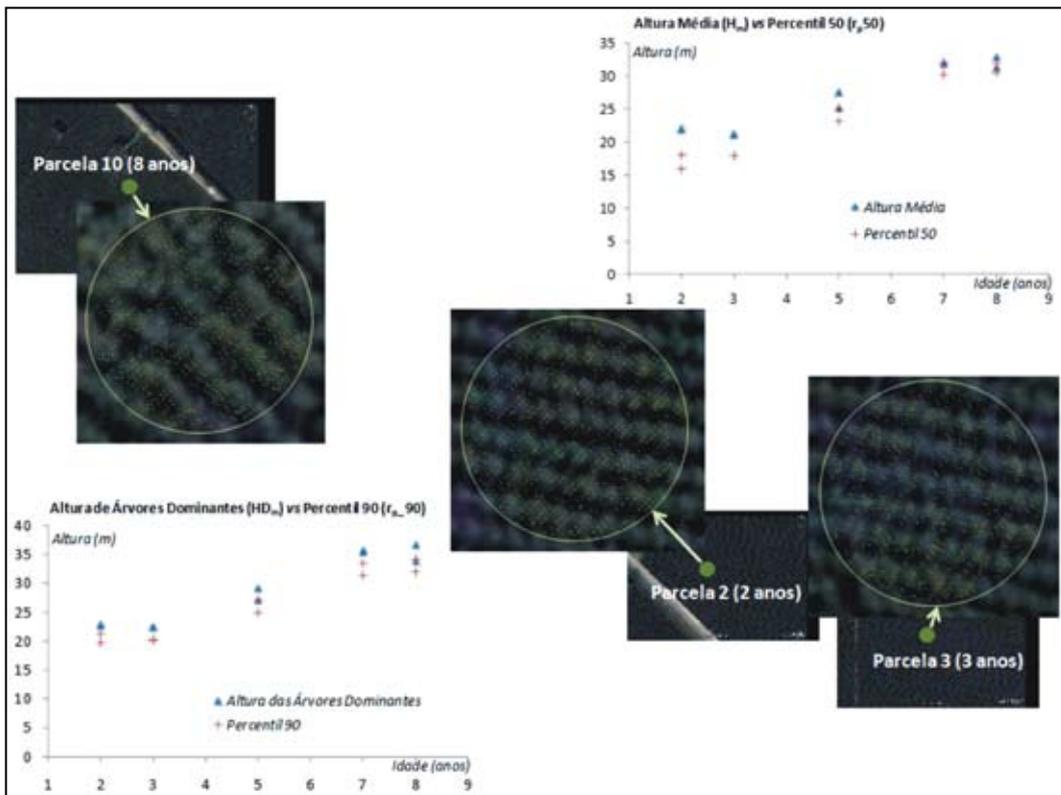


Figura 3. Parcelas 12, 13 e 77 com pontos LIDAR dispostos sobre imagens do plantio de Eucalyptus
Figure 3. Plots 12, 13 and 77 with LIDAR dots displayed over the Eucalyptus plantation images

LIDAR se encontra consolidada e inúmeras avaliações, realizadas principalmente na América do Norte e na Europa, demonstram a sua alta eficiência e eficácia, qualificando-a para imediata utilização na área florestal. Apesar de já consolidada, vários ajustes e testes precisam ainda ser feitos para adequá-la melhor às condições brasileiras, tanto para uso em atividades rotineiras de inventário florestal em florestas industriais plantadas, como para levantamentos em florestas naturais. Novos avanços, e a sua integração com câmeras digitais para estudos

fotogramétricos e multiespectrais, tornarão essa tecnologia ainda mais poderosa, acessível e imprescindível.

Agradecimentos

À Veracel, empreendimento florestal dos grupos Fibria e StoraEnso, por disponibilizar dados obtidos no âmbito do consórcio europeu *WoodWisdom-Net* em um de seus programas de pesquisa voltado para o desenvolvimento da tecnologia *airborne laser scanning*.

Referências

ANDERSEN, H-E.; REUTEBUCH, S. E.; McGAUGHEY, R. J. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. **Canadian Journal of Remote Sensing** [S.I.], v. 32, n. 5, p. 355-366, 2006.

ANDERSEN, H. E.; McGAUGHEY, R. J.; REUTEBUCH, S. E. Forest measurement and monitoring using high-resolution airborne lidar. In: Productivity of western forests: A forest products focus. Harrington, C. A., and S. H. Schoenholtz (eds.). **UDSA For. Sev. Gen. Tech. Rep.** PNWGTR- 642, Pacific Northwest Res. Sta., Portland, OR. 109– 120, 2005.

LIM, K.; TREITZ, P.; WULDER, M.; ST-ONGE, B.; FLOOD, M. LIDAR remote sensing of forest structure. **Progress in Physical Geography** [S.I.], v. 27, n. 1, p. 88-106, Mar. 2003.

MACEDO, R. C. **Estimativa volumétrica de povoamento clonal de *Eucalyptus sp.* através de laserscanner aerotranportado**. 2009. 143 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos: 2009.

MAGNUSSEN, S.; BOUDEWYN, P. Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 28, p. 1016-1031, 1998.

MALTAMO, M.; SUVANTO, A.; PACKALÉN, P. Comparison of basal area and stem frequency diameter distribution modelling using airborne laser scanner data and calibration estimation. **Forest Ecology and Management**, v. 247, p. 26-34. 2007.

MCGAUGHEY, R. J. **FUSION/LDV**: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. United States Department of Agriculture. Forest Service. Pacific Northwest Research Station, Seattle, 150 p. Disponível em: <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf>. Acesso em: 02 jul., 2010.

NÆSSET, E. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. **Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** [S.I.], v. 52, n. 2, p. 49-56, 1997a.

_____. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment** [S.I.], v. 61, n. 2, p. 246-253, 1997b.

_____.; GOBAKKEN, T.; HOLMGREN, J.; HYYPPA, H.; HYYPPA, J.; MALTAMO, M.; NILSSON, M.; OLSSON, H.; PERSON, A.; SÖDERMAN, U. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. **Scandinavian Journal of Forest Research**. v. 19, n.6, p. 482-499. 2004.

_____. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. **Scandinavian Journal of Forest Research**. v.19, n.2, p. 164-179. 2004. Disponível em: <http://www.informaworld.com/10.1080/02827580310019257>. Acesso em: 03 jul., 2010.

NELSON, R.; KRABILL, W.; MACLEAN, G. Determinign forest canopy characteristics using airborne laser data. **Remote Sensing of Environment** [S.I.], v. 15, n. 3, p. 201-212, 1984.

PACKALEN, P.; MALTAMO, M. The k-MSN method for the prediction of species-specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. **Remote Sensing of Environment** [S.I.], v. 109, n. 3, p. 328-341, 2007.

_____. Estimation of species-specific diameter distributions using airborne laser scanning and aerial photographs. **Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere** [S.I.], v. 38, n. 7, p. 1750-1760, 2008.

REUTEBUCH, S. E. et. al. How light detection and ranging (LIDAR) Works. In: <<http://forsys.cfr.washington.edu/Lidar%20research%20overview.pdf>>. Acesso em: 02 jul., 2010.

_____.; McGAUGHEY, R.J.; ANDERSEN, H-E.; CARSON, W. W. Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. **Canadian Journal of Remote Sensing** [S.I.], v. 29, n. 5, p. 527-535, 2003.

_____.; ANDERSEN, H-E.; McGAUGHEY, R.J. Light detection and ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory. **Journal of Forestry** [S.I.], v. 103, n. 6, p. 286-292, 2005.

SILVERIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A.; MALTHA, C. R. A.; SILVESTRE, A. J. D.; PILO-VELOSO, D.; GOMIDE, J. L. Characterization of lipophilic wood extractives from clones of *Eucalyptus urograndis* cultivate in Brazil. **Bioresources**, [S.I.], v. 2, n. 2, p. 157-168, 2007.

TESFAMICHAEL, S. G.; AHMED, F.; VAN AARDT, J. A. N.; BLAKEWAY, F. A semi-variogram approach for estimating stems per hectare in *Eucalyptus grandis* plantations using discrete-return lidar height data. **Forest Ecology and Management** [S.I.], v. 258, n. 7, p. 1188-1199, 2009.

WACK, R.; SCHARDT, M.; BARRUCHO, L.; LOHR, U.; OLIVEIRA, T. Forest inventory for *Eucalyptus* plantations based on airborne laser scanner data. In: Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Symposium, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, n. 3/W13, The Netherlands, p. 40-46, 2003.

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y. Utilização da tecnologia LIDAR para obtenção de altura individual e delimitação automática de copas em povoamentos de *Pinus sp.* In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3693-37000. On line. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2006/11.16.00.17/doc/3693-3700.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2010.

ZONETE, M. F.; RODRIGUEZ, L. C. E.; PACKALÉN, P. Estimação de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia: uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n.86, p. 225-235, 2010.