

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO  
CAMPUS DE IRATI, PARANÁ**

**DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS  
DENDROMÉTRICAS DE *Eucalyptus urograndis*  
COM DADOS LiDAR AEROTRANSPORTADO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CACIANE PEINHOPF**

**IRATI-PR**

**2012**

**CACIANE PEINHOPF**

**DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS  
DENDROMÉTRICAS DE *Eucalyptus urograndis* COM  
DADOS LiDAR AEROTRANSPORTADO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr.: Afonso Figueiredo Filho

Orientador

Prof. Dr.: João Roberto dos Santos

Coorientador

IRATI-PR

2012

Catálogo na Fonte  
Biblioteca da UNICENTRO

Peinhopf, Caciane  
P377d      Determinação de variáveis dendrométricas de *Eucalyptus urograndis*  
com dados LiDAR Aerotransportado / Caciane Peinhopf. – Irati, PR :  
UNICENTRO, 2012.

55f.  
ISBN

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Centro - Oeste,  
PR. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de  
concentração em Manejo Florestal  
Orientador: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho  
Coorientador: Prof. Dr. João Roberto dos Santos

1. Engenharia Florestal – dissertação. 2. Eucalipto. I. Figueiredo Filho,  
Afonso. II. Santos, João Roberto dos. III. Título.

CDD 20ª ed. 583.42

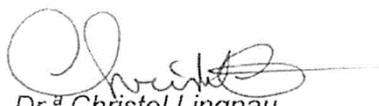
## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

### PARECER

Defesa Nº 48

A Banca Examinadora instituída pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Florestais, do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Campus de Irati, após arguir a mestrande **Caciane Peinhopf** em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS DE *Eucalyptus urograndis* COM DADOS LIDAR AEROTRANSPORTADO", é de parecer favorável à APROVAÇÃO da estudante, habilitando-a ao título de **Mestre em Ciências Florestais**, Área de Concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais.

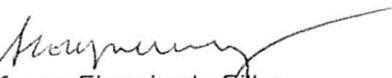
Irati-PR, 19 de dezembro de 2012.



Dr.ª Christel Lingnau  
Universidade Federal do Paraná  
Primeira Examinadora



Dr. Marcos Benedito Schimalski  
Universidade do Estado de Santa Catarina  
Segundo Examinador



Dr. Afonso Figueiredo Filho  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Pelo apoio constante dos meus pais Mirian e Rudimar, a eles **DEDICO.**

## AGRADECIMENTOS

À Deus por estar sempre dando força e iluminando meu caminho.

Aos meus pais pelos valores ensinados e exemplo todos os dias de minha vida e por acreditarem no meu potencial dando total apoio às decisões.

A toda a minha família, aos avós, tios e primos (a), especialmente a minha avó Amalia Peinhopf (*in memorian*).

Ao professor Attilio Antonio Disperatti (*in memorian*) pela amizade e confiança, por estar influenciando positivamente na vida profissional e pessoal.

Ao professor Afonso Figueiredo Filho que assumiu esse projeto e conduziu-me com muita dedicação e carinho, confiança e empolgação, fazendo-me acreditar na realização e conclusão desta etapa.

Ao Professor João Roberto pelas contribuições inestimáveis e considerações engrandecedoras.

À empresa Fibria Celulose S. A., especialmente ao Dennis Bernardi por ter acreditado neste projeto e dado todo apoio técnico para sua realização. Sua equipe e também ao Carlos Nogueira.

As minhas fiéis amigas Jóice, Heloisa, Larissa, Dariana, Débora e Ludmila que juntamente com a Bárbara formamos uma equipe de apoio que fizeram meus dias em Irati melhores e sempre estão na torcida a cada realização. Agradeço em especial a Bárbara pela boa convivência durante 6 anos, pela paciência trocas de conselhos e amizade incondicional.

As amigas Ana Lídia e Eloise pelo apoio, amizade e companheirismo estendendo o agradecimento a todos os colegas de graduação.

Ao André Pabis pela paciência, por proporcionar momentos de descontração e por me ouvir, sempre compreendendo minha dedicação ao projeto e dando apoio constante.

Aos colegas de mestrado que tornaram a sala de estudos mais agradável pela troca de conhecimento e também pelas conversas paralelas nas horas de descontração.

A UNICENTRO e especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais pela oportunidade e a coordenação em nome do professor Eduardo da Silva Lopes.

Aos professores do Departamento de Engenharia Florestal que contribuíram para a minha formação e agregando conhecimento para realização deste projeto.

A CAPES pelo apoio financeiro por meio de bolsa de estudos.

E todos que de forma direta e indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

*“De tudo ficaram três coisas: a certeza de que estamos sempre a começar, a certeza de que é preciso continuar, e a certeza de que seremos interrompidos antes de terminar. Por isso devemos fazer da interrupção um caminho novo, da queda um passo de dança, do medo uma escada, do sonho uma ponte, da procura um encontro”.*

*(Fernando Sabino)*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	ix
RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo Geral.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
3.1 A importância do gênero <i>Eucalyptus</i> para o setor florestal brasileiro .....	5
3.2 Inventário Florestal .....	6
3.2 Tecnologia LiDAR.....	7
3.2.1 Sensor LASER .....	9
3.2.2 Elementos essenciais .....	11
3.2.3 Pós-processamento .....	14
3.3 Erros encontrados com o perfilamento a LASER .....	14
3.5 Aplicação da tecnologia LiDAR na área florestal.....	15
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
4.1 Áreas de estudo .....	21
4.2 Amostragem em campo.....	24
4.3 Medições das alturas observadas no campo.....	25
4.4 Configurações operacionais do recobrimento aéreo .....	26
4.5 Estimativas das variáveis dendrométricas a partir de dados LiDAR .....	28
4.6 Comparação entre as médias de referência com as médias obtidas no LiDAR .....	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	34
5.1 Teste de permanência do DGPS.....	34
5.2 Estimativa das variáveis dendrométricas com dados LiDAR .....	34
5.2.1 Altura.....	34

5.2.2 Diâmetro à altura do peito (DAP) .....	40
5.2.3 Volume .....	46
6. CONCLUSÕES .....	50
7. RECOMENDAÇÕES.....	51
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação gráfica da primeira e última reflexão do pulso LASER.....	10
Figura 2. Movimentos da aeronave que ocorrem durante o voo. ....	11
Figura 3. Componentes do Sistema LiDAR (GPS e IMU).....	12
Figura 4. Vale do Paraíba localizado no estado de São Paulo.....	21
Figura 5. Distribuição das fazendas em alguns municípios do Vale do Paraíba.....	22
Figura 6. Incompatibilidade dos dados LiDAR (a) e (b).....	23
Figura 7. Erro de medição de coordenadas com deslocamento da parcela .....	24
Figura 8. Derrubada de duas árvores centrais nas parcelas em momento anterior ao voo, para identificação da área .....	25
Figura 9. Visualização de parcelas representadas por 5 (a) e 10 pontos/m <sup>2</sup> (b) .....	29
Figura 10. Cilindro vertical para encaixe da árvore e medição da altura com 5 (a) e 10 pontos/m <sup>2</sup> (b) .....	30
Figura 11. Desvio padrão das alturas nas diferentes idades do plantio .....	38
Figura 12. Coeficiente de variação das alturas nas diferentes idades do plantio.....	39
Figura 13. Desvio padrão para o DAP de referência e estimados pelo LiDAR .....	44
Figura 14. Coeficiente de variação para DAP de referência e estimado pelo LiDAR .....	45
Figura 15. Distribuição dos resíduos do modelo de Schumacher-Hall para estimar o volume.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Modelos selecionados por Zonete (2009) para estimar variáveis de interesse com seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e Raiz quadrada do Erro Médio (RQEM%). Tabela adaptada de Zonete (2009). .....	18
Tabela 2. Fazendas onde o estudo foi realizado e suas respectivas áreas plantadas e total. ...	22
Tabela 3. Configuração de operação para obtenção de dados LiDAR .....	26
Tabela 4. Precisão horizontal com diferentes tempos de permanência do DGPS.....	34
Tabela 5. Média das alturas medidas por parcela e resumo do teste estatístico para cada talhão.....	36
Tabela 6. Desvio Padrão e Coeficiente de Variação (%) das alturas nas diferentes idades. ....	38
Tabela 7. Correlação de Pearson entre o desvio da altura real e estimada pelos métodos LiDAR de 5 e 10 pontos/m <sup>2</sup> com a idade e declividade do plantio. ....	39
Tabela 8. Ajuste da equação para estimar o diâmetro a 1,3 m (DAP) em função da altura total (HT) com Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e Erro Padrão da Estimativa ( $S_{yx}$ )....	40
Tabela 9. Médias dos diâmetros medidos em campo e estimado pelo método de 5 e 10 pontos/m <sup>2</sup> , por parcela e nas diferentes idades com os respectivos erros médios e coeficiente de variação.....	42
Tabela 10. Desvio Padrão e Coeficiente de Variação (%) para a estimativa do DAP nas diferentes idades.....	44
Tabela 11. Coeficientes de correlação de Pearson entre o desvio do diâmetro (DAP) real e os diâmetros estimados pelos métodos testados em relação à Idade e à Declividade..	45
Tabela 12. Volume médio das parcelas (m <sup>3</sup> ) para o método real e os estimados via LiDAR com seus respectivos erros médios (%) e coeficiente de variação (CV%). .....	48
Tabela 13. Coeficientes de correlação de Pearson entre o desvio do diâmetro (DAP) real e os diâmetros estimados pelos métodos testados em relação à Idade e à Declividade..	49

## RESUMO

### DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS DE *Eucalyptus urograndis* COM DADOS LIDAR AEROTRANSPORTADO

Este trabalho teve como objetivo comparar parâmetros biofísicos de um povoamento de *Eucalyptus urograndis* obtidos em inventário florestal convencional com aqueles derivados de perfilamento a LASER Aerotransportado, com densidades de pontos LASER de 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup>. Os plantios florestais selecionados para este estudo se localizam no Vale do Paraíba, estado de São Paulo, pertencentes à empresa Fibria Celulose S.A. As parcelas amostradas no decorrer do inventário florestal são de caráter temporário, de forma circular com raio de 11,28 m e área aproximada de 400 m<sup>2</sup>. A área foi sobrevoada entre os meses de janeiro a março, para aquisição da varredura a LASER com densidade de 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup>, respectivamente, além de simultânea aquisição de fotografias aéreas. Na análise dos parâmetros biofísicos, a altura total das árvores foi obtida com os dados LiDAR a partir da diferença entre os pontos que compunham a nuvem de pontos representativa do terreno e o ponto mais alto, visualmente determinado em uma área de pontos que representam a copa. Os diâmetros e volume foram estimados em função da altura, com modelo ajustado a partir de dados de campo. As médias das alturas, diâmetros e volumes obtidos nos povoamentos com variação de idade entre 3 a 8 anos de idade, derivadas das informações de campo e comparadas com os dados extraídos do LiDAR, foram comparados com o teste de Dunnett ( $\alpha \leq 0,05$ ). Os resultados indicam que as médias de altura, diâmetro (DAP) e volume obtidos com dados LiDAR, em geral, apresentaram resultados estatisticamente iguais aos dados obtidos em campo, exceto para o povoamento com idade maior para esta área de estudo (8 anos). Por outro lado, os erros médios obtidos ficaram entre 3,97 a 12,77%; 4,54 a 20,89% e 14,46 a 59,26%, respectivamente para a altura, DAP e volume. Os dados LiDAR de densidade 10 pontos/m<sup>2</sup> apresentou erros médios inferiores que a densidade 5 pontos/m<sup>2</sup>. Os desvios entre os dados obtidos pelo LiDAR em relação àqueles de campo apresentaram uma boa correlação com a idade, indicando que essa variável pode ser mensurada por meio desta tecnologia. Entretanto, esses mesmos desvios não tiveram qualquer correlação com a declividade, indicando que esta variável parece não afetar a altura medida com dados LiDAR. Em síntese, há possibilidade de aplicação da técnica LiDAR para o inventário e monitoramento florestal, maximizando a acurácia e minimizando a coleta de informações básicas do povoamento pelo método tradicional, ainda necessário para ajuste de equação diamétrica e volumétrica.

**Palavras-Chave:** Inventário florestal, Estimativa de altura, Mapeamento a LASER, Mensuração florestal.

## ABSTRACT

### DETERMINATION OF DENDROMETRICAL VARIABLES OF *Eucalyptus urograndis* WITH AIRBORNE LIDAR DATA

This study aimed to compare biophysical parameters of a stand of *Eucalyptus urograndis* obtained in conventional forest inventory with those derived from profiling the Airborne Laser, with densities of Laser points of 5 and 10 points / m<sup>2</sup>. The forest plantations selected for this study are located in the Paraíba Valley, State of São Paulo, Brazil, belonging to the company Fibria Celulose S.A. The sampled plots during the forest inventory are temporary and circular, having a radius of 11.28 m and area of approximately 400 m<sup>2</sup>. The area was overflown during the months of January to March, for the acquisition of laser scanning density of 5 and 10 points/m<sup>2</sup>, respectively, and simultaneous acquisition of aerial photographs. In the analysis of biophysical parameters, the total height of the trees was obtained with LiDAR data directly by the determination of difference between the representative points on the ground and the highest point in the crown area selected manually, and the diameters and volume were estimated according to the height, with adjusted model from field data. The means of height, diameter and volume obtained in stands with variation in age between 3 and 8 years, derived from field information were compared with data extracted from LiDAR by the Dunnett test ( $\alpha \leq 0.05$ ). The results indicate that the means height, diameter (DBH) and volume obtained by LiDAR with densities of 5 and 10 points/m<sup>2</sup>, generally, presented results statistically identical to the data obtained in field, except for the oldest stand, considered in this research (8 years). On the other hand, the mean errors obtained were among 3.97 to 12.77%; 4.54 to 20.89% and 14.46 to 59.26%, respectively for the height, DBH and volume. The LiDAR data with 10 points/m<sup>2</sup> of density always presented lower mean errors than the density of 5 points/m<sup>2</sup>. The deviations between the data obtained by LiDAR against those of field presented a good correlation with age, indicating that this variable can be measured through this tool. However, these same deviations had no correlation with the slope, indicating that this variable seems did not affect the height measured with LiDAR data. In summary, there is possibility to apply this LIDAR technique on a large scale for forest inventory and monitoring, maximizing the accuracy and minimizing the collection of basic information from stands by the traditional method, still necessary to adjust the diameter and volume equations.

**Keywords:** Forest inventory, Estimation of height, Laser mapping, Forest mensuration.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de recursos florestais advindos de plantios comerciais vem crescendo a cada ano e com o aumento da demanda, intensifica-se a necessidade do monitoramento destes recursos como um todo, sobretudo quanto ao controle do crescimento e da produção. Metodologias têm sido desenvolvidas a fim de quantificar variáveis florestais e o Sensoriamento Remoto há muitos anos é uma ferramenta indispensável para subsidiar as tarefas de inventário florestal. Para Nilsson (1996), em área de *Pinus sylvestris* na Suécia não eram adquiridas imagens de satélite sem a presença de nuvens, neste caso o LiDAR veio a auxiliar no estudo com a obtenção das informações de forma contínua sem influência de condições climáticas.

No inventário florestal são mensuradas variáveis importantes para a quantificação do volume ou biomassa de madeira que compõe o plantio, medições essas feitas de maneira direta e com grande esforço de campo, como suporte ao planejamento do manejo florestal.

A inserção da geotecnologia no inventário florestal está estabelecida no Brasil com técnicas apropriadas para a sua aplicação, iniciando-se com as fotografias aéreas verticais e mais tarde com a inclusão de imagens de satélite. Nestes casos, as fotografias são a base para a delimitação das áreas ou estratos florestais, além de facilitar a localização e distribuição das parcelas e servir de inferência para resultados do inventário. Mais recentemente, técnicas utilizando dados de RADAR aerotransportado, com informações multifrequências e multipolarizadas têm sido testadas em florestas plantadas, criando um perfil superficial da floresta e estimativas volumétricas derivadas de atributos coerentes e incoerentes intrínsecos dessas imagens obtidas na faixa de micro-ondas (GAMA et al., 2010).

Atualmente o LiDAR (*Light Detection and Ranging*), perfilamento a LASER ou sistema de varredura a LASER, vem demonstrando ser uma ferramenta útil para aprimorar as técnicas de obtenção de informações dendrométricas da floresta como altura, diâmetro, volume, área basal, altura e diâmetro de copas, no tocante a uma melhor acurácia e qualidade àquelas obtidas por meio do inventário tradicional de campo.

Essa técnica consiste na interpretação de informações geradas a partir do sobrevoo da área de interesse com escaneamento a LASER, resultando 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. Quando os objetos são sólidos não são obtidos pontos no terreno, mas no caso de florestas de superfícies irregulares e

com espaços vazios, os pontos LASER tem a capacidade de penetrar nestes espaços e gerar camadas passíveis de interpretação da floresta, quanto à posição altimétrica diferenciando os primeiros e últimos pontos interceptados pelo LiDAR.

Existem duas formas mais usuais de obter informações da floresta a partir dos dados LiDAR: avaliar árvores individuais; todo povoamento quanto a estrutura e cobertura florestal, gerando uma média em sua distribuição. Quando se identificam árvores individualizadas os pontos do solo são tratados como base da árvore e o ponto mais alto, ou o primeiro ponto da copa é considerado como a altura total. No caso da cobertura do dossel, geralmente trabalha-se com o MDT (Modelo Digital do Terreno) que, subtraindo-se o MDS (Modelo Digital de Superfície), tem-se como resultado o Modelo Digital de Elevação.

Na fase inicial do trabalho de determinação de diâmetro e volume com base nos dados do LiDAR não é eliminada a validação dos dados mensurados em campo para algum ajuste dos dados medidos e para construção de Modelos de Regressão àquelas estimativas de variáveis indiretas de interesse, como o volume, área basal, altura média e diâmetro. A qualidade das informações geradas depende da área amostrada, da quantidade de pulsos emitidos pelo LASER (inclusive, do tipo desse sensor, quanto ao retorno-sinal, se único ou múltiplo), bem como da frequência e número de parcelas de controle.

Os trabalhos que utilizam esta técnica como alternativa de inventariar a floresta vêm crescendo consideravelmente por ser comprovada a correlação entre os valores medidos em campo e estimados pelo LiDAR e o reduzido trabalho de campo quando estabelecida esta técnica. Para as empresas florestais a atividade de inventariar e quantificar volume e biomassa geralmente envolve recursos financeiros, tempo e profissionais capacitados. Apesar de um certo custo na aquisição de dados LASER Aerotransportado, sobretudo em aquisições temporais que se tornam necessárias ao gerenciamento florestal ao longo do tempo, êle pode vir a ser uma alternativa importante na determinação mais precisa das mensurações de variáveis dendrométricas realizadas em inventários florestais tradicionais. Acrescente-se a isto, uma visão sinóptica de todo o povoamento, que vai além da questão de mensuração, mas também, permitindo uma espacialização e conhecimento das condições de terreno e/ou de sítio que ditam os aspectos do plantio em termos de produção, o que na prática, favorece uma redução de custo final dessa abordagem.

São recentes os trabalhos publicados no campo florestal com dados LiDAR, podendo-se citar alguns como Weltz et al. (1994), Drake et al. (2002), Zimblé et al. (2003), Wack et al. (2003), Macedo (2009) e Zonete (2009). Em geral, tem-se buscado o refinamento de

estimativas volumétricas da floresta comparado àqueles obtidos pelos métodos tradicionais de inventário, bem como o aprimoramento de *softwares* fundamentais para operacionalizar o sistema LiDAR.

O monitoramento da floresta com inventários florestais temporários ou contínuos é uma operação que demanda um custo considerável na produção florestal. A tecnologia LiDAR se apresenta como uma alternativa promissora para a mensuração e, portanto, na presente pesquisa, buscou-se avançar no procedimento metodológico e na aplicabilidade dessa ferramenta, contribuindo com um procedimento adequado que adquira informações confiáveis ao manejo de florestas plantadas.

Assim, esta pesquisa buscou testar a compatibilidade dos dados obtidos com o processamento dos dados LiDAR com as informações provenientes do inventário convencional. A expectativa é, portanto, operacionalizar a tomada de informações de altura, diâmetro e volume com LiDAR reduzindo o esforço de campo para a coleta de dados e com a evolução da técnica, reduzir os erros na medição da altura.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar a potencialidade de dados LiDAR aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas, em plantios de *Eucalyptus urograndis* de diferentes idades.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Comparar estimativas de variáveis dendrométricas obtidas a partir de dados LiDAR, com as variáveis obtidas a partir do inventário florestal convencional;
- Medir de forma direta, a partir dos dados LiDAR, a altura das árvores pertencentes às parcelas estabelecidas em campo e a partir desta variável estimar o diâmetro e o volume, primeiramente para 5 e posteriormente para 10 pontos/m<sup>2</sup>;
- Analisar o desempenho da técnica LiDAR com diferentes densidades de pontos na aquisição dos parâmetros biofísicos em comparação com os valores derivados de campo;
- Avaliar se a idade dos plantios e a declividade da parcela influenciam na qualidade métrica das variáveis geradas pelo sistema LiDAR aerotransportado.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 A importância do gênero *Eucalyptus* para o setor florestal brasileiro

A partir do século XX quando o homem passou a depender da floresta e visualizar nela os recursos renováveis, o avanço tecnológico na área da ciência florestal aumentou e também, os investimentos na produção, tornando-se o plantio florestal um dos fatores essenciais nas economias de muitos países.

A demanda por madeira no Brasil tem aumentado a necessidade de implantações de florestas homogêneas. O consumo de madeira de plantio florestal corresponde a 60% da utilização de *Eucalyptus* spp., sendo consequência da expansão do mercado de celulose e papel nacional e internacional. As empresas investem periodicamente em melhoramento genético, escolha de espécie, testes de procedências, técnicas de cultivo como forma de aumentar o rendimento da floresta. Além disso, houve considerável aumento na produção após a decisão por utilizar propagação clonal, que reduz a variabilidade quando se compara com plantios obtidos de sementes (HIGASHI, 2000).

O gênero *Eucalyptus* está inserido na silvicultura brasileira desde 1980 e vem se destacando na região sudoeste, que atualmente conta com plantios de cerca de 600.000 ha. As principais espécies desse gênero cultivadas no Brasil são o *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden, *Eucalyptus camaldulensis* Dehn, *Eucalyptus saligna* Smith e *Eucalyptus urophilla* S. T. Blake. Têm-se ainda os cruzamentos entre espécies, resultando em híbridos, como o *Eucalyptus urograndis* (*Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophilla*), sendo as características do *E. grandis* responsável pela qualidade da madeira e bom crescimento e o *E. urophilla* responsável pelo aumento das propriedades físicas da celulose, adaptabilidade e resistência a doenças, particularmente a fungos causadores de cancro do eucalipto (AGROTECA TANABI, 2008).

Segundo ABRAF (2012), com ano base 2011 as áreas ocupadas por plantios comerciais de espécies exóticas no Brasil totalizaram 6.516.000 ha, sendo 74,8% correspondente a plantios do gênero *Eucalyptus* sp. com uma área de 4.873.952 ha. Ocorreu um aumento de 2,5% na área plantada em comparação com o ano de 2010, explicado pela demanda criada por projetos industriais futuros do segmento de papel e celulose, que destacam-se na produção de matéria prima com 71,2% da produção total dos associados da ABRAF, em 2011. A produção de celulose brasileira é destinada para o mercado interno

(39,5%) e externo (60,5%).

### **3.2 Inventário Florestal**

Definido por Ordeja (1982) “O inventário florestal é um sistema de coleção e registro quali-quantitativo dos elementos que compõe a floresta de acordo com o objetivo previsto e em base a métodos apropriados e confiáveis”.

Segundo Prodan (1997) a descrição de populações é um objetivo central da mensuração florestal com valores referentes a alguns atributos das árvores como, por exemplo, a área basal e o volume. Quando uma área apresenta acesso restrito ou seu tamanho não permite uma medição por censo, o inventário florestal é aplicado para medição de apenas uma parte da população que seja representativa da floresta e neste caso, o grupo medido é chamado de amostra.

No planejamento do inventário florestal, determinam-se os objetivos do mesmo, e com isso são indicadas as variáveis que serão medidas, com percentual de erro admitido e também a intensidade amostral. O inventário ótimo é aquele em que as estimativas para determinar a população geram um determinado erro mínimo a um custo pré-determinado. As variáveis mais importantes são diâmetro e altura que podem ser utilizadas para quantificar o volume da floresta a partir de equação de volume já consolidada para a mesma, além de conhecer a área basal e estimar o número de árvores por área.

Dentre os tipos de inventários que são conhecidos, podem-se citar inventário florestal nacional, inventário para planos de trabalho, inventário para reconhecimento, para determinar a variabilidade da indústria, determinação de incremento e ainda inventário florestal convencional. Cada inventário apresenta um objetivo e com isso devem-se saber quais informações são necessárias e a qualidade das mesmas, podendo assim, optar por instrumentos apropriados para a coleta de dados (BARRA, 2000).

No caso de inventários florestais convencionais que é feito a partir de amostragem, são feitas observações de parte da população e a partir do processamento dos dados são produzidas estimativas dos parâmetros (alturas das árvores não medidas, volume, área basal, entre outras) (SOARES, 2011).

Em inventário tradicional o diâmetro à altura do peito (DAP – tomado a 1,3 m do solo), constitui-se em uma medida básica e necessária para o cálculo de área basal, volume, crescimento e forma dos troncos das árvores. Em estimativas do volume, o DAP sempre se

apresentar como a primeira variável independente por ser de fácil acesso, medida de forma direta e normalmente apresentar alta correlação com o volume, peso e outras variáveis dependentes (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2009).

Para a medição de altura é necessário estabelecer o objetivo do inventário devido aos diferentes tipos de alturas que podem ser considerados. Com maior frequência é medida a altura total que vai da base da árvore até o topo da copa. Em povoamentos equiâneos esta altura é incluída nas equações de volume (CAMPOS e LEITE, 2009).

Segundo Machado e Figueiredo Filho (2009), o instrumento mais utilizado para medir altura é o hipsômetro, que de forma indireta, possibilita de maneira fácil e rápida encontrar alturas e ângulos utilizados para estimar alturas. Para medir a altura total em inventário convencional o operador deve ver a base e o topo da árvore de um mesmo local. A dificuldade aumenta em florestas densas por dificultar a identificação do ápice da árvore. Outra dificuldade é o tempo gasto e os erros gerados pela falta de definição do topo da árvore, induzindo a erros provenientes da subjetividade do operador. Para a obtenção da altura total real o indicado é que a árvore seja abatida, como forma destrutiva de medição ou que um operador capacitado escale a mesma e obtenha a medida direta da altura.

Para a determinação do volume da árvore ou do povoamento florestal é necessário ter algumas informações do povoamento como a altura total e o DAP admitindo que essas variáveis estejam associadas a parâmetros que variam em função da amostra da população. Um modelo muito conhecido para determinação do volume é o modelo de Schumacher-Hall que apresenta boa precisão e geração de estimativas não tendenciosas (CAMPOS e LEITE, 2009).

A variação no espaçamento do plantio, mortalidade, erros cometidos no processo do plantio e condições topográficas podem causar diferenças nas estimativas do número de árvores do povoamento e conseqüentemente no volume de madeira estimado para a população, por isso é indispensável determinar esta variável em trabalho de campo, por meio de amostragem ou censo (SCOLFORO e MELLO, 2006).

### **3.2 Tecnologia LiDAR**

LiDAR, sigla utilizada para *Light Detection and Ranging*, é um termo que tem sido utilizado para designar esta nova tecnologia de Sensoriamento Remoto (Giondo et al., 2010). Em português é utilizado o termo Sistema de Varredura a LASER (CENTENO e

MITISHITA, 2007).

O primeiro LASER óptico foi desenvolvido em 1960 pela Hughes Aircraft, Inc. Os instrumentos de LASER foram desenvolvidos nesta época para medir o tempo em que a luz necessitava para se deslocar do transmissor LASER até o alvo e o retorno do pulso LASER ao receptor, localizado a bordo de uma aeronave em sobrevoo imediatamente acima do alvo (Jensen et al., 1987, citado por Jensen, 2009). O amadurecimento da tecnologia LASER ocorreu após a introdução do DGPS (*Differential Global Positioning System*) e as Unidades de Medição Inercial (IMU) (JENSEN, 2009).

Os primeiros estudos relacionados ao perfilamento a LASER iniciaram-se em 1983, objetivando obter-se um conjunto de pontos capaz de representar a forma do terreno e a superfície que a compõe. O interesse por essa tecnologia aumentou com o passar dos anos por meio da inclusão do procedimento de filtragem e classificação dos pontos LASER, influenciando nos custos e maturidade dos métodos (BRANDALIZE, 2001).

A tecnologia LiDAR Aerotransportada é baseada nos mesmos princípios utilizados no sistema de RADAR, com a diferença de que, em vez de utilizar pulsos na faixa do micro-ondas para localizar os objetos de interesse, o LiDAR utiliza pulsos de LASER e emite ondas na faixa do visível. A tecnologia LiDAR foi inicialmente aplicada em levantamento de dados para a elaboração de Modelos Digitais de Elevação (MDE), em que os métodos tradicionais exigiam maiores informações de campo, principalmente em áreas de difícil acesso e com vegetações densas.

Uma das primeiras áreas investigadas para o uso comercial do Sistema de Varredura a LASER foi em aplicações florestais, decorrência de sua capacidade em mapear o terreno que se encontra abaixo de coberturas vegetais, bem como obter as estimativas de altura da vegetação com *software* de apoio, apenas subtraindo o MDT e gerando o MDE (Modelo Digital de Elevação). A utilização da modelagem integrada aos dados LiDAR possibilita estimativas de variáveis florestais como, por exemplo, do diâmetro, área basal, volume e biomassa. Além de apresentar grande potencial nas atividades de planejamento da colheita florestal, construção de modelos digitais de terreno e construção de estradas (GIONGO et al., 2010).

### 3.2.1 Sensor LASER

O sistema de varredura a LASER é composto por sistemas integrados, onde alguns equipamentos são instalados a bordo de uma aeronave e outros são instalados no terreno, operando-os simultaneamente durante o levantamento aéreo. A harmonia com que estes elementos são relacionados depende da qualidade dos dados que se deseja obter (BRANDALIZE, 2001). O mesmo autor comenta que o sensor LASER é composto por um sistema responsável pela geração e emissão dos pulsos em direção ao alvo de interesse, além da recepção do raio quando retornam ao sensor. O conjunto óptico, composto por lentes e espelhos, é o que orienta os pulsos LASER emitidos pelo gerador de pulsos e devolvem a reflexão ao receptor. Além do Sistema de Medição Inercial (SMI), é necessário um receptor *Global Positioning System* (GPS), computador de bordo para controle da aquisição de dados e armazenamento dos dados brutos gerados pelo LASER, GPS e SMI.

O Sistema de Varredura aérea emite pulsos LASER com elevada frequência de repetição, por uma plataforma acoplada a uma aeronave. O pulso é emitido da plataforma e o tempo de retorno da luz e a intensidade do pulso que é captado pelo receptor, são medidos por um sensor (BALTSAVIAS, 1999).

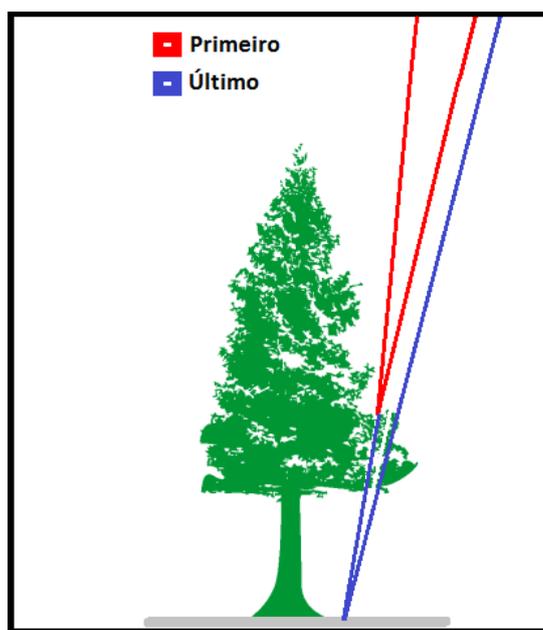
O medidor de intervalo de tempo (*Times Interval Meter* – TIM) é o módulo responsável pela medição do intervalo de tempo necessário para que o pulso emitido retorne ao sensor, sendo, no entanto, um contador que inicia quando o pulso é disparado e interrompido quando o último sinal do pulso de LASER correspondente retorna. Conhecendo-se as condições atmosféricas e a velocidade de propagação do LASER, a distância entre o sistema e o ponto de reflexão pode ser calculada em função da altura do voo e da velocidade da luz. Para o mesmo pulso emitido podem ser registradas diferentes alturas de retorno, o que caracteriza a penetração do LASER em objetos irregulares, condição muito útil para a identificação de cobertura vegetal em relação ao terreno. As pulsações ópticas refletidas são coletadas pelo receptor e são convertidas de sinal óptico para sinal eletrônico (BRANDALIZE, 2001).

Os feixes de LASER que são emitidos pelo sensor podem ser classificados após o retorno ao sistema, dependendo do objeto que vai representar no processamento e as informações necessárias para o projeto final, são definidos os pontos de maior importância para o pesquisador. Como por exemplo, os pontos que atingem o solo que auxiliarão na construção do MDT (Modelo Digital de Terreno), e pontos que não atingem o solo, chamados

de pontos de vegetação que irão ser indispensáveis na construção do perfil das árvores ou o MDE.

Quando o LASER refletido representa ramos das árvores gerando múltiplos retornos, a má interpretação dos mesmos pode gerar influências negativas na medição das alturas da vegetação, além de diminuir a representatividade dos pontos no solo, chamado de taxa de penetração, sendo esta inferior a 25% prejudica diretamente na qualidade do MDT (KRAUS e PFEIFER, 1998).

Com a correta identificação dos pontos intermediários que retornaram ao sistema é possível trabalhar com filtragem, delimitando separadamente pontos referentes às camadas do terreno e de vegetação (Figura 1). A Figura 1 representa um único pulso que ao encontrar a superfície da folha ou galho retorna como 1º pulso, pulso quando é subdividido e continua seu trajeto até tocar o solo e então ter seu 2º pulso retornando ao sensor.



**Figura 1.** Representação gráfica da primeira e última reflexão do pulso LASER.

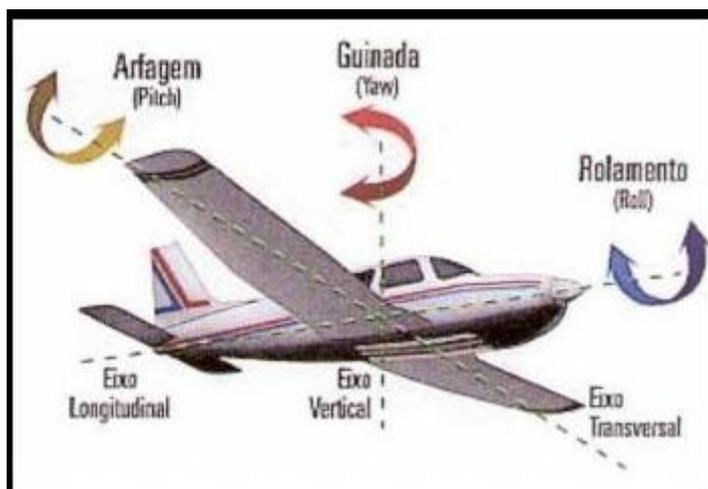
O sistema LiDAR apresenta sua própria fonte de energia, sendo considerado um método direto na captura de dados e classificado como um sensor ativo, significando que o mesmo não necessita de iluminação solar para obtenção de informações, diferentemente de fotografias aéreas que são sensores passivos e dependem do sol, assim como os satélites. Outra característica importante é que o sensor ativo não é prejudicado pelas sombras ou nuvens na identificação dos objetos (GIONGO et al., 2010).

Os pontos LASER que vão compor a estrutura da imagem no terreno são emitidos no

sentido transversal à direção da linha do voo, e sua densidade dependem da frequência de repetição de pulsos, definido inicialmente para controlar a saída de pulsos em determinado intervalo de tempo da plataforma, além da altitude da aeronave, do ângulo de varredura e também da velocidade da aeronave. Os sinais de retorno sempre são menores do que o número de pulsos emitidos (JENSEN, 2009). O princípio básico do funcionamento desse sistema é a obtenção de registros contínuos de coordenadas espaciais (BRANDALIZE, 2001).

### 3.2.2 Elementos essenciais

A principal característica das informações obtidas a partir do sobrevoo a LASER é a nuvem de pontos tridimensional, garantida pelo apoio do DGPS que corrige a planialtimetria da imagem, a trajetória da aeronave e alinhamento da mesma. Em segundo lugar está o IMU que registra a inclinação da aeronave garantindo a determinação das coordenadas XYZ (DALMOLIN e SANTOS, 2003) como é mostrado na Figura 2.



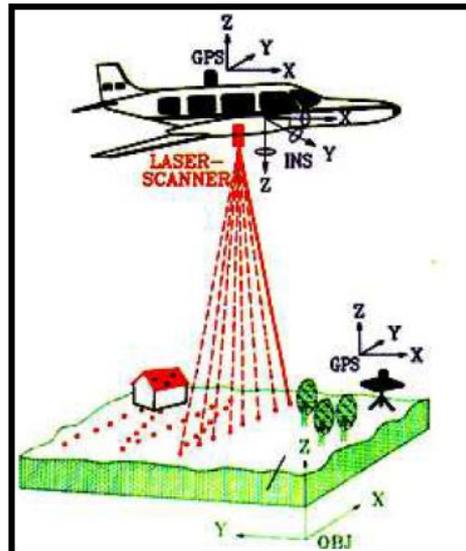
**Figura 2.** Movimentos da aeronave que ocorrem durante o voo.

FONTE: ALMEIDA (<http://www.aerodesign.ufsc.br/teoria/periodicos/voarbem.pdf>).

Quando se trabalha com uma varredura a LASER sem amarração exata dos pontos, podem ser utilizados os dados de forma generalizada, sem representar nenhuma orientação de determinado local ou região. Assim a varredura a LASER só garante precisão quando utilizada simultaneamente ao voo de aquisição de dados de LASER, os equipamentos de GPS (Global Positioning System) e o IMU (*Inertial Measurement Unit*) (KRAUS e PFEIFER, 1998).

Segundo Baltasavias (1999), a qualidade e precisão de localização da nuvem de pontos tiveram aumentos consideráveis quando passou a utilizar para orientação do sensor, o GPS e o

IMU como é representado na Figura 3. Apresenta a vantagem de garantir a filtragem de grandes erros gerando posicionamento conhecido dos feixes de LASER, orientação exata do voo cobrindo toda a área, inclusive tiras de controle. A precisão nesta fase está associada com a qualidade do pós-processamento dos dados, na qualidade de sinais de satélites adquiridas pelo GPS e as distâncias máximas que a aeronave ficou da estação base durante o voo.



**Figura 3.** Componentes do Sistema LiDAR (GPS e IMU).  
FONTE: HARDING (2002)

Na interpolação dos dados GPS e IMU com os dados do LiDAR podem ocorrer algumas perdas, tornando o número de dados da coleta menores que a frequência de dados da varredura a LASER (CENTENO e MITISHITA, 2007). Esta perda é conhecida como desvio de pulsos e foi medido por Wever et al. (1999), citados por Brandalize (2001) que definiu para terrenos arenosos um desvio de 10 a 20%, para vegetação densa de 30 a 50% e para coberturas metálicas e edificações um desvio de 50 a 80%.

### 3.2.2.1 Differential Global Positioning System (DGPS)

A tecnologia LiDAR constitui um conjunto de elementos essenciais para a precisão e acurácia dos dados e informações que serão coletados com o sobrevoo da área. Isso é possível com o uso de tecnologia de GPS Diferencial (*DGPS - Differential Global Positioning System*) que é baseado no uso de dois receptores GPS que registram simultaneamente as posições da aeronave durante o voo.

O primeiro receptor é o GPS Base que se encontra no solo e é posicionado com um

levantamento preciso e coordenadas bem definidas. O segundo receptor GPS está localizado na aeronave e registra a posição da antena do LiDAR durante a aquisição de pontos, com intervalos fixos de registros. Os dois receptores devem trabalhar de forma conjunta com aquisição de coordenadas  $(x,y,z)$  e armazenando informações do posicionamento da antena da aeronave durante o voo.

A precisão tipicamente encontrada na posição da aeronave é de 5 a 10 cm e as informações são obtidas em unidades de latitude, longitude e altura elipsoidal em um sistema de coordenadas WGS 84 (JENSEN, 2009). O DGPS é um método de refinamento dos dados posicionais derivados do rastreamento GPS por meio da correção de erros inerentes ao processo (BRANDALIZE, 2001).

Brandalize (2001) recomendou que a distância entre os aparelhos receptores GPS a bordo da aeronave e o GPS de base no solo, não deve ser superior a 50 km para garantir a exatidão planimétrica dos pontos LASER. Acrescentou que sempre que essa condição não pode ser estabelecida, recomenda-se o uso de um conjunto de bases terrestres.

### **3.2.2.2 INS (Inertial Navigation System)/IMU (Inertial Measurement Unit)**

O segundo elemento essencial em um Sistema de Navegação Inercial (*INS – Inertial navigation System*), sendo necessário para estabelecer a orientação precisa da antena do LiDAR durante a obtenção dos dados por meio de uma unidade de medição inercial que contém Arranjos de Sensores Inerciais (*ISA – Inertial Sensors Array*) (Lima, 2005).

No processamento dos dados no INS é indicado o tempo do voo e sua orientação que é indexada pelo tempo obtido com o GPS (JENSEN, 2009). A unidade de medição inercial (*IMU – Inertial Measurement Unit*) é constituída por uma série de acelerômetros e giroscópios com unidades de controle responsáveis pelas condições dos sinais emitidos por estes componentes, além de um circuito de digitalização e uma unidade de cálculo para pós-processamento.

Por meio de integradores, as acelerações e os parâmetros angulares no SMI produzem a posição, a velocidade e a orientação do IMU assegurando boa exatidão (JENSEN, 2009). Todo o sistema deve ser compacto e o mais leve possível, de modo a poder ser instalado próximo do sensor, garantindo a maior precisão possível (MOSTAFA e HUTTON, 2001; BRANDALIZE, 2001).

### 3.2.3 Pós-processamento

Os dados coletados são chamados de dados brutos (*Raw Data*) e são as medidas LASER com os respectivos atributos, dados do GPS e dados da navegação inercial (IMU).

Os equipamentos utilizados nessa etapa são um computador do tipo PC com boa capacidade de processamento apoiado por programas específicos para extração dos dados brutos provenientes do levantamento com LASER, IMU e GPS. Esses dados são processados separadamente e posteriormente é feita sua integração para facilitar a visualização das camadas da vegetação com todas as informações agrupadas em um arquivo de dados (BRANDALIZE, 2001).

### 3.3 Erros encontrados com o perfilamento a LASER

Segundo Baltsavias (1999b), como em outras metodologias, os erros encontrados em um sistema de perfilamento a LASER aerotransportado são derivados dos erros de seus componentes como o próprio emissor do feixe de LASER, a solução GPS e a orientação do SMI.

Todo o sistema que opera na obtenção das informações durante o voo deve passar por uma calibração prévia para verificar se o funcionamento está de acordo com as especificações, verificar a precisão e identificação de possíveis desvios dos pulsos. A calibração consiste em determinar um alvo no solo o qual é perfilado em várias direções controladas e parâmetros de filtragem conhecidas (BRANDALIZE, 2001).

Os erros posicionais do pulso podem ser caracterizados como *roll*, *pitch* e *heading* sendo possível o isolamento desses erros, pois estão diretamente relacionados com a altura do voo. A medição desses ângulos é tarefa executada pelo SMI e indica a direção do pulso LASER em relação à superfície da terra. Outros erros de posicionamento gerados podem estar relacionados com o GPS, sendo divididos conforme Brandalize (2001) em três categorias:

- Intrínsecos: relacionados à geometria do satélite, deslocamentos orbitais ou interferências eletromagnéticas.
- Externos: relativos aos pontos de controle e à modelagem do geóide.
- Operacionais: devido a falta de bateria, cabos mal conectados, manobras bruscas na aeronave, interrompendo o recebimento do sinal GPS no aparelho aerotransportado.

Os erros de pulso LASER são independentes da altura de voo, porém em condições

normais de voo é na ordem de 5 a 7 cm. Algumas condições ambientais como a temperatura, pressão e umidade no emissor LASER podem interferir na refração e velocidade do pulso.

A imprecisão do tempo de resposta do receptor é um erro considerado desprezível, juntamente com a diferença angular entre o transmissor e o receptor do pulso LASER e a imprecisão da determinação do ângulo real de cada pulso transmitido e recebido.

Outro problema encontrado com os pulsos de LASER é a ocorrência de ventos citado por Oliveira (2011) que analisou o voo da aeronave a fim de evitar sobreposições e minimizar os ruídos que ocorre por deslocamento do dossel influenciado pelo vento nas passagens da aeronave.

### **3.5 Aplicação da tecnologia LiDAR na área florestal**

Na realização de inventário florestal convencional busca-se a exatidão de uma estimativa, sendo isso possível quando o inventário visa a precisão, reduzindo ao máximo os efeitos de tendências. Os erros que ocorrem com frequência são os erros referentes ao tamanho da amostra, à variabilidade da unidade amostral e ao método de seleção das unidades amostrais, além de erros não amostrais que se constituem por falhas em equipamentos ou equívocos no momento da medição (SOARES et al., 2011). As tecnologias recentes vêm auxiliando na precisão e acurácia para obtenção de algumas medidas básicas em inventário, como alturas e diâmetros, que são as variáveis mais comuns, porém esses equipamentos ainda não excluem a necessidade de acessar a floresta com equipe de inventário especializada, gerando alto custo de deslocamento e mão-de-obra.

A introdução na área florestal, do LiDAR gerou curiosidade quanto à qualidade das informações obtidas no processamento, comparando com o inventário tradicional. Após anos de pesquisa de universidades e empresas ligadas a área florestal, o LiDAR cresce em confiabilidade, sendo identificados ganhos crescentes em eficiência. Segundo Wack et al. (2003), o maior interesse em varredura LASER é de indústrias de papel e celulose para inventário florestal, pois as mesmas já investiram em larga escala na otimização dos custos, otimização da produtividade e na gestão de recursos e sistemas de informações. A varredura a LASER fornece uma abordagem inovadora ao inventário florestal, com riqueza de informações que possibilita uma maior otimização do trabalho em campo, como coleta de dados, inspeção de recursos e tomada de decisão à gestão.

Segundo Weltz et al. (1994) a tecnologia LiDAR tem a capacidade de indicar retornos

de pulsos da vegetação, que em seus estudos não demonstraram diferenças significativas entre as medições no campo e aquelas de um perfilamento LiDAR para a altura das árvores, principalmente quando a floresta apresenta um padrão único de estrutura vegetal.

Para determinação da biomassa da Floresta Tropical Densa e caracterizar sua estrutura, Drake et al. (2002) obtiveram dados LiDAR da Estação Biológica La Selva, na Costa Rica e dados de campo estimando a biomassa a partir de parcelas amostrais obtidas no terreno. Ao comparar os dois métodos, esses autores obtiveram uma relação estreita entre perfil de campo e perfil LiDAR, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,94%.

Informações de estrutura vertical da floresta com dados LiDAR foram extraídas por Zimble et al. (2003), a partir de classificação dos atributos da paisagem para incluir os resultados na tomada de decisão. A comparação do sistema convencional de medição de campo e medição com dados LASER apresentaram uma precisão de 97%, sugerindo que o LiDAR pode ser utilizado com precisão para mapear estruturas verticais da floresta.

Em Monte Prado, Portugal, Wack et al. (2003) inventariaram uma floresta de *Eucalyptus* sp. com base em dados LiDAR, obtendo nesse estudo um volume subestimado quando comparado ao método de inventário tradicional da ordem de 7%.

Clark et al. (2004) utilizaram LiDAR para estimar a altura da copa e altura do dossel de uma floresta tropical perene separando-as do MDT. O erro obtido a partir da raiz quadrada média (RQEM) na geração do MDT foi de 2,29 m. Em terrenos íngremes este valor aumentou 0,67 m. As árvores quando isoladas geraram um erro de subestimativa e a altura média das alturas das parcelas jovens (até 18 m altura) foi estimada com erro médio de 0,9 m.

Lang (2006), em florestas da Áustria, combinou fotografias aéreas infravermelho com os dados do LiDAR, para obtenção do delineamento dos talhões florestais, comparando com dados de campo. Detectou árvores individuais e analisou a estrutura da floresta, além da delimitação do povoamento florestal. Sua conclusão foi que 85% da área foi bem classificada, apontando eficiência em povoamentos homogêneos mesmo em áreas extensas. Em florestas com maior número de estratos o processo se mostrou limitado para determinação de altura das árvores.

Em plantios de *Pinus* sp., Zandoná (2006) definiu a partir de dados LiDAR, as alturas individuais, além de área e diâmetro de copas. Foram feitas correlações e ajustados modelos de regressão e com isso estimado o volume. Os resultados demonstraram bom ajuste do DAP em função da área da copa e altura das árvores, com resíduos bem distribuídos e sem tendências. A precisão obtida foi influenciada pela densidade do povoamento, porém as

árvores individuais são bem identificadas, sobretudo as do dossel. Considerando todas as parcelas medidas, o percentual de acerto foi de 82,8% e referindo-se às dominantes este acerto passou a 95,9%. O ajuste para determinação do DAP em função da área de copa e altura para todas as parcelas apresentou erro padrão da estimativa inferior a 10% e para o volume com o modelo de SPURR o erro variou de 9,95% a 23,28%, tendo esse valor aumentado com as maiores densidades do povoamento.

Macedo (2009) avaliou variáveis dendrométricas de um povoamento de *Eucalyptus* sp. com diversas idades e planos de manejo, na região do Vale do Paraíba, estado de São Paulo, bem como determinou a quantidade de árvores em campo e estimou a mesma variável usando algoritmo de extração de variáveis dendrométricas. A comparação dos métodos resultou em um percentual de erro de +7%, apesar disso, o intervalo de confiança foi coincidente, sendo a estimativa do LiDAR aceitável. A mesma variável obtida a partir do censo não apresentou tendências de superestimavas. A estimativa gerada para altura total teve percentual de erro de -2,26% sendo aceitável dentro do intervalo de confiança e 19,36% para área de copa, estatisticamente distinta da referência de campo, impossibilitando sua aceitação. O percentual de erro para DAP foi de 5,33% e -1,8% para volume. Segundo o autor as estimativas apresentaram aceitação dentro dos limites de tolerância estipulado para os inventários convencionais.

Zonete (2009) realizou estudos em povoamentos de *Eucalyptus* sp. no sul da Bahia, com 236 parcelas circulares com 13 metros de raio. Foram calculadas as variáveis de interesse para ajuste do modelo de volume, área basal, altura dominante, altura média e diâmetro médio a partir de dados de LASER com densidade 1,5 pontos/m<sup>2</sup>. O autor dividiu a vegetação em quantís correspondentes aos percentis 10 ( $f_{h10}$ ), 30 ( $f_{h30}$ ), 50 ( $f_{h50}$ ), 70 ( $f_{h70}$ ) e 90 ( $f_{h90}$ ), com relação ao primeiro pulso LASER para avaliação da altura e empregado para análise de regressão e ajuste dos modelos juntamente com os mesmos percentis utilizados para classificar diferentes densidades de copa, onde são classificados em percentil 10 ( $f_{p10}$ ), 30 ( $f_{p30}$ ), 50 ( $f_{p50}$ ), 70 ( $f_{p70}$ ), 90 ( $f_{p90}$ ). Os modelos selecionados foram os que apresentaram melhores R<sup>2</sup> e RQEM (Raiz Quadrada do Erro Médio), ou seja, os valores mais altos dessas estimativas, sendo estes os modelos mais representativos das variáveis de interesse (diâmetro, altura, altura dominante, área basal e volume). Os modelos são apresentados na Tabela 1. O RQEM no trabalho de Zonete (2009) é calculado com a seguinte fórmula:

$$RQEM = \sqrt{\frac{1}{n} * \Sigma (Y_i - \hat{Y}_i)^2}$$

em que

$n$  = Número de Parcelas;

$Y_i$  = valores observados e

$\hat{Y}_i$  = valores preditos.

**Tabela 1.** Modelos selecionados por Zonete (2009) para estimar variáveis de interesse com seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e Raiz quadrada do Erro Médio (RQEM%). Tabela adaptada de Zonete (2009).

Variável de Interesse	Modelo selecionado	$R^2$	RQEM%
Diâmetro médio	$\sqrt{Dm} = 2,7121 + 0,0456f_{h30} + 17,7864f_{p30}^{-1} + \epsilon$	0,89	0,0004
Altura média	$\sqrt{Hm} = 1,5863 + 0,1973f_{h90} + 0,00044f_{h10}^2 - 0,0025f_{h90}^2 + \epsilon$	0,95	0,0003
Altura dominante	$\sqrt{Hdom} = -2,6226 + 2,4576 \ln(f_{90}) + \epsilon$	0,96	0,0003
Área Basal	$\sqrt{G} = -0,7303 + 0,0406 + f_{h10} + 1,3322 \ln(f_{havg}) + 0,2621 \ln(age) + \epsilon$	0,92	0,001
	$\sqrt{V} = -55,403 + 0,0086f_{30}^2 + 5740,5998f_{90}^{-1} + 2,0216age^{0,5} + \epsilon$	0,94	0,002
Volume	$\ln(V) = -22803 + 0,0518f_{h30} + 570,8012f_{p90}^{-1} + 0,2679 \ln(age) + \epsilon$	0,96	0,003
	Buckman $\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 \frac{1}{I} + \beta_3 B_1 + \epsilon$	0,95	0,030
	Clutter $\ln(V) = \beta_1 S + \beta_2 I^{-1} + \beta_3 \ln(B) + \epsilon$	0,95	0,003
	Schumacher $\ln(V) = 0,6880 + 1,25598(f_{h90}) + 0,3311age^{0,5} + \epsilon$	0,93	0,003

Onde:  $f_{h10}$ ;  $f_{h30}$ ;  $f_{h90}$ : corresponde ao percentil das alturas LiDAR nos níveis de 10, 30 e 90;  $f_{p30}$  densidade no percentil 30.  $age$  corresponde a altura média.

Schimanski et al. (2009) utilizaram a Função Discriminante Linear de Fisher e concluíram que os algoritmos são satisfatórios quando aplicados em terrenos com relevo suave, já para áreas inclinadas e cobertas por vegetação apresentaram problemas quanto ao processo de filtragem, tornando-se mais crítico na medida que aumenta a densidade da floresta, principalmente as atividades de separação das feições pertencentes a superfície do terreno para criação do MDT.

Schimanski (2009) avaliou em trabalho de campo, o uso de Fotogrametria e também com dados de LiDAR. Para classificar a cobertura do solo ele usou os métodos da Função Discriminante Linear de Fisher, a Regressão Logística com Camada Oculta e a Função

Discriminante Quadrática. O LASER teve acerto de 75,9% para a classificação da cobertura do solo; a separação das classes temáticas apresentou um acerto médio de 75,9%; a Função Discriminante Linear de Fisher tem a vantagem de ser duas vezes mais rápida o seu processamento computacional, comparado com o método LASER, além de ter um acerto de 76,4% nas áreas naturais e 68,8% nas áreas de influencia antrópica. Para a mesma classificação a Função Discriminante Quadrática teve acerto de 68,8%.

Rodriguez et al. (2010) obtiveram dados LiDAR aerotransportado em plantações de *Eucalyptus* spp., situado em terreno suavemente ondulado. As parcelas eram compostas por plantios de diferentes idades e índices de sítio. A altura dos pulsos interceptados pelas copas foi estimada em função da coordenada  $z$  do pulso e a elevação do terreno. Avaliando os pulsos interceptados pelas copas, os autores concluíram que enquanto jovens, as árvores interceptam apenas 10% dos pulsos no estrato mais alto e 60% das alturas que se encontram cerca de 70% abaixo dos primeiros pulsos (estrato mais alto). Já em plantios mais maduros, as copas interceptam 80% dos pulsos e em plantios com alturas superiores a 30 metros, apenas 10% dos pulsos penetram na vegetação. Essa distribuição de pulsos não interferiu na qualidade das estimativas de altura média e altura dominante média.

Na região de Itatinga, estado de São Paulo, Silva (2012) avaliou a qualidade do modelo digital de terreno (MDT) em cobertura de Floresta Estacional Semidecidual e em plantio de *Eucalyptus grandis* aos 6,5 anos de idade, utilizando uma densidade de ponto do LASER de 4 pontos/m<sup>2</sup>. Melhores resultados foram encontrados para filtros de pontos no solo, utilizando janelas de 2 metros. Com isto, foi possível classificar o solo sem a presença de picos, diferentemente das áreas com Floresta Estacional Semidecidual que necessitaram filtro com janela superior ou igual a 8 metros o que significa que os pulsos não foram tão eficientes em chegar ao solo.

Oliveira (2011) determinou o número de árvores de dois talhões florestais no estado da Bahia a partir do primeiro pulso das informações LiDAR por meio da contagem automatizada com algoritmo de máxima local. O resultado foi comparado com a contagem manual em imagem Quickbird e o acerto foi de 97,36% utilizando uma janela de 5x5 na interpolação IDW (*Inverse Distance Weighted*).

As árvores não identificadas foram interpretadas como árvores suprimidas, que não atingiram o dossel superior. O mesmo autor determinou o volume em inventário florestal e por meio dos dados LiDAR o que identificou uma subestimativa do volume gerado pelos dados do LASER o que pode ter sido provocado pela não identificação de árvores suprimidas

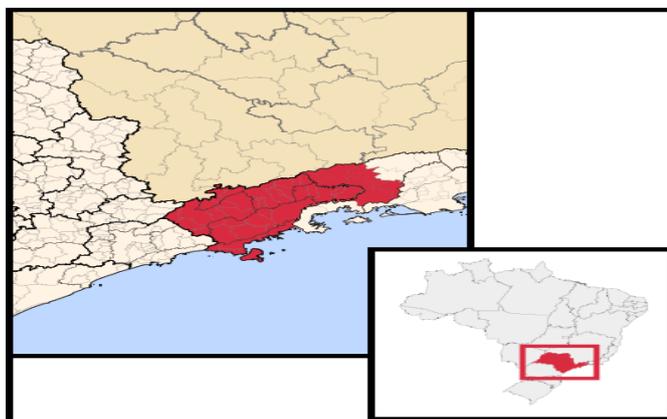
ou muito próximas e pela subestimativa das alturas detectadas pelo ponto máximo. Mesmo assim, o volume foi considerado bom por estar dentro do limite de confiança estabelecido.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

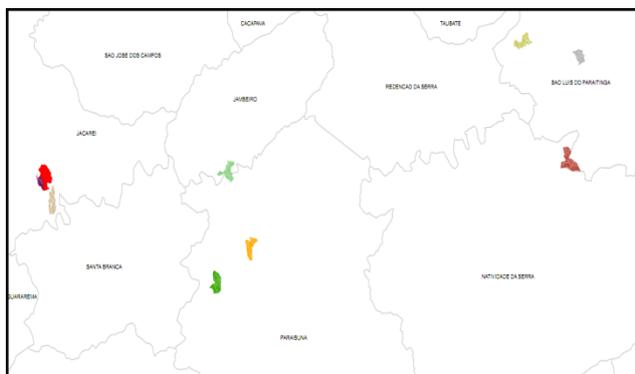
### 4.1 Áreas de estudo

A coleta de dados para este estudo foi realizada na empresa Fibria Celulose S.A. unidade de Jacareí, estado de São Paulo, com latitude 23°18' Sul e longitude 45°58' Oeste. O local apresenta Clima Subtropical Úmido Aw pela classificação climática de Köppen conhecido como tropical chuvoso, com invernos mais secos e mês mais frio com temperatura média superior a 18°C. A precipitação oscila entre 1.200 e 1.300 mm (AES TIETE, 2011).

As fazendas da empresa estão distribuídas em 5 municípios localizados na região do Vale do Paraíba (Figura 4) que se situa em áreas de Mata Atlântica, na porção leste do estado de São Paulo, entre a Serra da Mantiqueira ao norte e a Serra do Mar ao Sul. Os municípios que abrigam as fazendas são Jacareí, Paraibuna, Jambuí, São Luís do Paraitinga e Naturidade da Serra (Figura 5).



**Figura 4.** Vale do Paraíba localizado no estado de São Paulo



**Figura 5.** Distribuição das fazendas em alguns municípios do Vale do Paraíba

O relevo na região do Vale do Paraíba é considerado forte ondulado apresentando uma produtividade florestal média para o *Eucalyptus urograndis* de 47 m<sup>3</sup>/ha/ano. No relevo de colinas, próximas ao Rio Paraíba do Sul, há predomínio de Latossolos Amarelo e Vermelho Amarelo, com textura média a argilosa. Latossolo Vermelho Distrófico típico, A moderado, com textura argilosa ou muito argilosa. E nos relevos de morros há ocorrência de Argilossolo Vermelho e Vermelho Amarelo, Distrófico e Eutróficos predominando a textura argilosa. Já nos relevos das serras e escarpas há dominância de Cambissolos Distroficicos a moderado, com textura argilosa (EMBRAPA, 1999).

A área total sobrevoada corresponde a 1.500 ha. Todavia, o estudo foi conduzido em parte da área sobrevoada, envolvendo 6 fazendas com área total de 1.019,04 ha, mas com 520,38 ha de efetivo plantio com *Eucalyptus urograndis* (Tabela 2) e as fazendas selecionadas representavam as classes de idade da rotação que a empresa trabalha.

**Tabela 2.** Fazendas onde o estudo foi realizado e suas respectivas áreas plantadas e total.

Fazenda	Idade (anos)	Área de Efetivo	
		Plantio (ha)	Área Total (ha)
Santa Terezinha VI	3	39,53	65,45
Santa Terezinha V	4	94,15	196,39
Urutay	5	86,71	153,33
Jataí	6	76,22	166,85
José III	7	138,96	254,52
Patizal do Vale Feliz	8	84,81	182,50
<b>Sub Total</b>	-	<b>520,38</b>	<b>1019,04</b>

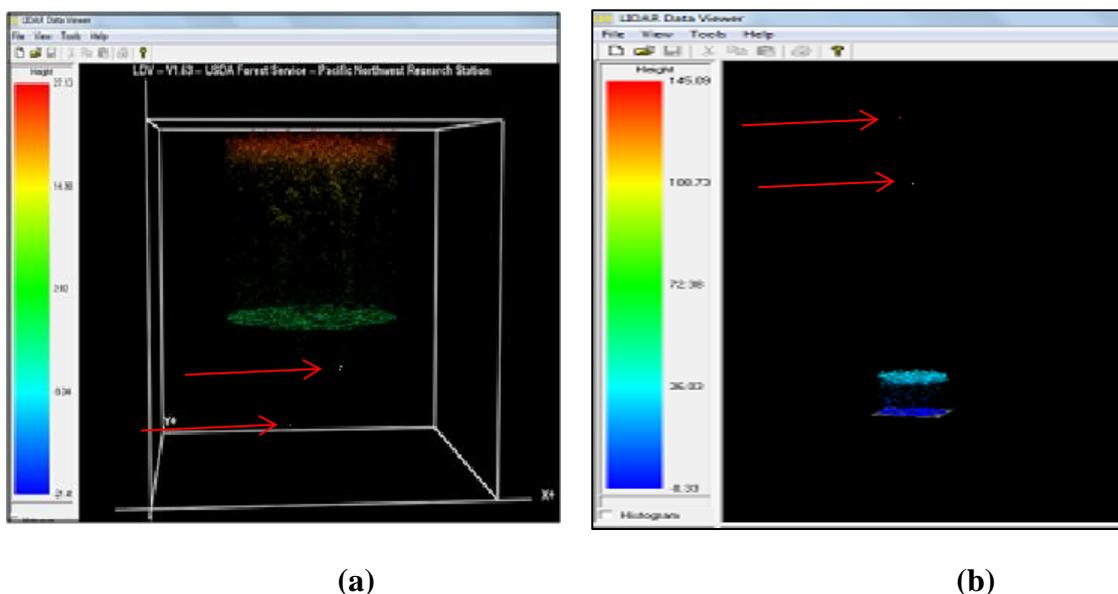
Foram utilizados para este levantamento dados de 53 parcelas temporárias instaladas nas 6 fazendas em plantios comerciais do híbrido *Eucalyptus urograndis* representando

diferentes idades. Foram utilizadas parcelas circulares com raio de 11,28 m ( $400\text{ m}^2$ ), medidas entre os dias 2 e 15 de maio de 2012. As árvores pertencentes a cada parcela tiveram sua circunferência a 1,3 m do solo (CAP) medida, assim como, a altura total estimada com o Clinômetro Eletrônico Haglöf.

Os voos na área foram realizados entre os meses de janeiro a março de 2012, obtendo-se dados LiDAR com densidades de 5 e 10 pontos/ $\text{m}^2$ , respectivamente, além da aquisição simultânea de imagens aéreas ortorretificadas com resolução espacial de 15 cm.

As idades de interesse para determinação das alturas variaram de 3 a 8 anos, plantados em espaçamento de 3 m x 2 m. Porém, 8 parcelas apresentaram alguma inconformidade nos dados LiDAR (Figuras 6 a e b). As inconformidades que seguem nas imagens são pontos bruscamente deslocados da nuvem de pontos representativa da parcela. Este erro ocorre por alguma inconformidade do receptor do pulso no momento do retorno do mesmo.

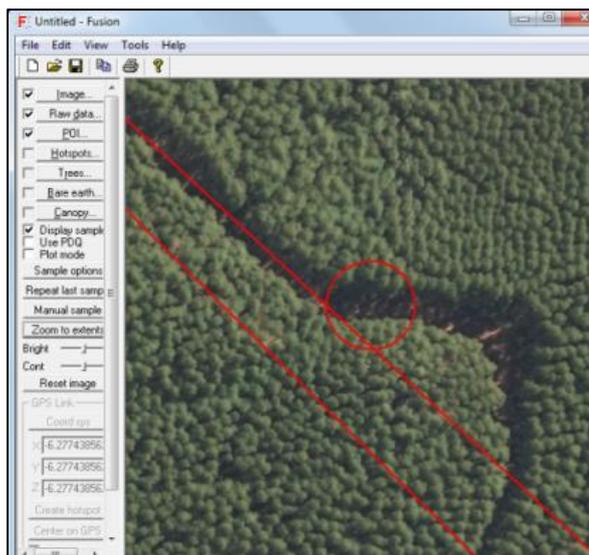
Pela Figura 6 é possível identificar no primeiro caso os pontos deslocados para cima da altura onde deveria se encontrar os pontos no terreno ou cota zero possivelmente por erro na coleta de informações pelo sensor LiDAR. As informações de dados LiDAR utilizados foram dados brutos, ou seja, não filtrados representando assim as possíveis perdas normais de parcela quando se trabalha com esta tecnologia.



**Figura 6.** Incompatibilidade dos dados LiDAR (a) e (b).

Outra inconformidade encontrada no decorrer do trabalho de processamento foi o deslocamento da área da parcela (círculo) que na Figura 7 aparece sobre uma estrada. Pode ocorrer no momento do georreferenciamento da parcela em campo ou pelo erro na coleta das informações pelo GPS ou ainda transferência inadequada dos dados para software de apoio.

As linhas na transversal que aparecem na imagem em vermelho representam as linhas do voo LiDAR.



**Figura 7.** Erro da medição de coordenadas com deslocamento da parcela.

## 4.2 Amostragem em campo

Definidas as parcelas que seriam amostradas para aquisição de informações em campo para posterior comparação com os dados de LASER, percebeu-se a necessidade da exata identificação por meio das ortofotos associadas ao LASER, como mostrado na Figura 6. Conhecendo-se os erros que podem ocorrer com a amostragem de pontos com GPS abaixo da vegetação, foram derrubadas duas árvores centrais antes do voo, em cada parcela e posteriormente coletadas as coordenadas com o GPS instalado sobre um tripé em uma barra de alumínio, que permitiu sua elevação em altura até 8 metros, como forma de minimizar o multicaminhamento provocado pelo dossel. Também foram derrubados indivíduos que se encontravam nas extremidades das parcelas o que garantiu excelente visualização do local onde foram coletados os dados no campo.



**Figura 8.** Derrubada de duas árvores centrais nas parcelas em momento anterior ao voo, para identificação aérea.

Previamente foram efetuados testes de campo para definir o tempo de permanência do receptor GPS garantindo uma precisão aceitável para identificação do ponto central na parcela e também nos dados LASER para efetuar a correção quando necessário. Em diferentes pontos os equipamentos foram montados e nivelados, permanecendo por aproximadamente 5, 10 e 15 minutos, nos locais onde já haviam sido derrubadas as árvores centrais. O valor de precisão horizontal aceitável na coleta do ponto central da parcela foi definido em 0,5 m, definido pela empresa contratante.

#### **4.3 Medições das alturas observadas no campo**

Após determinado o centro da parcela com a derrubada das duas árvores centrais, foi estabelecido o raio de abrangência, esticando-se uma corda que media o raio da parcela. A medição das alturas e diâmetros das árvores foi executada por operadores treinados que estabeleceram a altura total com Clinômetro Eletrônico Haglöf, possibilitando a medição de altura a qualquer distância pré-estabelecida nas configurações do aparelho, facilitando assim a definição do ponto em que o operador melhor visualizava a árvore. Observava-se primeiramente a base da árvore, e em seguida seu ápice, sendo apresentado o valor de medição diretamente em uma tela digital que automaticamente elimina qualquer erro de

cálculo. Em seguida foi medido o CAP (circunferência à altura do peito, tomado a 1,3 m do solo) de forma direta, em todas as árvores utilizando fita métrica.

As árvores que foram derrubadas nos pontos centrais das parcelas foram cubadas medindo-se os diâmetros nas alturas 0,1 m; 0,7 m; 1,3 m e 2 m. Acima desta altura foram medidas seções de 2 metros até atingir a altura total. Os diâmetros com casca foram mensurados com a suta e a altura total com trena.

O levantamento aéreo ocorreu nos meses de janeiro a março de 2012 sendo sobrevoadas as áreas conforme as condições climáticas favoráveis para obtenção das informações do LiDAR e também de boas condições para obtenção das fotografias aéreas.

#### 4.4 Configurações operacionais do recobrimento aéreo

O voo para coleta dos dados de LASER das fazendas da empresa Fibria Celulose S.A. iniciaram no mês de janeiro e tiveram término em março/2012. Após esse período a empresa responsável pela coleta das informações estabeleceu o período de dois meses para criação da base de dados unindo os dados de LASER com as informações obtidas pelo GPS e IMU além da separação das informações de MDT e de MDS.

O sobrevoo da área ocorreu em duas etapas que contemplaram variações específicas para a coleta das nuvens de pontos diferenciadas quando são obtidas informações nas densidades de pontos de LiDAR diferenciadas. As especificações são descritas na Tabela 3.

**Tabela 3.** Configuração de operação para obtenção de dados LiDAR

Configurações do levantamento aéreo para obtenção de dados LiDAR:		
Densidade de pontos (pontos/m <sup>2</sup> )	5	10
Altura do Voo (m)	2.000	2.000
Largura da Faixa (m)	726,6	350
Sistema de Obtenção dos dados	LiDAR Harrier	LiDAR Harrier
Frequência de operação (khz)	300	400
Ângulo de divergência (mrad)	≤0,5	≤0,5
Ângulo de Abertura (graus)	60	45

Para obtenção das imagens aéreas foi utilizado o sistema *Digital Mapping Câmera* e largura de faixa de 2764,72 m. A direção do voo utilizada foi alternada com sobreposição lateral de 30% para o LASER e para as fotografias aéreas garantindo assim que toda a área fosse amostrada.

O levantamento aerofotogramétrico compreendeu a obtenção de ortofotos com resolução espacial de 15 centímetros com imagens no espectro visível em cores verdadeiras. Na obtenção das imagens a cobertura de nuvens não ultrapassou o máximo de 1% da área do imóvel em questão para não reduzir a visibilidade das fazendas e interpolação com os dados LASER. Não foi permitida no decorrer do levantamento uma variação de altura superior a 5% para evitar a perda da qualidade dos parâmetros geométricos previstos para as imagens.

Os dados coletados foram pré-processados, corrigindo-se a diferença de frequência entre GPS, IMU e o LASER, garantindo que todas as informações do voo incluindo as ortofotos estivessem no mesmo sistema de coordenadas, utilizou-se neste estudo, o SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), além da construção de um arquivo de dados contendo as informações do LiDAR obtidas no voo com densidade de 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup>. O processamento foi iniciado, utilizando-se o *Software* FUSION/LDV que auxilia na visualização da ortofoto, do MDT e da nuvem de pontos tridimensional, representando as árvores do plantio.

Os dados brutos foram gerados no formato “#.LAS” separados em quatro arquivos para cada densidade de pontos:

- Pontos no solo (MDT);
- Pontos no dossel da florestal (MDS);
- Nuvem de pontos (NP);
- Curvas de Nível (CN).

#### 4.5 Estimativas das variáveis dendrométricas a partir de dados LiDAR

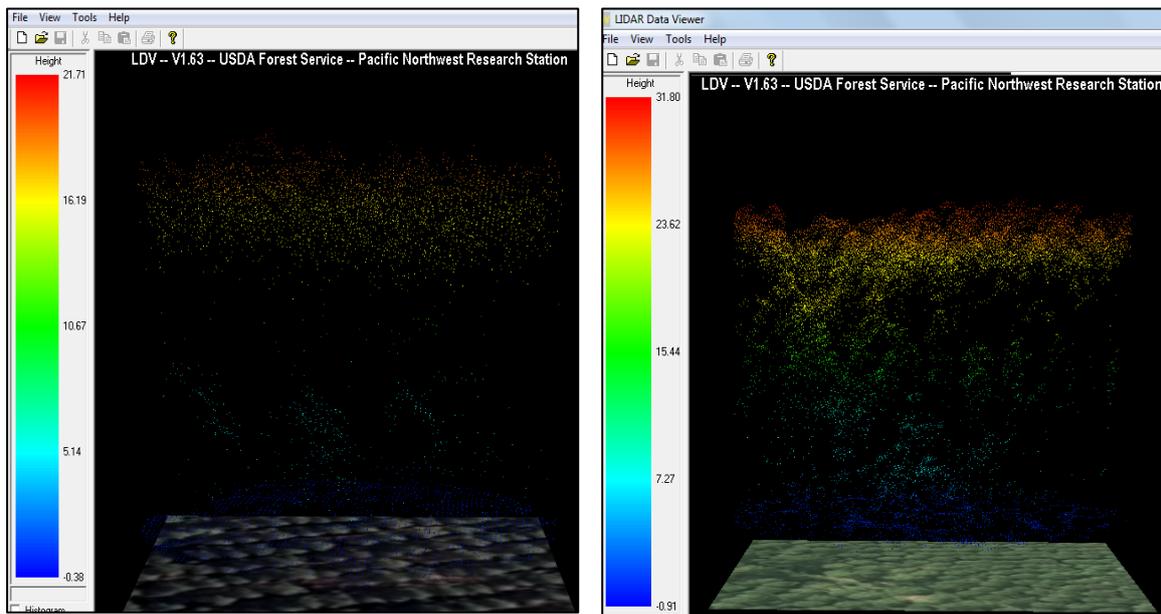
O trabalho inicial de reconhecimento e identificação via imagem das parcelas que foram medidas foi importante para a interpretação da distribuição espacial e conferência da localização das parcelas com o croqui de localização das parcelas criado na fase de planejamento do voo.

Para a medição das alturas das árvores a partir dos dados LASER foi utilizado o *Software Free FUSION/LDV* criado especificamente para a área florestal e facilmente aplicável para esta atividade.

O software permite a entrada das informações em tela inicial onde pode-se identificar as parcelas com “buffer” de raio da parcela ou ainda identificado o centro da parcelas a partir das árvores abatidas em campo. Em uma tela auxiliar (LDV) as informações em 3D permitem a identificação da altura total da parcela assim como individualizar manualmente em um círculo as informações referentes as árvores da parcela, medindo assim a base (pontos de Laser mais baixos encontrados dentro do cilindro) e ápice ou ponto mais alto dentro da nuvem de pontos selecionada.

Este trabalho de individualização foi repetido para todas as árvores dentro da parcela e assim para as parcelas medidas em campo para a comparação neste estudo.

Na Figura 9(a e b) as informações são obtidas de uma cópia da janela auxiliar LDV onde são medidas e individualizadas as árvores da parcela. A Figura 9 (a) exemplifica uma fazenda com 3 anos de idade e 5 pontos/m<sup>2</sup>. Mostra uma nuvem de pontos mais fina, porém com pontos representando a copa ao nível do terreno. Abaixo da nuvem de pontos, a ortofoto auxilia na identificação e localização das copas. A escala apresentada à esquerda da imagem se ajusta automaticamente de acordo com a amplitude dos dados selecionados, sendo que na Figura 9 (a) a variação vai de 0 a 21 m e na Figura 9 (b) a escala varia de 0 a 31 m. A Figura 9 (b) expressa uma parcela com plantio de 8 anos com nuvem de 10 pontos/m<sup>2</sup>, no qual se pode, visualmente, identificar a diferença entre a densidade de pontos nas duas resoluções adotadas para aquisição LiDAR.



(a)

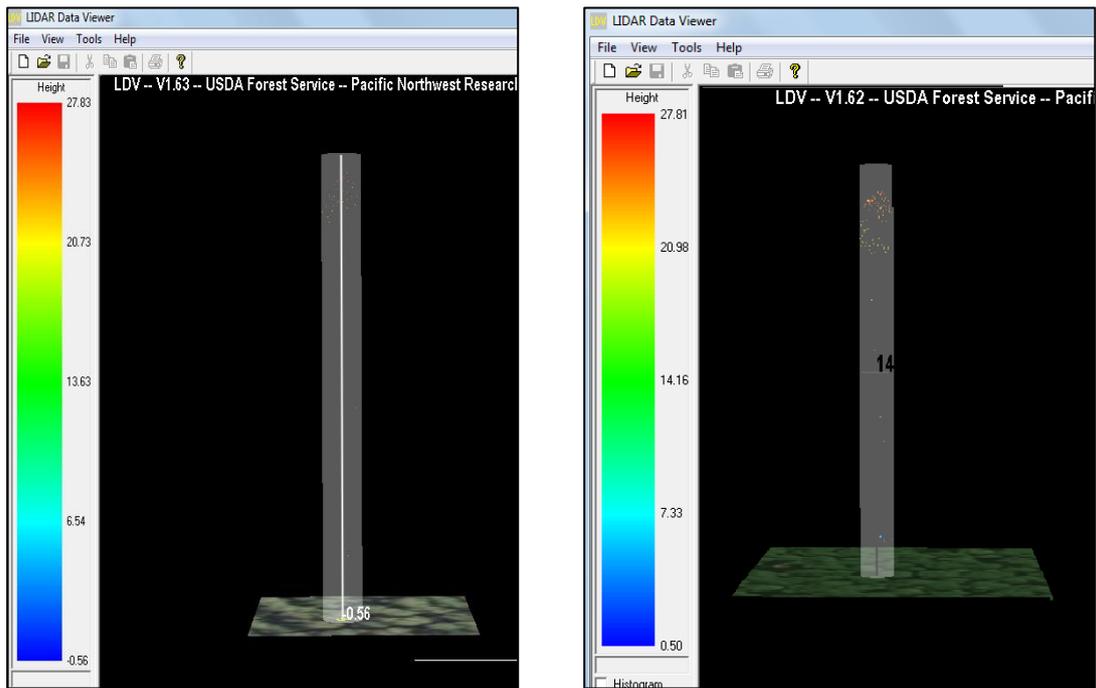
(b)

**Figura 9.** Visualização de parcelas representadas por 5 (a) e 10 pontos/m<sup>2</sup> (b).

Configurada a tela FUSION e identificada a parcela a partir do *buffer* e com conferência na ortofoto para posicionamento do local das árvores derrubadas, a área foi realmente delimitada de forma manual e em seguida automaticamente aberta a janela de visualização e medição LDV. Na janela LDV os pontos de LASER são visualmente classificados em relação à altura que está representando, sendo sempre os pontos localizados no ápice das copas de maiores alturas apresentados na cor vermelha e os pontos pertencentes ao solo apresentados na cor azul.

A medição das alturas, que foi realizada na Janela LDV do FUSION, foi gravada em uma planilha em formato “.xls” onde se pode acessar informações auxiliares referentes a árvore, como por exemplo a altitude da mesma em relação ao nível do mar, informações de coordenadas geográficas, entre outras.

Alguns problemas isolados foram encontrados nesta etapa como, por exemplo, quando na área da árvore selecionada nenhum ponto de LASER atingiu o solo, principalmente quando se trabalha com 5 pontos/m<sup>2</sup> e as árvores apresentam vários galhos ou sub-bosque como apresentado na Figura 10, onde o sub-bosque confunde a identificação das copas das árvores formando uma nuvem de pontos abaixo das alturas de copa.



(a)

(b)

**Figura 10.** Cilindro vertical para encaixe da árvore e medição de altura com 5 (a) e 10 pontos/m<sup>2</sup> (b).

Uma solução imediata para este problema é a integração do sistema LiDAR aerotransportado com o sistema LiDAR terrestre o qual vai buscar informações no terreno e minimizar as dúvidas referentes a interpretação de copas e galhos.

Para estimativa do DAP a partir das informações da altura total medida no LiDAR foi aplicado o modelo parabólico para relação hipsométrica, tomado na sua forma inversa testado por Oliveira, 2011 que verificou uma melhor ajuste para este método em relação aos demais sendo que o autor possuía para sua avaliação os dados nas mesmas condições que para esta pesquisa. A equação tem a seguinte forma:

$$DAP = \beta_0 + \beta_1 HT + \beta_2 HT^2 + \varepsilon_i$$

em que

DAP = Diâmetro (cm) à altura do peito (tomado a 1,3 m do solo);

HT = altura total (m);

$\beta_i$  = parâmetros estimados;

$\varepsilon_i$  = erro associado ao modelo.

A equação foi ajustada com base nas informações do inventário florestal para determinação dos parâmetros a serem utilizados na estimativa do DAP em função das alturas medidas com os dados de LiDAR 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup>.

Para as estimativas de volume foi utilizado a equação de Schumacher-Hall com dados de 6 árvores cubadas por parcela, derrubadas para a marcação das mesmas.

$$V = \beta_0 DAP^{\beta_1} HT^{\beta_2} + \varepsilon_i$$

em que:

$V_i$  = volume total com casca (m<sup>3</sup>);

$DAP$  = diâmetro à altura do peito (cm), tomado a 1,3 metros do solo;

$HT$  = altura total (m)

$\beta$  = parâmetros estimados;

$\varepsilon_i$  = erro associado ao modelo.

O volume de referência foi avaliado em função do R<sup>2</sup> (coeficiente de determinação) e Syx (Erro padrão da média) e interpretado visualmente o gráfico de resíduos em percentagem calculado como segue:

$$Res\% = \frac{(V_{real} - V_{est})}{V_{real}} * 100$$

As alturas de referência obtidas de forma indireta mas em campo, como seguem os inventários convencionais, assim como o DAP obtido de forma direta, dão subsídios para determinação do volume das árvores e estimativas para volume das parcelas. Porém a conferência do volume que será utilizado como referência deve seguir os critérios utilizados em inventários florestais convencionais, como avaliação do Syx (erro padrão da estimativa) e avaliação visual do gráfico de Resíduos.

#### 4.6 Comparação entre as médias de referência com as médias obtidas no LiDAR

As alturas obtidas no inventário convencional foram consideradas como sendo as alturas de referência e as alturas de todas as árvores da parcela medidas com o LASER de 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup> foram denominadas como “alturas estimadas”. Foi encontrado a média para cada parcela nos diferentes método de medição e com isso estabelecido a diferença existente entre o método referência (àquele de mensurações de altura das árvores em campo) com o designado método LASER 5 pontos/m<sup>2</sup>. O mesmo procedimento comparativo foi realizado com o método LASER 10 pontos/m<sup>2</sup>. Em ambas as análises comparativas, foram separados os dados pelas diferentes idades que contemplam os plantios.

O DAP de referência foi medido em campo no inventário convencional e o DAP estimado é dado pela equação hipsométrica, na forma inversa calculado em relação às alturas estimadas pelos dados geradas do LiDAR, sendo que para cada idade foi ajustada uma equação específica.

A equação de volume de Schumacher-Hall foi ajustada utilizando dados de árvores derrubadas na demarcação das parcelas, todas as árvores abatidas tiveram sua altura parcial, total e seus diâmetros parciais medidos com trena e duas medições perpendiculares com suta. Com essa equação obtiveram-se os volumes denominados de “referência” e “estimado”. Para a determinação do volume de referência, utilizou-se como entrada na equação de volume, o DAP e a altura medidos em campo, enquanto que para o volume estimado, as variáveis de entradas (DAP e altura) foram geradas com dados LiDAR de 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup>, como descrito nos parágrafos anteriores.

As informações do inventário convencional e estimadas com os métodos alternativos para altura, DAP e volume, passaram por teste de homogeneidade das variâncias por meio do teste de Bartlett, utilizando-se  $\alpha \leq 0,05$ . Sendo identificadas variâncias homogêneas, foi então realizada uma análise de variância para o delineamento inteiramente casualizado e neste caso, com F significativo ( $\alpha \leq 0,05$ ). Aplicou-se ainda o teste de comparação de médias de Dunnett ( $\alpha \leq 0,05$ ). Utilizando-se a correlação de Person, avaliaram-se também a relação existente entre as variáveis “idade” e “declividade” e as diferenças existentes entre os métodos de

medição (BISQUERRA et al., 2004). A expressão que representa a correlação é apresentada a seguir:

$$r = \frac{S_{yx}}{S_x S_y}$$

em que

$S_{yx}$  = covariância;

$S_x$  e  $S_y$  = produtos de desvio padrão.

O teste de Dunnett foi escolhido entre os testes estatísticos, pois o mesmo avalia uma medição de referência com as demais médias obtidas nos diferentes tratamentos testados durante a pesquisa.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Teste de permanência do DGPS

Para determinação do melhor tempo de permanência do GPS para determinação das coordenadas centrais das parcelas iniciou com a decisão de que o tempo adequado seria determinado pela precisão horizontal, a qual não poderia ser superior a 0,5 m, informação determinada por responsáveis pelo levantamento e pelo estudo dentro da empresa contratante.

Foram testados 13 pontos de controle e na Tabela 4 apresenta-se um resumo das informações obtidas, onde, os tempos de permanência do GPS foram adequados para a precisão pré-estabelecida, sendo que o tempo de permanência de 5 minutos na média não foi inferior aos demais e apresentou precisão horizontal dentro do esperado, ou seja, inferior a 0,5 metros.

**Tabela 4.** Precisão horizontal com diferentes tempos de permanência do DGPS

<b>Ponto</b>	<b>Duração (min)</b>	<b>Precisão Horizontal (m)</b>
1	05:40	0,468
2	16:51	0,346
3	05:26	0,297
4	10:40	0,421

### 5.2 Estimativa das variáveis dendrométricas com dados LiDAR

#### 5.2.1 Altura

Como mencionado na metodologia as médias das alturas medidas pelo método de referência e àquelas estimadas pelo procedimento LiDAR por densidade de pontos diferentes

foram testados com o teste de Bartlett ( $\alpha \leq 0,05$ ), indicando que as variâncias são homogêneas. O teste F da ANOVA foi significativo para o mesmo nível de significância para as médias que apresentaram alguma diferença do método de referência com os estimados e então as análises dos dados foram encaminhadas para o teste de comparação de médias. Quando o teste F apresentou resultado não significativo, as médias automaticamente eram iguais. O teste de comparação de médias de Dunnett ( $\alpha \leq 0,05$ ) foi aplicado comparando o valor de referência com o valor de cada método estimado como mostrado na Tabela 5. Consta ainda nessa tabela, o erro médio em percentual para os dois métodos testados calculados em relação às alturas determinadas em campo pelo hipsômetro, além dos coeficientes de variação (CV%) e as médias das alturas dos 3 métodos.

Povoamentos com idades 3, 4 e 7 anos tiveram as médias obtidas pelos 3 métodos consideradas iguais, porém o procedimento utilizando dados LiDAR com densidade 10 pontos/m<sup>2</sup> apresentou o menor erro médio (%). Para o mesmo método a média da altura representou bem o inventário do plantio com 6 anos; já para o plantio com 4 anos, a melhor média, comparada com o inventário florestal convencional, foi derivada do uso LiDAR de 5 pontos/m<sup>2</sup>.

As idades de 5 e 8 anos apresentaram pelo teste de Dunnett médias diferentes do inventário de campo, porém com erro inferior a 15%. Quando se trabalha com inventário de campo utilizando hipsômetro para determinação das alturas, assume-se que um erro está ligado a esta medição indireta e geralmente não é possível identificar sua magnitude. Esses erros podem ser gerados pela interpretação de cada operador em identificar o ponto mais baixo e mais alto da árvore, principalmente em áreas declivosas e ou com elevada frequência de árvores por hectare.

**Tabela 5.** Média das alturas medidas por parcela e resumo do teste estatístico para cada talhão

Idade (anos)	Parcela	Média da altura (m)			RQEM%		
		Real	LiDAR 5 Pontos	LiDAR 10 pontos	5 Pontos	10 pontos	CV%
3 anos	103	16,41	14,64	15,60			
	100	18,25	17,46	18,35			
	105	16,63	16,36	17,39			
	107	16,31	14,97	16,34			
	108	17,19	16,38	17,71			
	113	19,29	18,52	19,81			
	111	16,43	16,51	17,65			
Média		17,21 a	16,40 a	17,55 a	5,76	3,97	7,52
4 anos	79	20,61	21,49	22,04			
	81	18,91	21,08	21,28			
	83	20,88	21,88	22,35			
	89	21,89	23,06	23,88			
	82	21,07	22,33	22,40			
	84	21,43	23,67	24,11			
	85	20,89	22,03	22,5			
	86	21,35	21,87	22,34			
	87	22,17	24,33	24,29			
	88	17,92	19,61	19,69			
Média		20,71 a	22,13 a	22,40 a	7,40	8,89	6,20
5 anos	53	22,55	24,46	24,52			
	54	25,75	27,12	27,31			
	55	24,11	28,25	28,40			
	57	21,2	24,73	25,26			
	58	25,39	26,25	27,05			
	60	25,39	24,22	25,89			
	61	22,60	25,00	24,96			
Média		23,95 a	25,85 b	26,28 b	10,37	10,42	5,88
6 anos	75	24,63	26,78	26,86			
	76	23,3	26,73	26,67			
	77	22,28	26,36	24,25			
	78	20,18	21,98	21,64			
	70	22,14	22,38	22,53			
	71	22,51	24,86	24,78			
	72	23,55	24,63	24,52			
	74	22,86	26,02	26,08			

*Continua...*

Continuação

Idade (anos)	Parcela	Média da altura (m)			RQEM%		CV%
		Real	LiDAR 5 Pontos	LiDAR 5 Pontos	5 Pontos	10 pontos	
Média		22,68 a	24,96 b	24,66 a	10,84	9,72	6,86
7 anos	67	22,93	25,10	23,48			
	63	22,60	24,51	24,34			
	64	22,34	23,93	24,42			
	69	24,46	25,15	25,00			
	65	23,69	27,49	27,64			
	66	25,47	26,17	25,54			
Média		23,56 a	25,39 a	25,09 a	8,88	8,41	5,30
8 anos	48	23,45	26,57	24,99			
	49	24,82	26,24	27,78			
	44	25,95	28,13	28,95			
	45	25,84	28,78	28,41			
	51	26,99	32,34	30,38			
	43	25,45	28,83	28,92			
Média		25,81 a	28,86 b	28,88 b	12,77	11,22	6,49

Médias seguidas pela mesma letra são consideradas estatisticamente iguais pelo teste de Dunnett  $\alpha \leq 0,05$ . RQEM(%) refere-se a Raiz Quadrada do Erro Médio percentual. CV(%) refere-se ao Coeficiente de Variação percentual.

O desvio padrão e o coeficiente de variação foi também calculado para cada idade, o que pode ser observado na Tabela 6 para os 3 métodos de medição de altura.

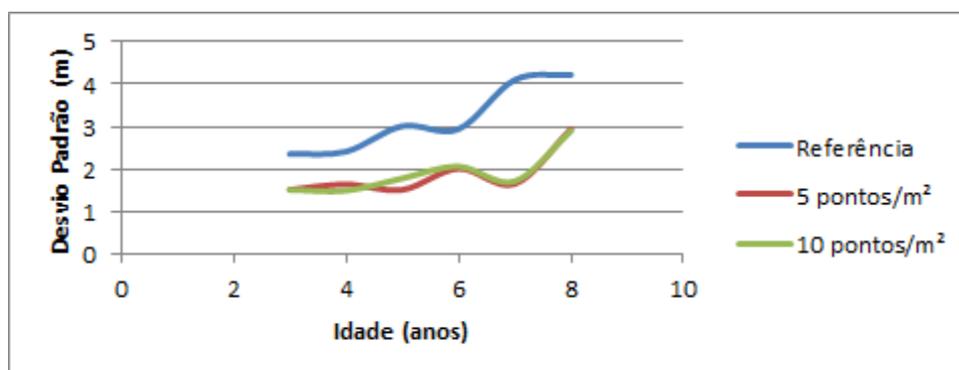
O desvio padrão e coeficiente de variação maior para os valores de referência, medidos em campo, podem ser explicados pela dificuldade na identificação de árvores suprimidas por copas de indivíduos maiores. Nas medições com os dados LiDAR as copas identificadas, em sua maioria, pertenciam às classes de maiores alturas. Resultados similares foram encontrados por Pires (2005), que observou alturas maiores para o procedimento de uso LiDAR, quando comparado diretamente as informações de campo e LiDAR, concluiu-se que as árvores suprimidas não foram identificadas no método alternativo (LiDAR). O autor encontrou um desvio padrão pelo LiDAR de 2,8 m, sendo este valor a metade do desvio padrão para alturas observadas em campo. Já o coeficiente de variação do LiDAR encontrado por Pires (2005) foi 5% inferior nas determinações da altura com o LiDAR.

**Tabela 6.** Desvio Padrão e Coeficiente de Variação (%) das alturas nas diferentes idades.

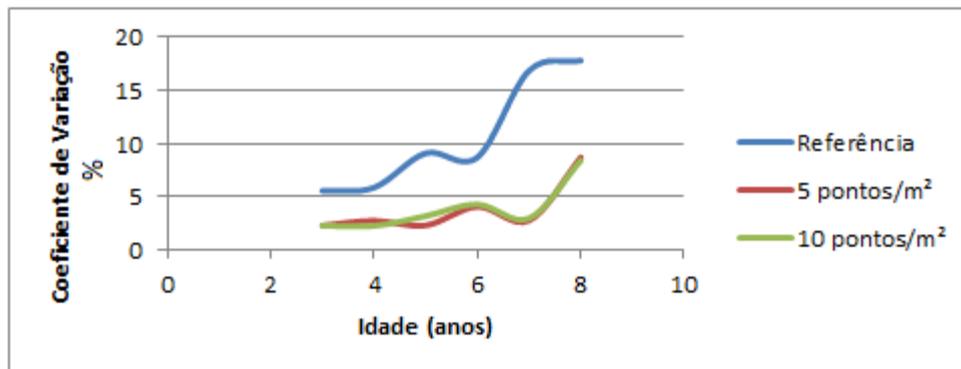
Idade		Real	LiDAR 5 Pontos	LiDAR 10 Pontos
3 anos	Desvio Padrão	2,35	1,51	1,51
	CV%	5,55	2,27	2,26
4 anos	Desvio Padrão	2,41	1,64	1,49
	CV%	5,84	2,72	2,24
5 anos	Desvio Padrão	3,01	1,51	1,78
	CV%	9,08	2,29	3,17
6 anos	Desvio Padrão	2,94	2,01	2,06
	CV%	8,69	4,05	4,26
7 anos	Desvio Padrão	4,10	1,65	1,71
	CV%	16,85	2,75	2,94
8 anos	Desvio Padrão	4,22	2,94	2,90
	CV%	17,80	8,68	8,41

Onde: Desvio Padrão (m), Coeficiente de Variação em percentagem (CV%).

Observa-se que o desvio padrão e o CV% aumentam gradativamente com o avanço da idade do plantio medidos pelo inventário florestal convencional e também pelos dados do LiDAR como é observado na Figura 11 para o desvio padrão e na Figura 12 para o Coeficiente de variação em percentagem.



**Figura 11** - Desvio padrão das alturas nas diferentes idades do plantio



**Figura 12** - Coeficiente de Variação das alturas nas diferentes idades do plantio

O desvio padrão, assim como o coeficiente de variação encontrados entre as medições de 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup>, são valores muito próximos quando avaliados nas mesmas idades, geralmente de igual índice de sítio o que se traduz num desenvolvimento uniforme em termos de crescimento dos talhões de mesma idade de plantio. Pode-se também explicar essa baixa variabilidade nas medidas estatísticas, em consequência da uniformidade do plantio em termos de estrutura do dossel, sendo suas copas, perfeitamente individualizadas e de fácil visualização para o LiDAR e ortofotos, principalmente nas menores idades onde as copas não estão ocupando todo o dossel.

Para determinar se a diferença entre as alturas reais e estimadas tem relação com a idade e a declividade foi calculado o Coeficiente de Correlação de Pearson (Tabela 7).

**Tabela 7.** Coeficiente de Correlação de Pearson entre o desvio da altura real e estimada pelos métodos LiDAR de 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup> com a idade e declividade do plantio.

<b>Desvio entre Altura (m) Real e Estimada via LiDAR</b>				
	<b>LiDAR 5 Pontos</b>		<b>LiDAR 10 Pontos</b>	
	<b>Idade</b>	<b>Declividade</b>	<b>Idade</b>	<b>Declividade</b>
<b>Correlação</b>	0,475	0,162	0,437	0,114

Com a Correlação de Pearson ( $\alpha \leq 0,05$ ) ficou evidente que o desvio entre as alturas está relacionado com a idade do plantio de cada parcela. O desvio existente entre os dois métodos de medição de altura alternativos e o hipsômetro (altura de referência), tem relação com o aumento da idade. Para cada unidade da mesma que for aumentada a diferença entre as alturas real e estimada há acréscimo na ordem de 0,475 e 0,437 para os métodos de 5 e 10

pontos /m<sup>2</sup>, respectivamente. Segundo a classificação de Bisquerra et al. (2004) esses valores se enquadram na correlação “Moderada”.

### 5.2.2 Diâmetro à altura do peito (DAP)

O DAP tem alta correlação com o volume e por isso é importante a sua disponibilidade, além de ser uma medida direta e de fácil obtenção nos inventários florestais convencionais. No inventário convencional de campo foram medidos todos os diâmetros (DAP) das árvores das parcelas e com essas informações foi possível ajustar a equação parabólica para expressar a relação hipsométrica (SCOLFORO, 2006) utilizada por Oliveira (2011). A equação foi ajustada em função das alturas e diâmetros (DAP) medidos em campo e os resultados são apresentados na Tabela 8. Deve ser ressaltado que nesta pesquisa, a variável de fácil obtenção é a altura total, com a qual, estima-se o DAP e então, com uma equação de volume, pode-se estimar o volume de cada árvore.

**Tabela 8.** Ajuste da equação para estimar o diâmetro a 1,3 m (DAP) em função da altura total (HT) com Coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e Erro Padrão da Estimativa (Syx)

Idade (anos)	Coeficientes				Syx (cm)	Syx %
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	R <sup>2</sup>		
3	3,5451	-0,0853	0,0330	0,86	0,84	4,94
4	1,9076	0,2998	0,0124	0,78	0,96	4,73
5	8,6453	-0,1751	0,0181	0,74	1,42	5,98
6	10,7099	-0,5189	0,0288	0,64	1,68	7,42
7	11,2765	-0,3570	0,0200	0,73	1,19	5,05
8	3,3012	0,1642	0,0127	0,86	1,22	4,85

Oliveira (2011) que inicialmente testou essa equação com dados ajustados para a sua área de estudo obtidos por meio de LiDAR encontrou Erro Padrão da Estimativa (Syx) de 0,98 cm e o Erro Padrão da Estimativa em percentagem de 4,9% com Coeficiente de Determinação de 0,98. Zonete (2009) selecionou o modelo da raiz quadrada do diâmetro que apresentou os melhores ajustes tendo R<sup>2</sup> de 0,887 e RQEM% de 0,0004.

Com a equação ajustada foi possível estimar os diâmetros a partir das alturas medidas com o LiDAR para 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup>. A média dos diâmetros (DAP) estimada pelos 3 métodos por local e parcela é apresentada na Tabela 8. Da mesma forma com já explicado para o item anterior, a análise estatística para os diâmetros (DAP) foi realizada com a aplicação do teste de Bartlett, ANOVA e se necessário, o teste de Dunnett foi aplicado, todos com probabilidade  $\alpha \leq 0,05$ .

O erro médio foi calculado em percentagem para os dois métodos de medição estimados em relação à medição em campo e o coeficiente de variação em percentagem para todas as médias de altura das parcelas em cada idade.

Com os modelos hipsométricos (na forma inversa) para estimar o DAP em cada idade, as médias das parcelas foram comparadas com teste de Dunnett ( $\alpha \leq 0,05$ ) e pode-se notar que as idades 3, 6 e 7 anos foram estatisticamente iguais às médias do inventário de referência para os dois métodos de medição alternativos, porém a menor densidade de pontos (5 pontos/m<sup>2</sup>) apresentou menor erro médio para ambos.

O plantio com 4 e 8 anos tiveram médias do DAP obtidos pelo LiDAR, diferentes estatisticamente do inventário florestal e erro superior às demais idades avaliadas, seguindo o mesmo padrão da determinação das alturas. Este fato foi explicado por Oliveira (2011), tendo indicado que se a variável altura de eucalipto é corretamente estimada pelos dados do LiDAR, a tendência é um bom acerto na variável DAP. Zandoná (2006) comparou DAP obtidos em inventário florestal de *Pinus* sp. com os DAP estimados em função da altura medida por dados LiDAR e constatou que quando a altura medida com LiDAR era superestimada, em relação ao campo, o mesmo acontecia com o DAP.

**Tabela 9.** Médias dos diâmetros medidos em campo e estimado pelo método de 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup>, por parcela e nas diferentes idades com os respectivos erros médios e coeficiente de variação.

Idade (anos)	Parcela	Média do DAP (cm)			RQEM%		CV%
		Real	LiDAR 5 Pontos	LiDAR 10 Pontos	5 Pontos	10 Pontos	
3 anos	103	11,28	9,42	10,28			
	100	12,41	12,14	13,12			
	105	11,33	11,00	12,06			
	107	11,44	9,69	10,99			
	108	12,28	11,02	12,41			
	113	14,13	13,31	14,83			
	111	11,80	11,16	12,35			
Média		12,10	a 11,11	a 12,29	a 9,57	5,46	10,88
4 anos	79	13,34	14,10	14,56			
	81	13,00	13,76	13,93			
	83	14,51	14,43	14,83			
	89	14,29	15,45	16,02			
	82	12,77	14,80	14,85			
	84	13,76	15,98	16,37			
	85	13,65	14,56	14,96			
	86	13,77	14,40	14,82			
	87	14,25	15,74	16,54			
	88	11,43	12,58	12,64			
Média		13,48	a 14,58	a 14,95	a 9,50	12,01	7,21
5 anos	53	14,53	15,08	15,25			
	54	16,37	16,54	17,37			
	55	14,55	18,16	18,28			
	57	14,90	15,44	15,80			
	58	14,84	16,55	17,21			
	60	15,20	15,03	16,25			
	61	14,91	15,59	15,56			
Média		15,04	a 16,05	a 16,53	b 10,37	12,13	6,18
6 anos	75	14,96	16,84	17,54			
	76	15,40	16,61	17,37			
	77	14,50	17,03	15,17			
	78	13,05	13,08	12,96			
	70	13,96	13,11	13,64			
	71	13,96	15,62	15,54			
	72	13,25	15,40	15,30			
	74	13,72	16,73	16,78			

Continua...

Continuação

Idade (anos)	Parcela	Média do DAP (cm)				RQEM%		CV%		
		Real	LiDAR 5 Pontos	LiDAR 10 Pontos	5 Pontos	10 Pontos				
Média		14,10	a	15,55	a	15,54	a	13,40	13,07	9,44
7 anos	67	14,69		14,25		13,93				
	63	13,63		14,01		14,47				
	64	13,28		14,01		14,51				
	69	14,41		14,26		14,89				
	65	15,59		16,12		16,72				
	66	14,49		15,66		15,22				
Média		14,35	a	14,72	a	14,96	a	4,54	6,26	6,17
8 anos	48	14,73		12,12		15,46				
	49	15,78		13,81		17,68				
	44	16,64		11,09		18,75				
	45	15,83		15,94		18,28				
	51	17,37		13,49		20,20				
	43	15,45		18,62		18,70				
Média		15,97	a	14,18	a	18,18	a	20,86	14,72	11,75

Teste de Dunnett  $\alpha \leq 0,05$  onde as médias seguidas pela mesma letra são estatisticamente iguais.

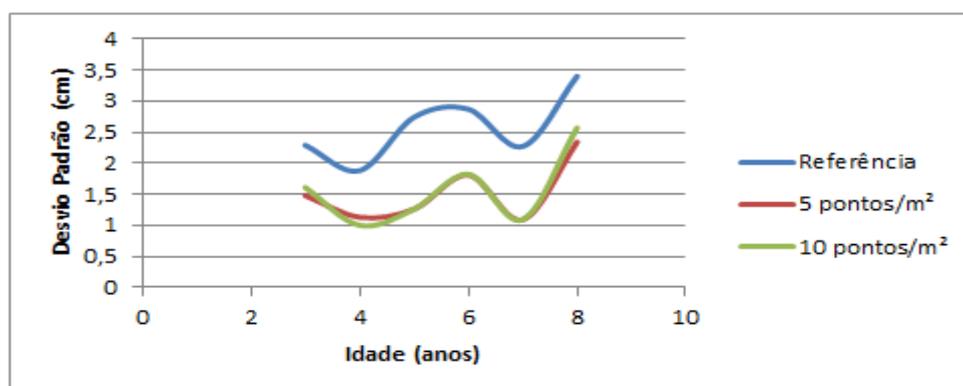
O desvio padrão e coeficiente de variação apresentaram-se sempre inferiores aos medidos em campo (Tabela 10), seguindo a mesma tendência observada com relação à variável altura, podendo ser explicado pela identificação do maior número de árvores presentes no dossel da floresta, ignorando alturas e diâmetros menores e assim reduzindo a variabilidade das estimativas. Porém, em nenhuma das idades o coeficiente de variação e desvio padrão foram superiores a 10%. Resultados similares foram identificados por Zandoná (2006) que estimou o DAP do povoamento de *Pinus* em diferentes espaçamentos com dados LiDAR e comparou com o inventário convencional e obteve coeficiente de variação sempre inferior a 10%.

**Tabela 10.** Desvio Padrão e Coeficiente de Variação (%) para a estimativa do DAP nas diferentes idades

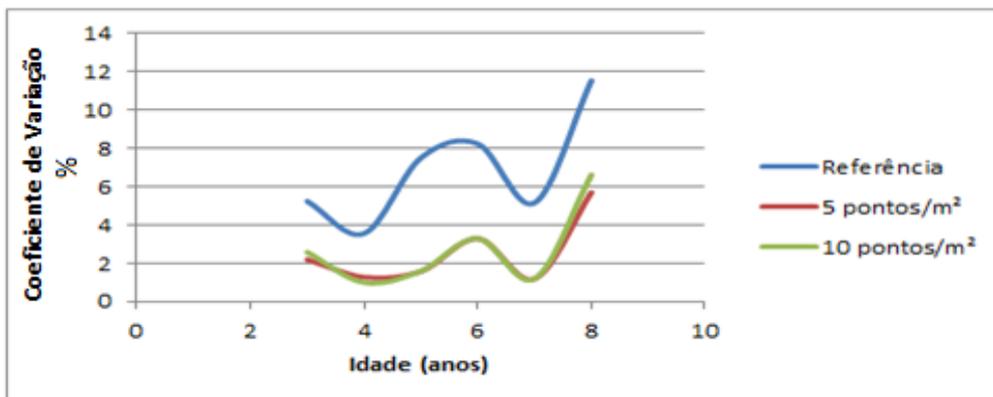
Idade		DAP (cm)		
		Real	LiDAR 5 Pontos	LiDAR 10 Pontos
3 anos	Desvio Padrão	2,29	1,48	1,61
	CV%	5,24	2,20	2,58
4 anos	Desvio Padrão	1,88	1,13	1,00
	CV%	3,56	1,28	1,00
5 anos	Desvio Padrão	2,74	1,26	1,26
	CV%	7,51	1,58	1,60
6 anos	Desvio Padrão	2,87	1,81	1,82
	CV%	8,24	3,29	3,30
7 anos	Desvio Padrão	2,27	1,09	1,09
	CV%	5,16	1,19	1,19
8 anos	Desvio Padrão	3,40	2,34	2,57
	CV%	11,54	5,71	6,62

Onde: Desvio Padrão (m), Coeficiente de Variação em percentagem (CV%).

É observado na Figura 13 o desvio padrão entre o DAP de referência e o DAP estimado pelo método LiDAR 5 pontos/m<sup>2</sup> e LiDAR 10 pontos/m<sup>2</sup>, assim como na Figura 14 o coeficiente de variação para os mesmos dados. Como já comentado, o desvio padrão e o coeficiente de variação do inventário de referência sempre foram superiores aos estimados fato que possivelmente ocorre porque a variabilidade encontrada na floresta abrange todas as classes diamétricas e na estimativa LiDAR observa-se a altura dos indivíduos e estima-se o DAP em relação a alturas identificadas nos dados LiDAR, sendo que neste caso as alturas das classes inferiores nem sempre são identificadas e medidas.



**Figura 13** - Desvio Padrão para o DAP de referência e estimados pelo LiDAR



**Figura 14** - Coeficiente de variação para DAP de referência e estimados pelo LiDAR

A correlação de Pearson foi determinada para verificar a influência da idade e da declividade sobre o desvio padrão entre o DAP real e os diâmetros (DAP) estimados pelos métodos de 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup> (Tabela 11).

**Tabela 11.** Coeficientes de correlação de Pearson entre o desvio do diâmetro (DAP) real e os diâmetros estimados pelos métodos testados em relação à Idade e à Declividade.

<b>Desvio entre Diâmetro Real e Estimado via LiDAR</b>				
	<b>LiDAR 5 pontos</b>		<b>LiDAR 10 pontos</b>	
	<b>Idade</b>	<b>Declividade</b>	<b>Idade</b>	<b>Declividade</b>
<b>Correlação</b>	0,767	-0,112	0,692	0,112

A relação da diferença entre o DAP de referência e estimado com a idade do plantio é considerada como sendo “alta” segundo a classificação de Bisquerria et al. (2004). Pode-se dizer então, que a cada unidade da idade que é aumentada, aumenta a diferença entre os métodos de medição na ordem de 0,767 e 0,692, respectivamente para os métodos de 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup>. Da mesma forma como constatado para a altura, a declividade parece não influenciar na medição dos diâmetros pelos dois métodos testados, apresentando uma baixa correlação.

### 5.2.3 Volume

Utilizando as árvores amostradas e cubadas em campo, foi ajustado no *Software SAS* o modelo de Schumacher-Hall para estimar o volume com casca total com os métodos alternativos, em função do DAP e da altura estimados pelos métodos 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup>. A equação ajustada e as estatísticas estão a seguir:

$$v = -9,767(\text{DAP})^{2,30367} (\text{HT})^{0,57464}$$

$$R^2 = 0,98$$

$$\text{Syx} = 7,52\%$$

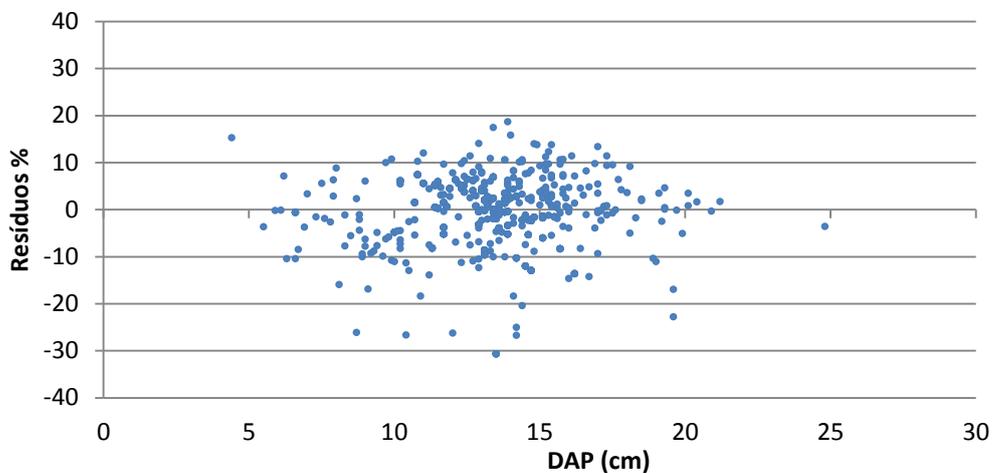
Onde:

v = volume total com casca (m<sup>3</sup>)

DAP = diâmetro com casca a 1,3 m (cm)

HT = altura total (m)

O modelo ajustado tem bons indicadores estatísticos e uma distribuição de resíduos apropriada (Figura 15). Oliveira (2011), utilizando a mesma equação ajustada e DAP estimados em função da altura, encontrou R<sup>2</sup> ajustado de 0,98 e Syx de 5,3% e dentre as parcelas avaliadas não houve diferença significativa do volume individual. Zonete (2009) também utilizou o modelo de Schumacher-Hall com R<sup>2</sup> = 0,94 e RQEM = 0,104 m<sup>3</sup>.



**Figura 15.** Distribuição dos resíduos do modelo de Schumacher-Hall para estimar o volume.

Com a equação ajustada, foram estimados os volumes médios para todas as árvores das parcelas medidas pelos dois métodos e em campo (real), a partir dos quais, as análises estatísticas foram realizadas. Da mesma forma como já explicado para o item anterior, a análise estatística para os volume foi realizada com a aplicação do teste de Bartlett, ANOVA e se necessário, o teste de Dunnett foi aplicado, todos com probabilidade  $\alpha \leq 0,05$ .

Para valores de volume médio das parcelas as idades 3, 5, 6 e 7 anos apresentaram médias iguais estatisticamente ao volume médio de referência com  $\alpha \leq 0,05$  pelo teste de Dunnett. Não se observa nos dados um padrão de erro em relação à densidade de pontos. As idades 4 e 8 anos não apresentaram médias iguais ao volume de referência e o erro variou entre 30 e 60% para essas idades. O erro encontrado na estimativa de volume representa um erro acumulado pela diferença obtida na medição de altura e da estimativa do diâmetro, que são variáveis independentes na equação do volume.

O modelo utilizado também apresenta suas particularidades principalmente a utilização do DAP quadrático e altura sendo elevada a 0,57464, ou seja, o DAP tem maior valor de importância dentro do modelo enquanto a altura, a principal medida para este trabalho representa metade do valor de importância, este fato pode ter influenciado significativamente no resultado do volume.

**Tabela 12.** Volume médio das parcelas (m<sup>3</sup>) para o método real e os estimados via LiDAR com seus respectivos erros médios (%) e coeficiente de variação (CV%).

Idade (anos)	Parcela	Volume médio (m <sup>3</sup> )			RQEM%		CV %
		Real	LiDAR 5 Pontos	LiDAR 10 Pontos	5 Pontos	10 Pontos	
3 anos	103	0,076	0,046	0,059			
	100	0,101	0,093	0,115			
	105	0,077	0,071	0,092			
	107	0,078	0,051	0,071			
	108	0,095	0,072	0,099			
	113	0,140	0,119	0,159			
	111	0,084	0,074	0,098			
		0,0931 a	0,0758 a	0,0998 a	21,26	14,46	30,17
4 anos	79	0,1274	0,1482	0,1619			
	81	0,1141	0,1386	0,1432			
	83	0,1558	0,1580	0,1701			
	89	0,1544	0,1909	0,2115			
	82	0,1166	0,1696	0,1709			
	84	0,1398	0,2096	0,2233			
	85	0,1352	0,1618	0,1742			
	86	0,1398	0,1571	0,1699			
	87	0,1545	0,2309	0,229			
	88	0,0823	0,1083	0,1095			
		0,1320 a	0,1646 b	0,176 b	31,64	37,32	19,49
5 anos	53	0,163	0,186	0,191			
	54	0,232	0,244	0,275			
	55	0,170	0,310	0,316			
	57	0,167	0,197	0,215			
	58	0,183	0,240	0,268			
	60	0,191	0,184	0,229			
	61	0,173	0,204	0,203			
		0,183 a	0,223 a	0,241 a	32,81	38,58	18,3
6 anos	75	0,183	0,253	0,278			
	76	0,190	0,274	0,271			
	77	0,161	0,257	0,188			
	78	0,119	0,126	0,122			
	70	0,147	0,138	0,141			
	71	0,148	0,204	0,201			
	72	0,135	0,196	0,193			
	74	0,144	0,245	0,247			
		0,153 a	0,207 a	0,205 a	44,95	41,76	25,15

Continua...

Continuação

Idade (anos)	Parcela	Volume médio (m <sup>3</sup> )			RQEM%		CV %
		Real	LiDAR 5 Pontos	LiDAR 10 Pontos	5 Pontos	10 Pontos	
7 anos	67	0,169	0,186	0,151			
	63	0,140	0,172	0,168			
	64	0,131	0,161	0,170			
	69	0,167	0,187	0,183			
	65	0,197	0,249	0,253			
	66	0,174	0,211	0,195			
		0,164 a	0,194 a	0,187 a	20,05	16,94	17,45
8 anos	48	0,172	0,246	0,199			
	49	0,208	0,241	0,289			
	44	0,241	0,304	0,338			
	45	0,215	0,331	0,316			
	51	0,273	0,519	0,414			
	43	0,202	0,333	0,337			
		0,218 a	0,329 b	0,316 b	59,26	47,59	25,67

Teste de Dunnett, médias seguidas pela mesma letra são consideradas estatisticamente iguais  $\alpha \leq 0,05$ .

Aplicado a correlação de Pearson ( $\alpha \leq 0,05$ ) observou-se que as idades tem correlação “muito alta” com o desvio entre o volume real e o estimado segundo a classificação de Bisquerra (2004).

**Tabela 13.** Coeficientes de correlação de Pearson entre o desvio do diâmetro (DAP) real e os diâmetros estimados pelos métodos testados em relação à Idade e à Declividade

Desvio entre volume real e estimada via LiDAR				
	Real x LiDAR 5 pontos		Real x LiDAR 10 pontos	
	Idade	Declividade	Idade	Declividade
<b>Correlação</b>	0,99976	0,11291	0,99996	0,10920

O desvio entre o volume real e estimado com a idade do plantio é considerado como sendo “muito alto” segundo a classificação de Bisquerra et al. (2004), podendo-se dizer que a cada unidade da idade que é aumentada, aumenta a diferença entre os métodos de medição na ordem de 0,999 tanto com 5 como com 10 pontos/m<sup>2</sup>. Da mesma forma como constatado para a altura e o diâmetro, a declividade parece não influenciar no desvio para os dois métodos testados.

## 6. CONCLUSÕES

- As médias de altura, diâmetro (DAP) e volume obtidas pelo LiDAR com densidades de 5 e 10 pontos/m<sup>2</sup>, em geral, apresentaram resultados estatisticamente iguais aos dados obtidos em campo, exceto para povoamentos de *Eucalyptus* sp de idade mais avançada, considerado no presente caso, plantios de 8 anos.
- Os erros médios obtidos ficaram entre 3,97 a 12,77%; 4,54 a 20,89% e 14,46 a 59,26%, respectivamente para a altura, DAP e volume.
- Os desvios entre os dados obtidos pelo LiDAR em relação aos dados de campo apresentaram uma boa correlação com a idade do plantio, indicando que essa variável pode ser monitorada a partir da informação LiDAR, em uma escala mais ampla de análise. O mesmo não acontece com a variável declividade do terreno, que traz influências errôneas nas estimativas de alturas por essa tecnologia, necessitando de calibrações e correções mais minuciosas no tratamento desses dados LiDAR.
- A medição da altura se torna mais difícil na tecnologia LiDAR com o aumento da idade do *Eucalyptus* spp., porque as copas nas idades jovens têm um formato de cone, alterando-se para uma forma mais achatada.

## 7. RECOMENDAÇÕES

- Recomenda-se para trabalhos futuros testar outros formatos de parcelas como quadradas ou retangulares que facilitam a identificação pela imagem LiDAR e ortofoto, identificando as árvores individualizadas medidas durante o caminhar em campo no inventário convencional. Isto poderá facilitar ainda mais as comparações, contribuindo com melhor posicionamento dos indivíduos para aquisição das informações das variáveis dendrométricas pelo LiDAR.
- Ampliar o uso de dados LiDAR na área florestal (colheita, estradas, topografia, dentre outras) garantido um melhor aproveitamento das informações geradas pelo voo a fim de reduzir os custos da aquisição do mesmo.
- Utilizar dados LiDAR terrestre para melhorar as análises e interpretação dos dados LiDAR aéreo e minimizar dúvidas referentes a identificação das copas das árvores, assim como as medições de diâmetro podem ser melhores estimadas.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF – Associação Brasileira de produtores de Florestas plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011**. Editora ABRAF. Brasília, 2012. 150 p.

AES TIETE. Diagnostico Ambiental. In: **Estudo de Impacto Ambiental - EIA do projeto Termo São Paulo - AES Canas**, 2011. Disponível em: <[http://www.redevale.ita.br/eia/Cap\\_IX.1\\_Meio%20Fisico.pdf](http://www.redevale.ita.br/eia/Cap_IX.1_Meio%20Fisico.pdf)> Acesso em: Dez de 2012. 409 p.

AGROTECA TANABI. Disponível em: <[http://www.agrotecatanabi.com.br/vendasmudas\\_eucalpto.html005](http://www.agrotecatanabi.com.br/vendasmudas_eucalpto.html005)>. Acesso em: 20 mar. 2012.

ALMEIDA, F.; **O segredo de voar bem**. Disponível em: <<http://www.aerodesign.ufsc.br/teoria/periodicos/voarbem.pdf>>. Acesso em 20 set. 2012.

BARRA, O. S. V. **Inventarios Forestales: Muestreos Tradicionales**. Universidade De Talca, Serie Técnica nº2, 2000. 161 p.

BALTSAVIAS, E. P. A. Comparison Between Photogrammetry and LASER Scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 54, 1999, p. 83-94.

BALTSAVIAS, E. P. Airborne LASER Scanning: existing systems and firms and other resources - **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 54, 1999a, p. 164-198.

BALTSAVIAS, E. P. Airborne LASER Scanning: Basic Relations And Formulas - **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 54, 1999b, p. 199-214.

BISQUERRA, R.; SARRIERA, J.C.; MARTÍNEZ, F. **Introdução À Estatística: Enfoque Informático com o Pacote Estatístico SPSS**; Tradução Fatima Murad – Porto Alegre, Editora ARTMED, 2004, 256 p.

BRANDALIZE, A. A. Perfilamento a LASER: Comparação Com Métodos Fotogramétricos. In.: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, **Anais ...** CD ROM, Porto Alegre, 2001. Sem paginação.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 3. ed. - Viçosa, MG: Editora UFV, 2009, 548 p.

CENTENO, J. A. S.; MITSHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis, v. 1, p. 3645-3652

CLARK, M.L.; CLARK, D. B.; ROBERTS, D. A. Small-footprint LiDAR estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape. **Remote Sensing of Environment**. v. 91. 2004. p. 68-89.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema LASER scanner: conceitos e princípios de funcionamento**. 3. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2003. 97 p.

DRAKE, J.B.; DUBAYAH, R.O.; KNOX, R.G.; CLARK, D.B; BLAIR, J.B. Sensitivity of large-footprint LiDAR to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 378–392, 2002.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

GAMA, F. F.; SANTOS, J. R.; MURA, J. C. Eucalyptus biomass and volume estimation using interferometric and polarimetric SAR data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 2, p. 939-956, 2010.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. **LIDAR: princípios e aplicações florestais**. Pesquisas Florestais Brasileira, Colombo, v.30, n63, 2010. p. 231-244.

HARDING, D. J., 2002. **Principles of airborne laser altimeter terrain mapping**. NASA: Goddard Space Center. Disponível em: <[www.gfsc.nasa.gov](http://www.gfsc.nasa.gov)>. Acesso em: 15 jul. 2012.

HIGASHI, E. N.; SILVEIRA, R. L. V. A.; GONÇALVES, A. N. Propagação vegetativa de Eucalyptus: princípios básicos e a sua evolução no Brasil. **Circular Técnica IPEF** n. 192, 2000, 11 p.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos. 2009. 598 p.

KRAUS, K; PFEIFER, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 53, n. 4, p.193-203, 1998.

LEÃO, R.M. **Floresta e o Homem**. IPEF- São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2000. 447 p.

LIMA, S.R.S.D. **Integração GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletrônicos (MEMS)**. 2005. 136 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

LANG, S; TIEDE, D; MAIER, B; BLASCHKE, T. 3D Forest structure analysis from optical and LIDAR data. **Ambiência**, Guarapuava, PR, Edição especial 1, p. 95-110, 2006.

MACEDO, R.C. **Prognose madeira de plantio clonal de *Eucalyptus spp.* através de dados derivados de LIDAR aerotransportado**. 2009. 133 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. Curitiba, 2009, 316 p.

MOSTAFA, M. M. R; HUTTON, J. Direct positioning and orientation systems – how do they work? Whats is the attainable accuracy?. In: **American society of photogrammetry and remote sensing annual conference, 2001**. St. Louis, Missouri, Proceedings..., 11 p.

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](http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf)>. Acesso em: 02 jul., 2011.

OLIVEIRA, L.T de. **Aplicação do LIDAR no inventário de florestas plantadas**. 2011. 117 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras – Lavras, MG.

ORDEJA, J.M. **Inventarios florestales em bosques tropicales**. Lima, 1982. 416 p.

PIRES, M. P.; **Uso do LiDAR (Light Detection and Ranging) para estimação da altura de árvores em povoamentos de Eucalipto**. 2005. 50 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura Forestal**. Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura (IICA). Costa Rica, 1997. 586 p.

RODRIGUEZ, L.; POLIZEL, J.; FERRAZ, S.; ZONETE, M.; FERREIRA, M. 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. **AMBIÊNCIA**, Guarapuava, v. 6, out. 2010. p. 67-80.

SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. **Inventário florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 561 p.

SCHIMALSKI, M. B. **Classificação da cobertura vegetal a partir dos dados brutos ALS empregando métodos estatísticos de reconhecimento de padrões**. 2009. 200 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR.

SCHIMALSKI, M. B.; MITISHITA, E. A.; NETO, A. C. **Reconhecimento e classificação da cobertura vegetal a partir de informações provenientes do LASER scanning empregando a função discriminante linear de Fisher**. Pesquisas em Geociências, v. 2 (36), 2009. p. 141-148

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: Parte I: Modelos de regressão linear e não-linear; parte II: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento e peso de matéria seca. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 352 p. (Textos Acadêmicos).

SILVA, A.G.P.; GORGENS, E.B.; Rodriguez, L.C.E. SILVA, C.A.S.; ALVARES, C.A.A.; CAMPOS, O.C.; STAPE, J.L. Influência da janela de filtro de terreno em dados LiDAR sob duas coberturas florestais. **X Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal**. 2012, Curitiba. **Anais ... CD ROM**. p. 65-72.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A.L.; **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa, MG. 2º Ed. Editora UFV, 2011. 272 p.

WACK, R.; SCHARDT, M; BARRUCHO, L; LOHR, U; OLIVEIRA, T. **Forest inventory for *Eucalyptus* plantations based on airborne laserscanner 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.

WELTZ, M.A.; RITCHIE, J. C.; FOX, H. D. Comparison of laser and field measurements of vegetation height and canopy cover. **Water Resources Research**, v. 30, n. 5, p. 1311, 1994.

ZANDONÁ, D. F. **Potencial uso de dados laser scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas.** 2006. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba PR.

ZIMBLE, D. A.; EVANS, D.L.; CARLSON, G. C.; PARKER, R.C.; GRADO, S. C.;

GERARD, P. D. Characterising vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 87. p.171. 2003.

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.