



**LUCIANO TEIXEIRA DE OLIVEIRA**

**APLICAÇÃO DO LIDAR NO INVENTÁRIO  
DE FLORESTAS PLANTADAS**

**LAVRAS – MG  
2011**

**LUCIANO TEIXEIRA DE OLIVEIRA**

**APLICAÇÃO DO LIDAR NO INVENTÁRIO DE FLORESTAS  
PLANTADAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração Floresta de Produção, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador  
Luis Marcelo Tavares de Carvalho

Coorientadora  
Maria Zélia Ferreira

**LAVRAS – MG  
2011**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Oliveira, Luciano Teixeira de.

Aplicação do LIDAR no inventário de florestas plantadas /  
Luciano Teixeira de Oliveira. – Lavras : UFLA, 2011.  
109 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Luis Marcelo Tavares de Carvalho.

Bibliografia.

1. Inventário florestal. 2. Modelagem. 3. Local máxima. 4.  
Detecção de árvores. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 634.9285

**LUCIANO TEIXEIRA DE OLIVEIRA**

**APLICAÇÃO DO LIDAR NO INVENTÁRIO DE FLORESTAS  
PLANTADAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração Floresta de Produção, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 5 de agosto de 2011

Prof. André Vital Saúde

Prof. José Roberto Soares Scolforo

Prof. Lucas Resende Gomide

Dra. Maria Zélia Ferreira

Orientador  
Luis Marcelo Tavares de Carvalho

**LAVRAS – MG  
2011**

A minha querida mãe e a um pequeno anjo que teve uma breve  
passagem por esta Terra...

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me deu força e coragem para concluir este trabalho.

Ao professor Luis Marcelo, pela orientação e paciência e a toda sua família pela torcida e amizade.

A Maria Zélia, pela orientação, apoio e conselhos em vários momentos difíceis desta tese.

Ao Thomaz, pela amizade e apoio em todas as fases de andamento desta tese.

A Vanessa, pelo apoio na contagem das árvores e contribuições a este trabalho.

Ao Bob, pelo apoio e contribuições ao trabalho.

Aos professores Lucas R. Gomide, André V. Saúde e José Roberto S. Scolforo, pelas considerações e contribuições a este trabalho.

A Terezinha, Gláucia, Josina e aos professores Zanzini, Soraya, Marco Aurélio, Fausto e Claudio Davide, por todos os conselhos e apoio em alguns momentos difíceis no decorrer da realização deste trabalho.

A GEOID, através do Mario Oscar, pela disponibilização da estrutura desta empresa, assim como da Maria Eduarda e Joãozinho, pelas explicações dos procedimentos de captação e manipulação dos dados LIDAR.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos amigos, funcionários e professores do DCF, os quais contribuíram, por meio do convívio e dos ensinamentos, para formar o profissional que me tornei.

A minha família, a qual sempre me encorajou nos meus estudos.

A Andréia e toda a sua família, pelo acolhimento, amizade e paciência.

Enfim, a todos que contribuíram para a minha formação profissional e pessoal.

Obrigado!!!

## SUMÁRIO

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO E REVISÃO GERAL .....	1
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	2
2 OBJETIVO GERAL.....	7
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	8
3.1 Inventário florestal.....	8
3.2 Sensoriamento remoto aplicado.....	10
3.4 Fundamentos do LIDAR.....	16
3.4.1 Equações básicas do LIDAR .....	18
3.5 Detecção de máximas locais em florestas.....	20
3.5.1 Modelagem de copas para estimativa da volumetria em povoamentos florestais.....	23
REFERÊNCIAS .....	26
CAPÍTULO 2 – APLICAÇÃO DO LIDAR NO INVENTÁRIO DE FLORESTAS PLANTADAS COM <i>Eucalyptus</i> sp. PARA CONTAGEM DE ÁRVORES.....	33
RESUMO.....	34
ABSTRACT .....	35
LIDAR APPLICATION IN PLANTED FOREST INVENTORY FOR TREE COUNT.....	35
1 INTRODUÇÃO.....	36
2 MATERIAL E MÉTODOS .....	39
2.1 Área de estudo .....	39
2.2 Aquisição dos dados do LIDAR e pré-processamento .....	40
2.3 Processamento dos dados do LIDAR .....	41
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4 CONCLUSÕES .....	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	53
REFERÊNCIAS .....	54
CAPÍTULO 3 – INFLUÊNCIA DA IDADE NA CONTAGEM DE ÁRVORES DE <i>Eucalyptus</i> sp. COM DADOS DE LIDAR .....	58
RESUMO.....	59
ABSTRACT .....	60
1 INTRODUÇÃO.....	61
2 MATERIAL E MÉTODOS .....	66
2.1 Área de estudo .....	66
2.2 Aquisição dos dados do LIDAR e pré-processamento .....	68
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
4 CONCLUSÕES .....	79
REFERÊNCIAS .....	80



CAPÍTULO 4 – DETERMINAÇÃO DO VOLUME EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. POR MEIO DADOS DE LIDAR.....	85
RESUMO.....	86
ABSTRACT.....	87
1 INTRODUÇÃO.....	88
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	91
2.1 Área de estudo.....	91
2.2 Aquisição dos dados do LIDAR e pré-processamento.....	93
2.2.1 Processamento dos dados LIDAR.....	94
2.3 Determinação do volume através da altura e do número de árvores obtidos por meio dos dados LIDAR.....	95
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	97
4 CONCLUSÕES.....	103
REFERÊNCIAS.....	104
CAPITULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	108

## **CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO E REVISÃO GERAL**

## **1 INTRODUÇÃO GERAL**

O crescimento do setor florestal e o uso intensivo da madeira tornam os planejamentos de curto, médio e longo prazo de vital importância e exigem que os mesmos sejam cada vez mais otimizados para garantir o fluxo de madeira ao longo do tempo. Neste cenário, é evidente que o planejador necessite de ferramentas que gerem informações precisas do estoque atual da floresta e, conseqüentemente, propiciem a correta modelagem da produtividade futura. Para esta finalidade, sempre se utilizou o inventário florestal convencional (contínuo e ou pré-corte), atividade que constitui instrumento estratégico de planejamento das empresas florestais, pois permite a estimativa das variáveis dendrométricas necessárias para se conhecer os estoques de madeira no presente e no futuro, com precisão desejada e custo viável (SCOLFORO; MELLO, 2006).

No Brasil, o Inventário Florestal Contínuo é uma das formas de inventário mais utilizadas para acompanhar o crescimento da floresta. Nele são utilizadas parcelas permanentes, instaladas quando os povoamentos atingem dois ou três anos, que são remedidas sistematicamente em períodos que variam de um a dois anos (KANEGAE JÚNIOR et al., 2006; OLIVEIRA, 2006; PELLICO NETTO; BRENA, 1997; SCOLFORO; MELO, 2006). Contudo, tem-se observado que alguns erros podem estar associados aos inventários convencionais, tais como viés na mensuração de diâmetros e de alturas, erro na manipulação dos dados, erro na medição de área das parcelas e, principalmente, erros associados ao procedimento de amostragem, que variam em relação à variável dendrométrica analisada, sendo maior para a variável número de árvores por hectare. Esses erros levam à diminuição da qualidade dos dados obtidos, refletindo na imprecisão dos modelos de crescimento e produção e,

consequentemente, no planejamento. Todavia, os erros de amostragem só podem ser resolvidos se for realizado o censo na área.

Muitos avanços têm sido realizados com o objetivo de aumentar a precisão do sistema de amostragem. Utilizando-se bases da estatística clássica podem-se citar a estratificação de povoamentos e a sistematização na distribuição das parcelas, porém, devendo respeitar o critério fundamental da estatística, que é a casualização. Todavia, observa-se em estudos como os de Assis (2005), Kanegae Júnior et al. (2006), Mello (2004) e Mello et al. (2009), dentre outros, que há uma correlação dos indivíduos com a continuidade espacial, sendo, dessa forma, utilizadas linhas de pesquisas que levam em consideração a continuidade espacial, fundamentadas por Matheron (1963). Nestes trabalhos tende-se a discutir o sistema de arranjo das parcelas, formatos, tamanhos e quantidade de amostras.

Apesar de todos esses esforços, nos inventários florestais tradicionais ainda estão embutidos erros de atualização da base cartográfica, existência de falhas, ocorrência de pragas, doenças e manchas de solos em reboleiras e variações no espaçamento ao longo do plantio. A utilização de sensores remotos muito tem contribuído para melhorar o conhecimento do tamanho e da forma do plantio, por meio da geração de mapas, assim como para a estratificação dos povoamentos pelo uso de imagens de alta resolução (OLIVEIRA, 2006; SOUZA et al., 2007) advindas de sensores passivos (CROSTA, 1992; JENSEN, 2009; LILLESSAND; KIEFER, 2000). Apesar de promissores, estes sensores passivos apresentam limitação quanto à visada da área de interesse em situações em que ocorre a presença de nuvens que, em determinadas regiões, é uma constante.

Para estes casos, a tecnologia desenvolvida com sensores ativos (CROSTA, 1992; LILLESSAND; KIEFER, 2000; JENSEN, 2009), tais como o RADAR e o LIDAR, pode ser empregada. Estes sensores conseguem imagear mesmo com a presença de nuvens, sendo, então, muito utilizados na

quantificação de biomassa, já que também conseguem penetrar no estrato arbóreo até atingir o solo (JENSEN, 2009).

O uso do *Light Detection and Ranging*, ou LIDAR, para a determinação precisa de elevação de terrenos, iniciou-se na segunda metade da década de 1970 (LILLESSAND; KIEFER, 2000) e o seu emprego para aplicações florestais avançou significativamente a partir da década de 1980. À medida que as imagens de alta resolução espacial se tornam mais acessíveis, torna-se também viável a obtenção de informações das florestas relativas às árvores individuais e não mais de talhões ou povoamentos (DISPERATI et al., 2007). Um feixe laser, quando se propaga no espaço, apresenta uma divergência que resulta no diâmetro do ponto projetado na superfície (*footprint*). Essa área de cobertura equivale à resolução espacial das imagens LIDAR (JENSEN, 2009; LEE; LUCAS, 2007).

A tecnologia do LIDAR aerotransportado tem suas aplicações consolidadas na América do Norte e na Escandinávia para quantificação de biomassa em extensas áreas, tendo um valor aproximado de US\$ 5/ha (RODRIGUEZ et al., 2010). Várias linhas de pesquisa para estimar parâmetros de parcelas, contagem de árvores individuais, quantificação do estoque florestal, biomassa e para a diminuição da intensidade amostral vêm sendo desenvolvidas, podendo-se destacar os trabalhos de Crow et al. (2007), Heurich e Thoma (2008), Ioki et al. (2010), Jupp et al. (2007), Lauri et al. (2008), Maltamo et al. (2004), Naesset e Bjercknes (2001), Popescu, Wynne e Nelson (2002, 2003), Sasaki et al. (2008), Tiede, Hochleitner e Blaschke (2005) e Yu et al. (2004).

Na atualidade, o LIDAR tem uma gama de aplicações em diversas áreas, tais como: planejamento costeiro, avaliação de risco de inundações, telecomunicações e redes de transmissões de energia, florestas, agricultura, petróleo, transportes, planejamento urbano e mineração, entre outras (GIONGO et al., 2010).

No Brasil, esta linha de pesquisa é bem recente, devido ao custo para a aquisição das informações e também porque apenas poucas empresas manuseiam este equipamento em aeronaves. Mesmo assim, podem-se destacar os trabalhos de Castro (2006), Castro e Centeno (2005), Macedo (2009), Rodriguez et al. (2010), Zandoná, Lingnau e Nakajima (2008), Zonete (2009) e Zonete, Rodriguez e Packalén (2010).

Dessa forma, o desenvolvimento de novas técnicas e a validação de diversas linhas de pesquisas com o LIDAR no Brasil podem, com o passar do tempo, motivar o uso desta tecnologia no setor florestal. Fato semelhante aconteceu com os sensores orbitais, os quais tinham alto custo na década de 1990, sendo as imagens de alta resolução inviáveis economicamente para diversas linhas de pesquisa, bem como para aplicações práticas em empresas florestais. É importante ressaltar que as informações obtidas com o LIDAR podem contribuir para a diminuição da amostragem em campo, mudando o parâmetro de extrapolação da área amostrada e área real, em que são analisadas as características de interesse no inventário florestal, para características observadas em alguns indivíduos nas parcelas amostradas e extrapoladas para todos os indivíduos existentes na população florestal estudada.

Outra ressalva importante é que, dos indivíduos observados em todo o povoamento usando dados de LIDAR, pode-se extrair o diâmetro da copa, característica com alta correlação com volume e biomassa (NUTTO, 2001; NUTTO; SPATHELF, 2008), assim como a altura, característica que demanda um maior custo para ser obtida em campo, devido ao tempo que pode ser necessário para a sua aquisição, dependendo da densidade e da idade do povoamento. Muitas vezes, este parâmetro é estimado por modelos hipsométricos para a área amostrada (PELLICO NETTO; BRENA, 1997; SCOLFORO; MELO, 2006).

Sendo assim, este trabalho foi realizado com o objetivo principal de desenvolver e aperfeiçoar técnicas utilizando dados LIDAR para contar árvores em povoamentos de *Eucalyptus* sp., no intuito de gerar novas variáveis para se diminuir a intensidade amostral, assim como o erro de estimativa do inventário florestal para estes plantios de *Eucalyptus* sp.

Para isso, o trabalho foi dividido em cinco capítulos, com as seguintes abordagens:

- a) capítulo 1, introdução, objetivos e uma breve revisão dos assuntos abordados nos demais capítulos;
- b) capítulo 2, desenvolvimento de um método para a contagem de árvores. Para isso, o povoamento foi dividido em diferentes extratos verticais, comparando-se os interpoladores IDW e TIN; algoritmos de máximas locais 3x3 e 5x5 para a contagem de árvores e determinação de alturas para talhões de *Eucalyptus* sp. com três anos de idade;
- c) capítulo 3, avaliação da existência de diferença para a detecção de árvores para povoamentos de *Eucalyptus* sp. em diferentes idades (3, 5, 7 anos) e diagnóstico da melhor idade para realizar a contagem de árvores;
- d) capítulo 4, desenvolvimento de uma metodologia para estimar a volumetria de um talhão com 8 anos de idade, utilizando os dados LIDAR, trabalhando com o censo de todos os indivíduos detectados;
- e) capítulo 5, conclusão e recomendações finais do trabalho.

## **2 OBJETIVO GERAL**

O objetivo, neste trabalho, foi desenvolver metodologias para aprimorar o uso dos dados de *light detection and ranging*, ou LIDAR, no inventário florestal.

Para o alcance da proposta, os objetivos específicos foram:

- a) analisar a viabilidade de detecção de copas individuais;
- b) analisar a viabilidade de extrair informações que diminuam a intensidade amostral nos inventários florestais;
- c) definir a idade ótima para a contagem de árvores;
- d) modelar altura para gerar dados de inventário florestal.



### **3 REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1 Inventário florestal**

Atualmente, o Brasil é um dos grandes exportadores de produtos de base florestal no mundo, principalmente celulose, madeira, móveis e carvão vegetal. Geralmente, no custo destes produtos encontram-se embutidos os custos do planejamento com todo o inventário florestal, assim como as atividades de colheita e transporte florestal, que elevam o custo do produto final.

O inventário florestal é um instrumento estratégico de planejamento das empresas florestais, pois permite a estimativa das variáveis dendrométricas necessárias para se conhecer o estoque presente e futuro de madeira, com precisão desejada e custo viável (SCOLFORO; MELLO, 2006). Segundo Diniz (2007), a movimentação de máquinas, equipe de colheita e transporte florestal, assim como equipe de silvicultura, é definida por meio das informações de produtividade de cada povoamento florestal.

O Inventário Florestal Contínuo é o sistema de amostragem mais utilizado no Brasil para acompanhar o crescimento da floresta. São utilizadas parcelas permanentes, instaladas quando os povoamentos atingem dois ou três anos e remedidas sistematicamente em períodos que variam de um a dois anos (KANEGAE JÚNIOR et al., 2006; OLIVEIRA, 2006; SCOLFORO; MELLO, 2006).

Entretanto, as informações obtidas com o processamento do Inventário Contínuo não são suficientes para estimar o volume com a precisão necessária na idade de corte. Assim, há necessidade de se efetuar o Inventário Pré-Corte, que utiliza uma intensidade amostral maior. Com isso obtêm-se informações mais precisas, porém, a um custo mais alto (MELLO et al., 2006).

Diniz (2007) relata que é necessário conhecer todos os possíveis problemas do plantio florestal, como variação no espaçamento entre plantas,

áreas onde não existam árvores devido às condições de relevo, mortalidade de mudas, os quais, se não forem detectados, provocarão uma deficiência na amostra representativa da população.

Apesar de a maioria das florestas comerciais ter sido plantada pela própria empresa, o número total de árvores não é conhecido com exatidão. Para isso, uma maneira de se obter o número de árvores em um povoamento florestal é por meio do inventário florestal (MELLO et al., 2009). Por isso, mesmo sendo calculado o volume de madeira de cada árvore da parcela, só é possível estimar o volume do povoamento extrapolando-se o volume total de madeira das parcelas para a área de plantio.

Caso seja conhecido o número de árvores dos povoamentos, o volume médio das árvores das parcelas pode ser extrapolado pelo número total de árvores. Isso diminuiria o erro do inventário e poderia, até mesmo, reduzir a intensidade amostral necessária para o pré-corte, etapa onerosa e indispensável nos meses anteriores à colheita.

Diniz (2007) e Mello et al. (2009) avaliaram métodos para definir, com maior precisão, o número de fustes por unidade de manejo e o volume de madeira, por meio de Amostra Casual Simples (ACS) e geoestatística. Para isso, utilizaram diferentes intensidades amostrais e formas de parcelas. A exatidão do número de fustes foi obtida por meio de contagem visual de fotografias aéreas e comparada pela relação entre as estimativas de cada método, das duas características (número de fustes e volume de madeira). Os autores concluíram com este estudo que existia uma diferença significativa entre os procedimentos amostrais. Em todos os métodos, o inventário tendeu a superestimar o volume de madeira por talhão e superestimou número de fustes por talhão, no qual se avaliou uma diferença significativa para todos os métodos da variável número de fustes.

Sendo assim, para a elaboração do plano de suprimento das empresas florestais, as metodologias para estimativa de variáveis dendrométricas das florestas plantadas são práticas correntes. Por meio do inventário florestal, os povoamentos são amostrados de forma representativa, por meio de uma boa intensidade amostral, o que possibilita estimar o volume e outras variáveis com a precisão desejada e custo que viabilize a produção (SCOLFORO; MELLO, 2006). Para Assis (2005), as formas de controlar as variações locais normalmente utilizadas levam em conta apenas características físicas ou cadastrais da floresta e, geralmente, não são suficientes para tratar a floresta como uma unidade contínua, ficando limitada a geração de informações dentro de uma unidade física (talhão), em que se assume uma homogeneidade de produtividade que nem sempre existe.

Os dados do inventário, geralmente, entram em conflito com o que é mensurado pelas colheitadeiras florestais que, por sua vez, acabam encontrando volumes diferentes na volumetria da madeira colhida. Dessa forma, o uso de geotecnologias torna-se de grande importância à medida que novas técnicas e sensores são desenvolvidos, os quais, por meio de processamentos de imagens ou análises especializados de campo, direcionam melhor as atividades, gerando uma melhoria significativa no planejamento do inventário, colheita, exploração, transporte e planejamento de estradas florestais.

### **3.2 Sensoriamento remoto aplicado**

O sensoriamento remoto tem demonstrado ser uma ferramenta importante para o desenvolvimento da Ciência Florestal e permite ganhos significativos no inventário (SOUZA et al., 2007). Segundo Janoth et al. (2004), os sensores remotos geram informações adequadas para recursos financeiros

escassos, auxiliando na tomada de decisão e possibilitam um uso ótimo nos trabalhos de campo.

Oliveira (2006), por meio do processamento de imagens SPOT 5, conseguiu estratificar plantios de eucalipto e, com seus resultados, possibilitou a diminuição da intensidade amostral de parcelas em campo. Porém, observou-se que, apesar do bom resultado, não se conseguia imagens sempre que fizesse um inventário pré-corte, devido ao recobrimento de nuvens sobre as áreas a serem inventariadas.

Zonete (2009), trabalhando com dados LIDAR, gerou índices de sítio das maiores árvores, possibilitando a estratificação dos projetos florestais em áreas mais homogêneas. Já com o LIDAR, o recobrimento de nuvens não é tão problemático, devido às características de seu funcionamento (JENSEN, 2009; LILLESSAND; KIEFFER, 2000). Todavia, seu custo para aquisição é muito alto, por se tratar de apenas um único produto a ser utilizado.

À medida que as imagens de alta resolução espacial se tornam mais acessíveis, torna-se viável a obtenção de informações das florestas em árvores individuais e não mais de talhões ou povoamentos (DISPERATI et al., 2007). Neste contexto, os dados obtidos por meio do LIDAR se tornam estratégicos, pois possibilitam a rasterização para imagens com boa resolução espacial. Também por meio dos mesmos dados é possível obter Modelos de Superfície (MDS) e Modelos de Terreno (MDT), os quais, pela sua diferença, fornecem dados precisos de altura, informação mais difícil e demorada de se obter em campo.

### **3.3 Aplicações florestais do LIDAR**

Desde os anos 1980, a utilização do LIDAR para aplicações florestais tem avançado significativamente, pois, além de fornecer uma caracterização

topográfica precisa do terreno, os dados LIDAR geram informações sobre a superfície do dossel e parâmetros como altura das árvores e dimensões das copas, elementos importantes para o manejo, tanto de florestas nativas como plantadas (POPESCU; WYNNE; NELSON, 2002; TIEDE; HOCHLEITNER; BLASCHKE, 2005).

Várias pesquisas têm sido conduzidas para a utilização do LIDAR no inventário de florestas plantadas, tanto para estimar parâmetros em parcelas como de árvores individuais (CASTRO; CENTENO, 2005; CROW et al., 2007; HEURICH; THOMA, 2008; IOKI et al., 2010; LAURI et al., 2008; MACEDO, 2009; MALTAMO et al., 2004; POPESCU; WYNNE; NELSON, 2002, 2003; SASAKI et al., 2008; TIEDE; HOCHLEITNER; BLASCHKE, 2005; YU et al., 2004; ZANDONÁ; LINGNAU; NAKAJIMA, 2008; ZONETE; RODRIGUEZ; PACKALÉN, 2010).

Além do escaneamento horizontal, os sistemas Laser Scanner Aerotransportado (LSA) ainda têm potencial para medição vertical de formações florestais com elevada precisão (ZONETE, 2009). O aparelho, denominado laser terrestre, apesar de ainda menos utilizado, se apresenta como uma ferramenta promissora, na medida em que permite o escaneamento vertical das árvores, simulando uma cubagem rigorosa, e fornece seu perfil com precisão (LINGNAU et al., 2007, 2008, 2009).

Yu et al. (2004) demonstram o potencial de utilização de laser de pequena área de cobertura instantânea para a detecção de mudanças. O estudo foi realizado no sul da Finlândia, em Kalkkinen, e as espécies encontradas nesta localização são: *Picea abies* L. (pinho-norueguês), *Pinus sylvestris* L. (pinus-escocês), *Betula verrucosa* e *Betula pebescens*. Uma comparação foi realizada entre dois conjuntos de dados adquiridos com o escâner de laser Toposys-1. Modelos de alturas de árvores foram estimados por meio de algoritmos de

rasterização, tendo 73% das árvores verificadas em campo sido detectadas por meio desta metodologia.

Heurich e Thoma (2008) estimaram parâmetros do perfil do tronco por meio de dados de laser do escâner Toposys II em florestas dominadas por *Picea abies* L. (pinho-norueguês) e (*Fagus sylvatica*), no Parque Nacional Florestal Bavária, na Alemanha. Neste trabalho, obteve-se como melhor resultado para a altura erro quadrático médio de 5%; para o diâmetro à altura do peito (DAP), erro quadrático médio de 10% e, para o número de árvores, erro quadrático médio de 60%.

O potencial de uso do LIDAR para outras aplicações é notável, de acordo com Crow et al. (2007), que fizeram um levantamento da cobertura vegetal de parte da Floresta de Deen, localizada na fronteira da Inglaterra com o País de Gales. A densidade de pontos e penetrabilidade dos pulsos de laser foi utilizada para gerar um mapa de discriminação entre os diferentes tipos de vegetação presentes nesta localidade.

Sasaki et al. (2008) demonstraram outra aplicação diferenciada para este método de sensoriamento ativo em florestas, estimando o índice de área foliar e diâmetros de copas com dados de LIDAR com pequeno diâmetro de cobertura. Os resultados obtidos foram comparados com imagens infravermelho de alta resolução espacial. Os resultados demonstraram que, mesmo não superando os métodos tradicionais, existe grande potencial do LIDAR para a estimativa desses parâmetros.

Lauri et al. (2008) calcularam o volume estimado após corte, por meio de um fator de redução de volume. As espécies para este tipo de trabalho foram *Pinus* sp. e pinho, em Matalansalo, no oeste da Finlândia, em florestas de coníferas. Os dados foram obtidos por meio de dados de laser a bordo de aeronaves, sendo o laser usado o scanner ALTM 2033. Os resultados indicaram que os dados brutos de laser são capazes de estimar volumes de corte de madeira

para populações verdadeiras e para populações simuladas estatisticamente. Os erros quadráticos médios foram de 9,1, para as populações simuladas e de 18,0, para as populações reais.

Segundo Coops et al. (2007), ao contrário das abordagens do sensoriamento remoto passivo, LIDAR mede diretamente a distribuição tridimensional das estruturas das copas da vegetação, assim como os componentes que estão abaixo dessas estruturas. Isto promove mapas de topografias precisos e de alta resolução, estimativas precisas da altura e sobreposição da vegetação, entre outros aspectos das copas de árvores.

Os sistemas de LIDAR podem ser classificados como sendo de retorno discreto ou sistemas de amostragem de forma de onda. Os sistemas amostrados de forma de onda completa podem compensar a baixa resolução (10-100) por meio de uma resolução estreita, e completamente digitalizada, promovendo, assim, um perfil vertical com precisão abaixo de um metro. Em contrapartida, sistemas LIDAR com retorno discreto (com um diâmetro de 0.1-1m) tipicamente promovem de 1 a 5 retornos.

Coops et al. (2007) estimaram as estruturas de copas e alturas de árvores a partir de dados de LIDAR, por laser de diâmetro reduzido com (0,19 cm) com o retorno direto. Neste estudo, as estimativas foram feitas somente em seis troncos de árvores nas florestas de Douglas-Fir, na costa oeste da Ilha de Vancouver, na British Columbia, no Canadá. Os resultados indicam que dados mensurados a partir das árvores e dados estimados a partir do LIDAR (média da altura das árvores e área basal) estão significativamente correlacionados.

Ioki et al. (2010) estimaram alturas de 1.970 fustes no *Commemorative Park*, na cidade de Suita, Osaka, no oeste do Japão, utilizando o sistema de retorno discreto LIDAR, sistema *Optech Airborne Laser Terrain Mapper 2050*. Uma regressão das variáveis de campo foi feita com os dados estimados. O erro quadrático médio para a altura estimada foi de 16,4%.

Naasset e Bjerknes (2001) estimaram a altura média e o número de indivíduos dominantes para um plantio jovem. Segundo os autores, os atributos mais importantes a serem extraídos de um plantio jovem ( $h < 6$  m) para o seu manejo, e a altura média e o número de indivíduos por hectare. Os dados originaram-se do sistema de varredura a laser ALTM 1210 produzido pela Optech. Dados de verdade de campo foram utilizados para verificar a precisão do sistema e uma regressão foi feita com os dados originados do LIDAR. A regressão para as variáveis altura média por hectare e número de indivíduos por hectare explicaram 83% e 42% da variabilidade destas variáveis. A validação cruzada entre as duas regressões revelou diferenças entre os desvios padrões estimados e para os dados de verdade de campo. Esta diferença foi de 0,57 m (15%) para o número de fustes 1.209/ha (28,8%). Os dados estimados por meio dos dados do LIDAR tiveram uma tendenciosidade de 0,23 m, com probabilidade de ( $P > 0,05$ ).

Maltamo et al. (2004) utilizaram um laser de diâmetro reduzido, sistema Toposys-1 de varredura a laser, para estimar volume e densidade em uma floresta de pinho-norueguês. Métodos de segmentação foram utilizados para a detecção de copas e, conseqüentemente, dos indivíduos. O método envolveu a detecção de árvores suprimidas imersas no dossel por meio de funções teóricas da distribuição destes indivíduos. Dois diferentes métodos baseados nas distribuições de Weibull foram utilizados para as estimativas destas árvores. A estimativa do volume e o número de indivíduos por hectare a partir apenas dos dados do LIDAR obtiveram erros quadráticos médios de 25% e de 75%, respectivamente. A adição dos métodos de detecção de árvores suprimidas melhorou estes resultados consideravelmente, chegando a 16% e a 49,2%, respectivamente.

Outra aplicabilidade do LIDAR em estimar parâmetros florestais pode ser evidenciada em Popescu, Wynne e Nelson (2003), em que a biomassa é



estimada a partir das estimativas de diâmetro de copas e altura das árvores originadas de dados LIDAR rasterizados fusionados com imagens multispectrais ópticas.

### **3.4 Fundamentos do LIDAR**

O sistema LIDAR ou, ainda, LADAR, relativo a *Laser Detection and Ranging* (WEHR; LOHR, 1999), é um sistema ativo de sensoriamento remoto. Esta tecnologia envolve a utilização de pulsos de laser direcionados à Terra e, posteriormente, o tempo gasto para o retorno dos pulsos. O tempo gasto para o retorno de cada pulso será processado para calcular as distâncias variáveis entre objetos ou da superfície terrestre. O uso do LIDAR para a determinação precisa de elevação de terrenos iniciou-se a partir de 1975 (LILLESAND; KIEFER, 2000), sendo usado, primeiramente, para se estudar geleiras em oceanos e também sobre as características da superfície dos oceanos (NILSON, 1996).

Também conhecido como sistema de perfilamento a LASER (*Laser Scanning Air Transported*, ou LSA), é um sistema baseado em um feixe de laser disparado em direção ao terreno por um espelho, no sentido transversal à direção da linha de voo (CASTRO, 2006; JENSEN, 2009).

Cada ponto de laser projetado no solo tem suas coordenadas planimétricas e medidas de elevação da superfície registradas. As coordenadas planimétricas de latitude e longitude dos pontos de laser são obtidas por meio da sincronização exata de um sistema de posição e orientação integrado, composto por um *Differential Global Positioning System* (DGPS) e uma *Inertial Measurement Unit* (IMU), e os dados do laser. (CASTRO; CENTENO, 2005).

Além das coordenadas planimétricas, o sistema armazena, para cada ponto mapeado, o valor de reflectância dos materiais alvo. É possível, por meio dessas informações, gerar ortoimagens de intensidade e de hipsometria

(intensidade combinada com informação altimétrica) (ZANDONÁ; LINGNAU; NAKAJIMA, 2008).

Um feixe laser, quando se propaga no espaço, apresenta uma divergência que resulta no diâmetro do ponto projetado na superfície (*footprint*). Essa área de cobertura equivale à resolução espacial das imagens LIDAR (JENSEN, 2009; LEE; LUCAS, 2007) e pode ser calculada a partir da seguinte equação (BALTSAVIAS, 1999; JENSEN, 2009):

$$A_c = \frac{h}{\cos^2(\theta_{inst})} \gamma^2$$

em que

$A_c$  = área de cobertura dos pontos LASER (mm);

$h$  = altura de voo (m);

$\theta_{inst}$  = ângulo de varredura instantânea (°);

$\gamma$  = divergência do feixe LASER (mrad).

A maioria dos sistemas LIDAR usados para mapeamentos topográficos utiliza a luz laser no infravermelho próximo, na região de 1040 a 1060 nm, e pode emitir pulsos a taxas superiores a 100.000 pulsos por segundo (JENSEN, 2009).

Ao atingir objetos sem uma superfície bem definida, um sinal de laser pode produzir vários registros de reflexões (retornos ou pulsos). Apesar de alguns sistemas LSA, como o Aeroscan (Leica), serem capazes de registrar o retorno de até 5 pulsos, para estudos florestais os mais importantes são o primeiro e o último. O primeiro fornece informações da porção mais elevada dos objetos e é utilizado para a modelagem da superfície do dossel e o último é refletido no nível mais baixo atingido pelo laser e é utilizado para a modelagem

do terreno. Isso permite a separação da vegetação da superfície do solo para a geração do modelo digital de alturas (CASTRO, 2006; COELHO; VARGAS, 2007; JENSEN, 2009; MIQUELES et al., 2003).

A resultante nuvem de pontos de uma varredura a laser, ou conjunto de dados com coordenadas XYZ, pode ser utilizada para a geração de um modelo computacional da superfície refletida abaixo. Existem diversas variáveis associadas com um sistema de escaneamento a laser, como ângulo do arco de varredura do laser, extensão de sobreposição de varredura entre voos paralelos e a altitude de voo. Todos estes fatores poderão influenciar a densidade de pontos da nuvem resultante. Esta variação pode ser entre 0,5 e 5 pontos por metro quadrado. A precisão do escâner do laser é da ordem de mais ou menos 15 cm (CROW et al., 2007).

Se a *footprint* recobrir uma superfície plana e sólida, a maioria da energia será refletida simultaneamente de volta ao escâner. Por outro lado, o ocorrido em coberturas florestais é que uma grande parte do pulso do laser será refletida pela parte superior das copas, enquanto outra parte do pulso irá penetrar mais a fundo, atingindo o estrato vegetal inferior ou atingindo a superfície do solo. Dessa maneira, o detector recebe uma distribuição da energia. O tempo gasto para que as partes desta energia sejam detectadas no sensor a bordo da aeronave é convertido em alturas e armazenado em um meio computacional, junto com a coordenada XY (CROW et al., 2007).

#### **3.4.1 Equações básicas do LIDAR**

Segundo Jupp et al. (2007), em um sistema LIDAR, a intensidade do sinal retornado de um objeto sólido, perpendicular ao feixe a um alcance  $R$ , a partir do instrumento de medição em função do tempo,  $t$ , pode ser escrita na forma:

$$I(t) = \phi_0 \left( t - t_p - \frac{2R}{c} \right) \frac{\rho_t}{R^2}$$

em que

$t_p$  é o tempo 0, no qual o pico de sinal emitido de laser ocorre;

$c$  é a velocidade da luz;

$\rho_t$  é a reflectância do objeto alvo e a variável;

$\phi_0$ , é a energia de saída, isto é, o retorno é uma reprodução do pulso de saída, e a diferença entre o pico do pulso de saída e de retorno ( $t_{ret}$ ) e o alcance em termos da diferença de tempo:

$$t_{ret} - t_p = \frac{2R}{c}$$

$$R = \frac{c(t_{ret} - t_p)}{2}$$

A situação que ocorre com bastante frequência em florestas nas quais um único pulso é interceptado por diversos objetos alvo é mais complexa. Em primeira mão, o retorno é representado em termos de alcance aparente ( $r$ ) em vez do tempo, em que:

$$r = \frac{c (t - t_p)}{2} ,$$

Quando isto é utilizado, para um retorno de um único objeto situado perpendicularmente, pode-se escrever a equação na forma:

$$I(r) = \phi_0 (r - R) \frac{R(R) \rho_t}{R^2}$$

Nesta equação, o tempo e o fator de eficiência telescópica, para tais sistemas,  $K(R)$ , que varia de 0 (no ponto de foco) a 1.

Para alvos que não interceptam todo o feixe do laser, sendo, dessa maneira, caracterizados como alvos distribuídos ao longo do alcance do laser, a equação se torna:

$$I(r) = \int_0^{\infty} \phi_0 (r - R) \frac{K(R) \rho_t}{R^2} dR$$

$$I(r) = \phi_0 * \left( \frac{K(r) \rho_t(r)}{r^2} \right)$$

em que “\*” denota convolução entre os termos. O feixe finito do laser é particularmente atenuado para cada acerto de alvo.

Para os alvos em geral, a intensidade do sinal pode ser interpretada como a aparente reflectância do alvo,  $\rho_{app}$ , que, na expressão abaixo, é admitido que  $\rho_{app} \approx \rho_t$

$$\rho_{app} = \frac{I(r, \theta) R^2}{K(R) \phi_0}$$

### 3.5 Detecção de máximas locais em florestas

Esse método identifica os locais de máxima intensidade de brilho da imagem em bandas individuais por meio de uma máscara (DISPERATI; OLIVEIRA FILHO, 2005; WULDER; NIEMANN; GOODENOUGH, 2000).

Tendo em vista que o topo das árvores apresenta valores de altura e reflectância superiores aos demais pixels da copa, essa técnica é adequada para a localização de árvores e tem sido aplicada, principalmente, em coníferas, devido à dominância apical (DISPERATI et al., 2004, 2007).

A determinação do local de intensidade máxima é realizada com a utilização de um filtro específico, constituído por uma matriz com número ímpar de linhas e colunas. Essa matriz é formada por valores 0 e 1, em que os 1 serão usados para determinar os níveis máximos de cinza, enquanto que os 0 indicam os pixels que serão desconsiderados na análise. A utilização dos valores indicados por zeros nos cantos da matriz viabiliza a definição de uma máscara quase que circular, simulando, assim, o formato da copa da árvore observada na imagem aérea. Durante o processamento, a máscara percorrerá a imagem, assinalando os valores de maior brilho para a região em análise (DISPERATI et al., 2004).

O tamanho da máscara é um fator determinante para a obtenção de bons resultados e deve ser definido de acordo com o tamanho da copa na imagem. Se a máscara for pequena demais, ocorrerão erros de comissão pela marcação de árvores inexistentes ou identificação de galhos como copas independentes; se ela for muito grande, haverá erros de omissão (WULDER; NIEMANN; GOODENOUGH, 2000).

Uma variação da metodologia de detecção de máximas locais com raio de busca variável já está sendo utilizada para dados LIDAR, para identificação de eucaliptos. Com dados de campo é gerado um modelo de regressão que estima o diâmetro da copa em função da altura, determinando, pelo algoritmo, o tamanho da janela do filtro para cada ponto (TIEDE; HOCHLEITNER;

BLASCHKE, 2005; ZANDONÁ; LINGNAU; NAKAJIMA, 2008). Wulder, Niemann e Goodenough (2000) também utilizaram a metodologia de máximas locais com raio variável para detectar árvores, porém, em uma fotografia aérea, sendo o parâmetro para determinação do tamanho da máscara a semivariância dos pixels vizinhos.

Uma metodologia específica para a detecção de copas foi desenvolvida por Koch, Heyder e Welnacker (2006). A metodologia utiliza a detecção de máximas locais, em que um pixel é selecionado como uma máxima local e os quatro pixels adjacentes são verificados se possuem valores inferiores. A partir dos pontos de máximas locais são geradas regiões estendidas, à medida que pixels adjacentes com valores inferiores forem captados. A ideia se assemelha ao clássico *watershading* (SOILE, 1999), porém, invertido. Para a eliminação de regiões muito pequenas ou que possuem regiões com formatos improváveis de serem árvores, a metodologia implementa um conjunto de restrições e *thresholds* para a eliminação de tais copas detectadas erroneamente.

Para realizar a contagem individual de árvores, deve-se, primeiramente, computar o modelo digital de altura de copas em forma de imagem raster. O modelo é gerado pela diferença entre as alturas das árvores (primeiro retorno) e do modelo de elevação do terreno. Esse procedimento é comumente utilizado em processamentos de dados LIDAR (HEURICH; THOMA, 2008; KOCH; HEYDER; WELNACKER, 2006; MALTAMO et al., 2004; POPESCU; WYNNE; NELSON, 2003; SUÁREZ et al., 2004; TAKAHASHI et al., 2008; YU et al., 2004; ZANDONÁ; LINGNAU; NAKAJIMA, 2008, 2008). Outra razão para tal escolha deve-se ao fato de que filtros e outros processamentos de sinais digitais são realizados somente em dados digitais com amostragem regular, ou seja, imagens rasterizadas ou sinais com amostragem pré-determinada como sinais de vídeo, rádio ou áudio. Dessa maneira, uma diversidade de procedimentos e filtros lineares em cascata pode ser aplicada ao

conjunto de dados (SMITH, 1998). Com os dados brutos na forma de vetores dos retornos do LIDAR, o mesmo arcabouço ferramental não poderia ser aplicado.

A detecção das copas por meio de algoritmos de máximos locais pode ser observada no trabalho de Zandoná, Lingnau e Nakajima (2008), no qual foi gerada uma imagem rasterizada dos pontos LIDAR relativos à vegetação e um filtro para suavizar a imagem. Nesse trabalho, o acerto médio foi de 82,5% para as variáveis dendrométricas em um plantio de pinus. Outras formas de trabalho incluem o processamento na nuvem de pontos, como observado em Coops et al. (2007), em que o tratamento inclui a secção do espaço tridimensional em células para análise dos pontos.

### **3.5.1 Modelagem de copas para estimativa da volumetria em povoamentos florestais**

A relação entre a dimensão da copa e o crescimento do diâmetro permitiu o desenvolvimento de um modelo de crescimento de diâmetro por meio de medições em campo, através da existente relação entre dimensão da copa e DAP. Os modelos propostos podem ser utilizados em diversos conjuntos de dados para estimativas (NUTTO; SPATHELF, 2008).

Weishampel et al. (2000) realizaram uma abordagem por meio de limiares (*thresholding*) para realizar a discriminação entre as copas e o solo em uma floresta tropical na estação de pesquisa de La Selva, na Costa Rica. Esta abordagem realiza uma divisão da região das copas, por meio de fatias e, posteriormente, em “caixotes” tridimensionais para análise de volumetria das copas. Dessa maneira, um mapa de rugosidade das copas é gerado por meio de dados LIDAR.

Para realizar uma estimativa de volume a partir dos dados de radar necessita-se de um modelo para gerar o DAP a partir das alturas e diâmetros das



copas, por meio de um modelo de segmentação. Uma modelagem do DAP a partir da área da copa e altura foi proposta por Maltamo et al. (2004):

$$\ln(d_{ij}) = b_0 + b_1 \ln(h) + b_2 [\ln(a_{ij})] + s_{ij} + e_{ij}$$

em que:

$d_{ij}$  é o DAP da árvore j na parcela i;

h é altura corrigida da árvore;

a é área da copa, em metros quadrados;

$b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  são os parâmetros ajustados do modelo;

$e_{ij}$  é o erro randômico presente no modelo.

A partir da estimativa do DAP podem-se estimar o volume e outras variáveis dendrométricas. Em estudos de Heurich e Thoma (2008), têm-se maiores detalhes sobre as estimativas de volume.

Tratando da modelagem do volume, um importante trabalho foi desenvolvido por Maltamo et al. (2004), com avaliações entre modelos de volume com diferentes variáveis independentes derivadas dos dados LIDAR. Este trabalho também apresentou uma simulação de redução da densidade de pontos LIDAR, fato este que, segundo os autores, não acarretou perda de precisão nas estimativas volumétricas. Se o número de pulsos variarem de 3 a 5 pontos/m<sup>2</sup> (ou acima), torna-se possível o reconhecimento de árvores individuais (POPESCU; WYNNE; NELSON, 2002; ZANDONÁ; LINGNAU; NAKAJIMA, 2008).

Ajustes de regressão a partir de dados de inventário de campo são utilizados para auxiliar na precisão dos cálculos de volume e altura (CORONA; FATTORINI, 2008; HOLLAUS et al., 2007; PARKER; EVANS, 2009). Uma

abordagem um pouco diferente destes ajustes é utilizada em estudos de Tonolli et al. (2010), em que, ao redor de cada parcela, uma célula quadrada de uma dada dimensão foi centralizada, sendo estas células de 20 x 20, 30 x 30, 40 x 40, 50 x 50 e 60 x 60 m. Este procedimento foi utilizado considerando-se que em cada célula existia uma relação entre os volumes (somatória dos troncos individuais) e as variáveis de predição, originadas da distribuição das alturas dos pulsos de laser. Assim, a distribuição dessas alturas foi utilizada para a estimativa de 20 variáveis com uma metodologia que inclui dados de treinamento e dados de validação dos modelos a partir das parcelas.

## REFERÊNCIAS

- ASSIS, A. L. **Definição da estratégia amostral em plantios de Eucalyptus spp pelo uso de geoestatística.** 2005. 118 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.
- BALTSAVIAS, E. P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, Enschede, v. 54, p. 199-214, 1999.
- CASTRO, F. C. **Segmentação de imagens geradas por laser scanning aerotransportado para delimitação de árvores individuais em áreas de reflorestamento de eucaliptos.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- CASTRO, F. C.; CENTENO, T. M. Segmentação de imagens geradas por perfilamento a *laser* para delimitação de árvores individuais em uma área de reflorestamento de eucaliptos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., Goiânia, 2005. **Anais...** Goiânia: [s. n.], 2005. p. 737-744.
- COELHO, A. H.; VARGAS, R. M. A. Geração de modelos digitais de terreno a partir de dados de *laser scanner* aerotransportado em área de floresta usando o *software* livre GRASS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: [s. n.], 2007. p. 3653-3660.
- COOPS, N. C. et al. Estimating canopy structure of Douglas-Fir forest stands from discrete-return LiDAR, **Trees - Structure and Function**, New York, v. 21, p. 295-310, 2007.
- CORONA, P.; FATTORI, L. Area-based lidar-assisted estimation of forest standing volume. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 38, p., Aug. 2008.
- CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.** Campinas: UNICAMP, 1992. 170 p.
- CROW, P. et al. Woodland vegetation and its implications for archaeological survey using LiDAR. **Forestry**, Cary, v. 80, n. 3, p. 241-252, 2007.

DINIZ, F. S. **Métodos de amostragem e geoestatística aplicados ao Inventário Florestal**. 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

DISPERATI, A. A. et al. Experiências iniciais na utilização da técnica de “local maximum filtering” em fotografias aéreas de alta resolução para a determinação do topo das árvores. In: DISPERATI, A. A.; SANTOS, J. R. (Ed.). **Aplicações de geotecnologias na engenharia florestal**. Curitiba: Copiadora Gabardo, 2004. p. 275–276.

DISPERATI, A. A.; OLIVEIRA FILHO, P. C. Delineamento de copas de árvores em fotografias aéreas de alta resolução, através de suas sombras periféricas: estudo de caso na floresta ombrófila mista. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 19, n. 2, p. 195-202, mar./abr. 2005.

DISPERATI, A. A. et al. Aplicação da técnica “filtragem de locais máximas” em fotografia aérea digital para a contagem de copas em reflorestamento de *Pinus elliottii*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 76, p. 45-55, dez. 2007.

GIONGO, M. et al. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, ago./out. 2010.

HEURICH, M.; THOMA, F. Estimation of forestry stand parameters using laser scanning data in temperate, structurally rich natural European beech (*Fagus sylvatica*) and Norway spruce (*Picea abies*). **Forestry**, Cary, v. 81, n. 5, p. 645-661, 2008.

HOLLAUS, M. et al. Airborne laser scanning of forest stem volume in a mountainous environment. **Sensors**, Basel, v.12, n. 7, p. 1559-1577, June 2007.

IOKI, K. et al. Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach. **Landscape Ecological Engineering**, Tokio, v. 6, p. 29-36, 2010.

JANOTH, J. et al. Procedimentos baseados em segmentação para análise de mudanças e classificação florestal com dados de satélite de alta resolução. In: BLASCHKE, T.; KUX, H. (Org.). **Sensoriamento remoto e SIG: métodos inovadores**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

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

JUPP, D. et al. Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called Echidna. **Tree Physiology**, Cary, v. 29, 171-181, 2009.

KANEGAE JÚNIOR, H. et al. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.* **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 123-136, abr./jun. 2006.

KOCH, B.; HEYDER, U.; WEINACKER, H. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v. 72, n. 4, p. 357-363, Apr. 2006.

LAURI, K. et al. The use of airborne laser scanning to estimate sawlog volumes. **Forestry**, Cary, v. 81, n. 4, p. 499-509, 2008.

LEE, A. C.; LUCAS, R. M. A LiDAR-derived canopy density model for tree stem and crown mapping in Australian forests. **Remote Sensing of Environment**, Bethesda, v. 111, n. 4, p. 493-518, Dec. 2007.

LILLESSAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 4th ed. New York: J. Wiley, 2000. 724 p.

LINGNAU, C. et al. A obtenção de parâmetros florestais através de laser terrestre: novas perspectivas. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 3661-3663.

LINGNAU, C. et al. Determinação de diâmetros em diferentes alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 5031-5038.

LINGNAU, C. et al. Mensuração de alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre. **Ambiência**, Guarapuava, v. 4, p. 85-96, 2008.

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

MALTAMO, M. et al. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. **Remote Sensing of the environment**, Bethesda, v. 90, p. 319-330, 2004.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Littleton, v. 58, p. 1256-1266, 1963.

MELLO, J. M. et al. Continuidade espacial para características dendrométricas (número de fustes e volume) em plantios de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 185-194, 2009.

MELLO, J. M. et al. Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, maio/ago. 2006.

MELLO, J. M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 110 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola superior de Agricultura "Luiz de Queirós", Piracicaba, 2004.

MIQUELES, M. A. et al. Classificação de imagens obtidas do laser scanner baseada em atributos espectrais e espaciais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 1883-1890.

NAESSET, E.; BJERKNES, K. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, Bethesda, v. 78, p. 328-340, 2001.

NILSON, M. Estimation of tree heights and stand volume using Airborne Lidar System. **Remote Sensing of the Environment**, New York, v. 1/7, n. 56, p. 78-85, 1996

NUTTO, L. Manejo do crescimento diamétrico de *Araucaria Angustifolia* (Bert.) O. KTZE. baseado na árvore individual. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 9-25, 2001.

NUTTO, L.; SPATHELF, P. **Modelling diameter growth of plantation grown eucalypts based on crown projection area**. Porto Seguro: IPEF, 2008. p. 36.

OLIVEIRA, A. C. **Geotecnologia na estratificação de povoamentos de *Eucalyptus spp.*** 2006. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

PARKER, R. C.; EVANS, D. L. Lidar forest inventory with single-tree, double-, and single-phase procedures. **International Journal of Forestry Research**, New York, v. 2009 , n. 5, p. 122-128, Jan. 2009.

PELLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário florestal**. Curitiba: Os Autores, 1997. 316 p.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. **Computers and Electronics in Agriculture**, Toowoomba, v. 37 n. 1-3 p. 71-95, Dec. 2002.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Measuring individual tree crown diameter with LIDAR and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ontário, v. 29 n. 5, p. 564 - 577, 2003.

RODRIGUEZ, L. C. E. et al. Inventário florestal com tecnologia *laser* aerotransportada de plantios de *Eucalyptus spp* no Brasil. **Ambiência**, Garapuava, v. 6, p. 67- 80, 2010. Edição Especial.

SASAKI, T. et al. Estimation of leaf area index and canopy openness in broad-leaved forest using airborne laser scanner in comparison with high-resolution near-infrared digital photography. **Landscap Ecological Engineering**, Tokio, v. 4, p. 47-55, 2008.

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

SMITH, S.W. **The scientist and engineer's guide to digital signal processing**. San Diego: California Technical, 1998. 626 p.

SOILLE, P. **Morphological image analysis: principles and applications**. Berlin: Heidelberg, 1999. 316 p.

SOUZA, C. S. et al. Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 409-417, out./dez. 2007.

SUÁREZ, J. et al. **The use of airborne lidar and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry**. 2004. Disponível em: <[http://plone.itc.nl/agile\\_old/conference/greece2004/papers/5-1-1\\_suarez.pdf](http://plone.itc.nl/agile_old/conference/greece2004/papers/5-1-1_suarez.pdf)>. Acesso em: 15 set. 2010.

TAKAHASHI, T. et al. Estimation of stand volume by fusing low laser-sampling density LiDAR data with quibird panchromatic imagery in closed-canopy japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations. **SilviLaser** Edinburgh, v. 1, p. 17-19, Sept. 2008.

TIEDE, D.; HOCHLEITNER, G.; BLASCHKE, T. A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. In: STILLA, U.; ROTTENSTEINER, F.; HINZ, S. (Ed.). **3D city models, road databases, and traffic monitoring: concepts, algorithms, and evaluation**. Vienna: IAPRS, 2005.

TONOLLI, S. et al. **Mapping and modeling forest tree volume using forest inventory and airborne laser scanning**. Disponível em: <<http://rslab.disi.unitn.it/papers/R97-EJFR-Tonolli.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2010.

WEHR, A. LOHR, U. **Airborne laser scanning: an introduction and overview**. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, Enschede, v. 54, p. 68–82, 1999.

WEISHAMPEL, J. F. et al. Volumetric lidar return patterns from old-growth tropical rainforest canopy. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 21, n. 2, p. 409-415, 2000.

WULDER, M; NIEMANN, K. O.; GOODENOUGH, D. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. **Remote Sensing of Environment**, Bethesda, v. 73, p. 103-114, 2000.

YU, X. et al. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. **Remote Sensing of the environment**, Bethesda, v. 90, p. 451-462, 2004.

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y. Varredura a laser aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 80, p. 295-306, dez. 2008.



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

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

## CAPÍTULO 2 – APLICAÇÃO DO LIDAR NO INVENTÁRIO DE FLORESTAS PLANTADAS COM *Eucalyptus* sp. PARA CONTAGEM DE ÁRVORES

Luciano Teixeira de Oliveira<sup>1</sup>, Luis Marcelo Tavares de Carvalho<sup>2</sup>, Maria Zélia Ferreira<sup>3</sup>, Thomaz Chaves de Andrade Oliveira<sup>4</sup>, Fausto Weimar Acerbi Junior<sup>5</sup>

---

\* Texto no prelo da Revista CERNE, Lavras, v. 17, n. 3.

<sup>1</sup>Engenheiro Florestal, Doutorando em Engenharia Florestal – Departamento de Ciências Florestais/DCF – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 - 37200-000 – Lavras, MG – oliveiralt@hotmail.com

<sup>2</sup>Engenheiro Florestal, Professor Doutor in Geociências e Meio Ambiente – Departamento de Ciências Florestais/DCF – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – passarinho@dcf.ufla.br

<sup>3</sup>Engenheira Florestal, Doutora em Ciências Florestais – Veracel Celulose S.A – Cx. P. 23 – 45820-970 – Eunápolis, BA – maria.zelia@veracel.com.br

<sup>4</sup>Bacharel em Ciências da Computação, Doutorando em Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP – Av. James Clerck Maxwell, Cidade Universitária “Zeferino Vaz” – 3013083-868 – Campinas, SP, Brasil – thomazchaves@gmail.com

<sup>5</sup>Engenheiro Florestal, Professor Doutorando in Geociências e Meio Ambiente – Departamento de Ciências Florestais/DCF – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – fausto@dcf.ufla.br

## RESUMO

O *Light Detection and Ranging*, ou LIDAR, tem se tornado uma eficiente ferramenta auxiliar para a extração de dados no inventário florestal e também em outros estudos florestais. Este trabalho foi realizado com o objetivo de estabelecer uma metodologia eficiente para a utilização do LIDAR para a contagem do número de árvores em um povoamento de *Eucalyptus* sp., localizado no sul do estado da Bahia. Apresenta-se desde o processamento dos dados brutos obtidos em voo até o número final da contagem de árvores. Os passos intermediários são de vital importância para a qualidade dos resultados e os mesmos são obtidos por meio das seguintes etapas de processamento: organização da nuvem de pontos, criação do modelo de superfície do dossel (MSD) através da geração de uma TIN e interpolação *Inverse Distance Weighted* (IDW) e contagem automatizada final das árvores com um algoritmo de máxima local com janelas de 5 x 5 e 3 x 3. Os resultados obtidos foram comparados à contagem manual das árvores em imagens Quickbird para a verificação da acurácia. O acerto da contagem foi de 97,36% por meio da interpolação IDW com a janela de 5X5 para o algoritmo de contagem. Este resultado evidencia a eficácia da metodologia produzida e o potencial para futuras aplicações.

Palavras-chave: Inventário florestal. LIDAR. Detecção de árvores. Local máxima.

## ABSTRACT

### LIDAR APPLICATION IN PLANTED FOREST INVENTORY FOR TREE COUNT

LIDAR (Light Detection and Ranging) has become an efficient tool for data extraction in forest inventory and other forest related studies. This work's objective was to establish an efficient methodology for the use of this technology with the goal of counting the number of stems in a *Eucalyptus* plantation in South Bahia, Brazil, from the processing of raw data up to the results in counting the number stems. The efficiency of each intermediate step is of vital importance in the quality of the results, and thus were obtained in the following processing order: organization of the raw data (3D vectors); creation of canopy height surface through Triangular Irregular Network and Inverse distance weighted interpolation (IDW); local maximum algorithm for counting the number of stems with 3X3 and 5X5 windows. The obtained results were compared to a manual counting procedure executed in a Quickbird image. The automated counting procedure had an accuracy of 97.36% in the data set generated by IDW interpolation with 5X5 window counting procedure. This result exhibits the efficiency of the methodology and its potential for future applications.

Keywords: Forest inventory. LIDAR. Single tree detection. Local maxima.

## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento do setor florestal e a madeira tornando-se um bem escasso, torna-se de vital importância que os planejamentos de longo, médio e curto prazo sejam cada vez mais precisos para garantir o fluxo de madeira ao longo do tempo, maximizando a produção de madeira e diminuindo os custos de sua produção.

Neste cenário, o planejador necessita, cada vez mais, de ferramentas que gerem informações precisas do estoque atual da floresta e que lhe permitam a correta modelagem da produtividade futura. Para esta finalidade, sempre se utilizou o inventário florestal convencional (contínuo e ou pré-corte), atividade que constitui um instrumento estratégico de planejamento das empresas florestais, pois permite a estimativa das variáveis dendrométricas necessárias para se conhecer o estoque presente e futuro de madeira com precisão desejada e custo viável (SCOLFORO; MELLO, 2006).

No Brasil, o Inventário Florestal Contínuo é uma das formas de inventário mais utilizadas para acompanhar o crescimento da floresta. Nele são utilizadas parcelas permanentes, instaladas quando os povoamentos atingem dois ou três anos, que são remedidas sistematicamente em períodos que variam de um a dois anos (KANEGAE JÚNIOR et al., 2006; OLIVEIRA, 2006). Contudo, tem-se observado que alguns erros podem estar associados aos inventários convencionais, tais como viés na mensuração de diâmetros e de alturas, erro na manipulação dos dados, erro na medição de área das parcelas e, principalmente, erros associados ao procedimento de amostragem, que variam em relação à variável dendrométrica analisada, sendo maior para a variável “número de árvores por hectare”. Esses erros levam à diminuição da qualidade dos dados obtidos, refletindo na imprecisão dos modelos de crescimento, produção e,

consequentemente, no planejamento. Contudo, os erros de amostragem só podem ser resolvidos se for realizado o censo na área.

Neste contexto destaca-se o sensoriamento remoto, que vem se mostrando ser uma ferramenta importante para o desenvolvimento da Ciência Florestal e que pode permitir ganhos significativos no inventário florestal, melhorando as estimativas e ou diminuindo a intensidade amostral (SOUZA et al., 2007).

O uso do *Light Detection and Ranging*, ou LIDAR, para a determinação precisa de elevação de terrenos iniciou-se na segunda metade da década de 1970 (LILLESSAND; KIEFER, 2000) e, desde os anos 1980, seu emprego para aplicações florestais tem avançado significativamente. À medida que as imagens de alta resolução espacial se tornam mais acessíveis, torna-se também viável a obtenção de informações das florestas relativas a árvores individuais e não mais de talhões ou povoamentos (DISPERATI et al., 2007). Um feixe laser, quando se propaga no espaço, apresenta uma divergência que resulta no diâmetro do ponto projetado na superfície (*footprint*). Essa área de cobertura equivale à resolução espacial das imagens LIDAR (JENSEN, 2009; LEE; LUCAS, 2007).

Várias pesquisas têm sido conduzidas para a utilização do LIDAR no inventário de florestas plantadas, tanto para estimar parâmetros de parcelas como de árvores individuais. Entre elas destacam-se os trabalhos de Castro e Centeno (2005), Crow et al. (2007), Heurich e Thoma (2008), Ioki et al. (2010), Jupp et al. (2007), Lauri et al. (2008), Macedo (2009), Maltamo et al. (2004), Naesset e Bjerknes (2001), Popescu, Wynne e Nelson (2002), Sasaki et al. (2008), Tiede, Hochleitner e Blaschke (2005), Yu et al. (2004), Zandoná, Lingnau e Nakajima (2008), Zonete (2009) e Zonete, Rodriguez e Packalén (2010).

Neste contexto, esse trabalho foi realizado com o objetivo geral de desenvolver metodologias para aprimorar o uso de dados de medição de distâncias através de ondas de luz ou LIDAR no inventário florestal.

Especificamente buscou-se:

- a) gerar uma metodologia para a contagem de árvores em plantios de *Eucalyptus* sp. no espaçamento 4 x 3 m, com 3 anos de idade;
- b) testar dois filtros de local máxima de 5 x 5 e 3 x 3, em plantios de *Eucalyptus* sp. com espaçamento 4 x 3 m, com 3 anos de idade;
- c) testar dois interpoladores: *inverse distance weighted interpolation* (IDW) e *triangulated irregular network* (TIN) para caracterizar a situação do dossel das árvores de *Eucalyptus* sp.;
- d) testar os dois interpoladores, em diferentes alturas, nos dois talhões de *Eucalyptus* sp. com 3 anos de idade.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo está situada no extremo sul do estado da Bahia, entre as coordenadas 16°7'21"S; 39°21'48"O e 16°7'36"S; 39°21'22"O (Figura 1). Por ser uma região costeira, os índices pluviométricos são altos e bem distribuídos o ano inteiro e o relevo, por sua vez, é plano.

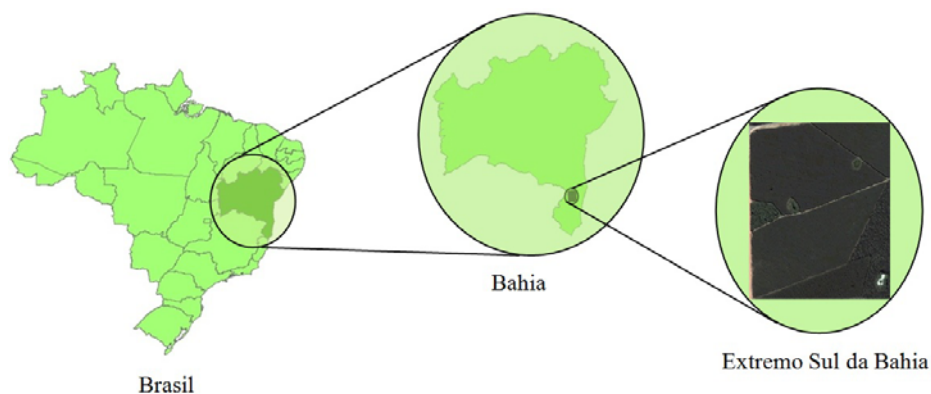


Figura 1 Localização geográfica dos talhões escaneados com o LIDAR

Neste estudo foram utilizados dois talhões de eucalipto, com três anos de idade, cultivados com diferentes clones. Esta idade foi selecionada devido ao plantio ser jovem, não tendo o entrelaçamento das copas e por ser a idade em que, geralmente, ocorre o início do inventário contínuo. O talhão 1 (clone "a") tem área de 21,71 ha, espaçamento de 3 x 4 m, possuindo 17.495 fustes conforme contagem visual de árvores em Imagem Quickbird em 09/04/2007). O talhão 2 (clone "b") tem área de 21,76 ha, espaçamento de 3 x 4 m, possuindo 17.390 fustes conforme contagem visual. Estes talhões foram inventariados com 4 parcelas circulares de 531 m<sup>2</sup> por talhão, distribuídas aleatoriamente e com o centro georreferenciado com DGPS. Na Tabela 1 também pode ser observada



uma diferença entre a área dos talhões e a existente no cadastro do povoamento, assim como uma síntese das informações dos fustes existentes nos talhões, por meio de estimativa do inventário e contagem visual. Neste estudo, os dados da estimativa do inventário serão apenas ilustrativos, uma vez que a abordagem da técnica busca determinar o número exato de árvores dentro do talhão, além do fato de o inventário ter sido realizado com uma intensidade amostral superior ao tradicional da empresa.

Tabela 1 Determinação de todas as árvores existentes nos povoamentos nos dois talhões e diferença de áreas

	Contagem visual	Estimativa do inventário	Área existente no cadastro	Área obtida pelo LIDAR
Talhão 1	17.495	18.200	21,71 ha	22,05 ha
Talhão 2	17.390	18.342	21,76 ha	21,75ha

## 2.2 Aquisição dos dados do LIDAR e pré-processamento

Os dados do LIDAR foram coletados entre os dias 5 e 9 de setembro de 2008, utilizando-se o sistema ALTM 3100 acoplado a um avião bimotor Piper Seneca II. O voo foi realizado à velocidade de 150 km/h, altura de 1.000 m, diâmetro do feixe de 20 cm, divergência do feixe de 0,3 mrad, ângulo de varredura de 15°, frequência de varredura de 58,7 Hz e intensidade de 1,5 pontos por metro quadrado. O erro planimétrico foi de 0,5 m (1,0 sigma), o altimétrico de 0,15 m (1,0 sigma) e a área de cobertura do laser foi de 0,32 m.

Ao atingir objetos sem uma superfície bem definida, um sinal de laser pode produzir vários registros de reflexões (retornos ou pulsos). Apesar de alguns sistemas LSA, como o Aeroscan (Leica), serem capazes de registrar o retorno de até 5 pulsos, para estudos florestais, os mais importantes são o primeiro e o último. O primeiro fornece informações da porção mais elevada dos objetos e é utilizado para a modelagem da superfície do dossel e o último é refletido no nível mais baixo atingido pelo laser e é utilizado para a modelagem

do terreno. Isso permite a separação da vegetação da superfície do solo para a geração do modelo digital de alturas (CASTRO; CENTENO, 2005; COELHO; VARGAS, 2007; JENSEN, 2009; MIQUELES et al., 2003).

Os dados dos sinais do LIDAR referentes às áreas dos dois talhões foram estruturados com base nas informações das coordenadas latitude, longitude, altitude (x, y, z), retornos (1º, 2º e 3º pulso) e intensidade do sinal. O resultado desta estruturação é uma planilha em que cada pulso de laser é representado em uma linha e as respectivas informações deste pulso representadas nas colunas da planilha. Estas informações determinam a densidade de pontos da nuvem resultante. Esta densidade pode ser entre 0,5 e 5 pontos por metro quadrado, em que a precisão do *scanner* do laser é da ordem de aproximadamente 15 cm (CROW et al., 2007). Cada linha da planilha também pode ser representada usando suas coordenadas x, y e z, formando uma nuvem de pontos no espaço tridimensional, armazenada em um arquivo do tipo vetorial no sistema de informações geográficas.

Após a estruturação das informações, analisou-se a rota de voo da aeronave, a fim de evitar a sobreposição de passagens sucessivas. As informações de sobreposição não foram consideradas neste estudo, pois se observou maior concentração de ruído sobre estas áreas. Isso, provavelmente, ocorreu devido ao deslocamento do dossel por influência do vento nas diferentes passagens da aeronave.

### **2.3 Processamento dos dados do LIDAR**

Para melhor entendimento da metodologia, é apresentado, na Figura 2, um esquema da sequência de passos para o processamento dos dados LIDAR.

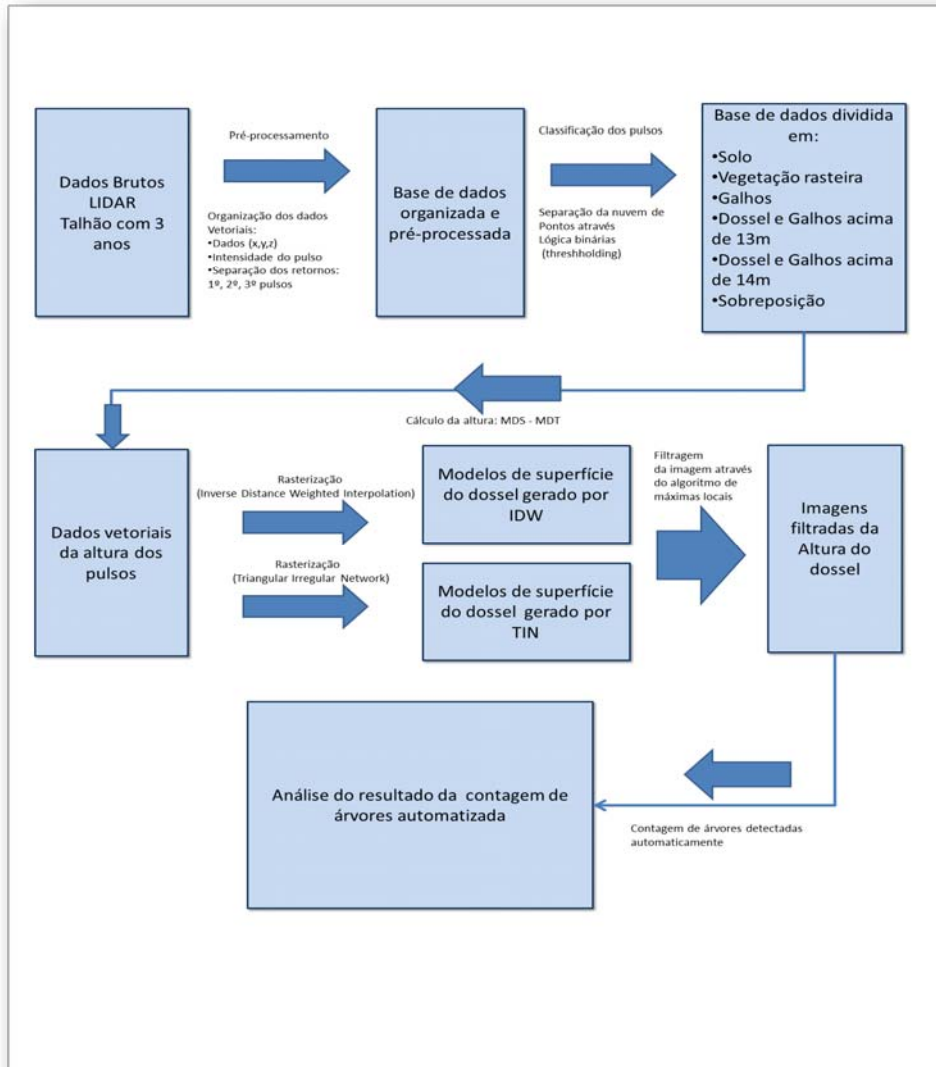


Figura 2 Esquema de passos para a execução da metodologia de contagem de árvores

Nesta etapa realizou-se a separação das informações da nuvem de pontos em modelos de terreno (MDT) e modelos de superfície (MDS). Para isso, utilizaram-se regras de lógica binária, avaliando as informações de pulso,

altitude, angulação vertical e horizontal entre os pontos vizinhos com o desvio padrão das altitudes de cada pulso. A nuvem de pontos pode ser avaliada em três dimensões, renderizadas na forma da Figura 3.

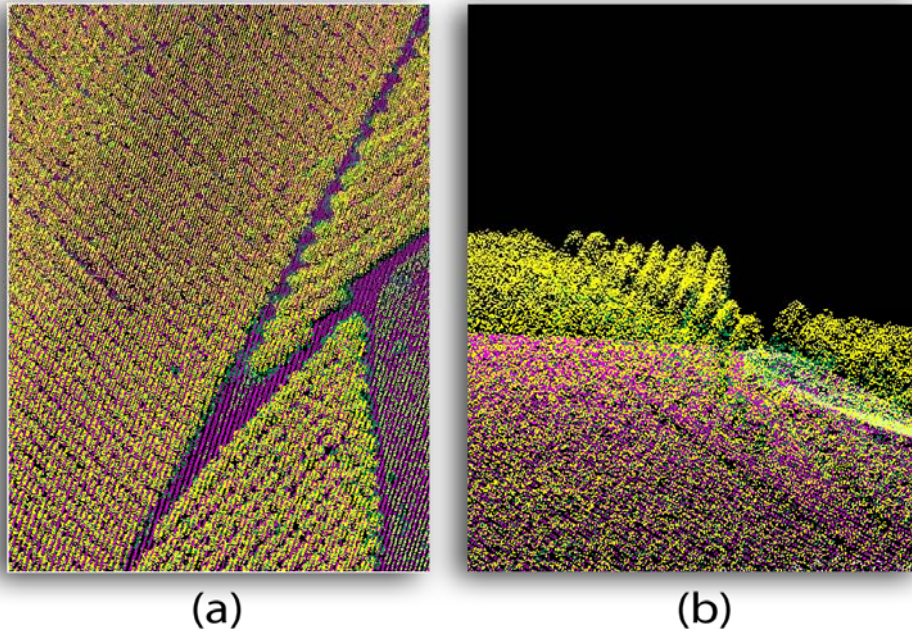


Figura 3 Nuvem de pontos 3D do LIDAR renderizadas, originadas do povoamento de *Eucalyptus* sp.

Com a diferença do MDT e MDS, gerou-se a informação de altura para todos os pontos em relação ao solo. Concomitantemente, foi gerada a classificação da nuvem de pontos em:

- a) solo (pontos com apenas um retorno e últimos retornos dos demais pontos, os quais interagem com uma angulação plana de  $8^\circ$  e uma angulação vertical de  $88^\circ$  por meio de triangulação com os pontos vizinhos, até um máximo de 8 desvios padrões);
- b) vegetação rasteira (pontos entre 0,35 e 2,50 de altura em relação ao

- solo);
- c) galhos (pontos entre 2,50 a 13 m em relação ao solo);
  - d) dossel superior a 13 m (dossel com galhos acima de 13 m);
  - e) dossel superior a 14 m (dossel com galhos acima de 14 m).

O dossel superior a 13 e a 14 m, em cada talhão, respectivamente, foi selecionado por ser a altura em média em que se iniciavam as copas. Essa divisão foi necessária devido ao fato de os clones terem uma diferença do início da base da altura das copas de, aproximadamente, 1 m e na altura total de 2 m (Figura 4).

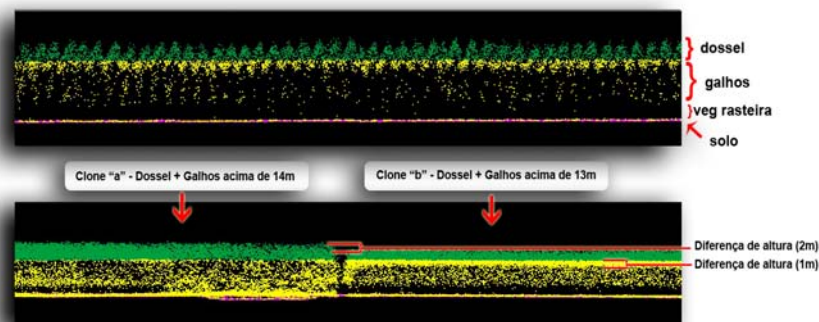


Figura 4 Perfil do povoamento de *Eucalyptus* sp. na nuvem de pontos obtidas pelo LIDAR

A informação de altura foi utilizada para todas as classes em conjunto e separadas para serem aplicados os interpoladores IDW (Figuras 5a a 5e) e TIN (Figuras 5f a 5j) (BURROGH; MC DONNELL, 1998). Neste conjunto de dados pode ser percebida uma variação na tonalidade das cenas. Esta variação interfere nos valores das alturas, no formato das copas e nos pontos das máximas locais, fazendo com que algumas árvores sejam excluídas ou divididas no resultado da detecção. Na Figura 5 são indicadas, por meio de pontos vermelhos, as árvores detectadas e, por círculos vermelhos, as árvores que não foram detectadas. O

efeito decorrente da triangulação TIN pode ser observado na Figura 5j (quadrado vermelho).

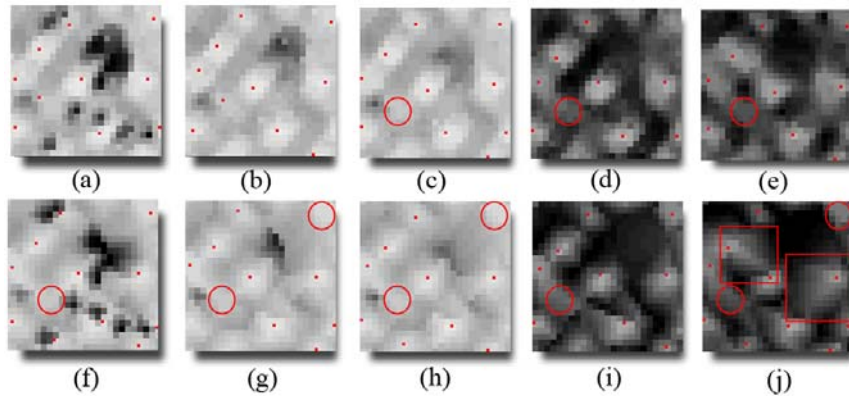


Figura 5 Resultados dos interpoladores IDW: (a) incluindo todos os primeiros retornos desde o solo até o dossel, (b) retornos desde a vegetação rasteira até o dossel, (c) galhos até o dossel, (d) dossel e galhos acima de 13 m, (e) dossel com galhos acima de 14 m; o interpolador TIN é utilizado nas figuras de (f) a (j) com a mesma sequência de situações para os retornos

Depois de se converter as informações para o formato raster, aplicou-se um filtro de máxima local (CARVALHO, 2001, 2008), com uma janela móvel 3 x 3 e 5 x 5 e, com isso, puderam ser contabilizadas todas as árvores existentes no talhão. Esse resultado foi comparado com a estimativa das parcelas do inventário (Tabela 1) e esses dois métodos foram confrontados com as informações obtidas por meio de contagem visual de uma imagem Quickbird de 09/04/2007 (Figura 6).



Figura 6 Contagem manual das árvores utilizando imagens Quickbird

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados obtidos pelo algoritmo de máxima local utilizando filtro 3 x 3 (Tabelas 2 e 3) não se mostraram tão eficientes quando comparados aos resultados obtidos utilizando-se filtro 5 x 5 (Tabelas 4 e 5), já que todos os resultados encontrados no filtro 3 x 3 tenderam a superestimar o número de indivíduos existente no talhão, gerando um maior erro de comissão. Tal resultado foi o oposto ao do filtro 5 x 5, que tendeu a subestimar os indivíduos da população nos dois talhões, estando os valores detectados por este filtro mais próximos da realidade, com menor erro de omissão. Este resultado está relacionado com o espaçamento do plantio estudado (4 x 3), sugerindo que, se for reduzido o espaçamento da área estudada, pode haver um melhor desempenho do filtro 3 x 3 e pior desempenho do filtro 5 x 5.

Tabela 2 Detecção de árvores pelo algoritmo de máxima local, filtro 3 x 3, para o talhão 1

Classes geradas com o 1º pulso	(TIN) árvores	Erro (nº árvores)	Erro (%)	(IDW) Árvores	Erro (nº árvores)	Erro (%)
Todas as classes com solo	26.208	-8.713	-49,80	29.628	-12.133	-69,35
Vegetação rasteira, galhos e dossel	24.082	-6.587	-37,65	26.516	-9.021	-51,56
Galhos e dossel	22.962	-5.467	-31,25	25.242	-7.747	-44,28
Dossel e galhos acima de 13 m	21.394	-3.899	-22,29	22.490	-4.995	-28,55
Dossel e galhos acima de 14 m	21.418	-3.923	-22,42	22.399	-4.904	-28,03

Os resultados deste estudo podem ser considerados excelentes, já que, em estudos gerados por Zadoná et al. (2008), o acerto médio encontrado foi de 82,8% e, com a metodologia proposta, chegou-se a um acerto de 98,85%. Este valor é equivalente a um erro de 202 árvores para uma população de 17.293 árvores no talhão 1 (Tabela 4). Já no talhão 2, o acerto de 96,58% é equivalente a 599 árvores, em uma população de 16.791 árvores (Tabela 5).



Tabela 3 Detecção de árvores pelo algoritmo de máxima local, filtro 3 x 3, para o talhão 2

Classes geradas com o 1º pulso	(TIN) árvores	Erro (nº árvores)	Erro (%)	(IDW)	Erro (nº árvores)	Erro (%)
Todas as classes com solo	20.235	-2.845	-16,26	23.369	-5.979	-34,17
Vegetação rasteira, galhos e dossel	19.687	-2.297	-13,13	22.362	-4.972	-28,42
Galhos e dossel	19.603	-2.213	-12,65	22.183	-4.793	-27,40
Dossel e galhos acima de 13 m	19.093	-1.703	-9,73	20.447	-3.057	-17,47
Dossel e galhos acima de 14 m	19.276	-1.886	-10,78	20.301	-2.911	-16,64

Os resultados também se comparam muito satisfatoriamente com as florestas de *norway spruce* e *scots pine*, em Maltamo et al. (2004), que encontram valores de 91,8% para a média de árvores por parcela, utilizando uma metodologia similar para a geração de um modelo de superfície de dossel. O resultado encontrado em McCombs, Roberts e Evans (2003) para dois plantios com espaçamento de 2,4 m e 3,0 m foi de 64,7% e 87,3%, tendo a fusão com dados multiespectrais (550, 675, 700 e 800 nm) de alta resolução (0,61 m) melhorado o resultado para 83,5% e 94,8%, sendo, portanto, uma metodologia sugerida para o aperfeiçoamento dos resultados de contagem de árvores.

Em um estudo de Morsdorf et al. (2004), somente 60,48% das árvores foram detectadas utilizando-se um algoritmo K-means de segmentação. Isso se deve, em parte, ao adensamento do dossel, em que, muitas vezes, o espaçamento entre copas é menor do que 1 m. Outros resultados podem ser encontrados em estudos de Koch, Heyder e Welnacker (2006), que utilizaram o *framework* de visão computacional HALCON, com técnicas de *Watersheding* para segmentar e realizar a discriminação entre diferentes copas e regras de decisão. Os resultados indicam acerto de 87,3% e o autor divide a discriminação entre correta ou satisfatória, de acordo com o resultado.

Tabela 4 Detecção de árvores pelo algoritmo de máxima local, filtro 5 x 5, para o talhão 1

Classes geradas com o 1º pulso	(TIN) árvores	Erro (nº árvores)	Erro (%)	(IDW)	Erro (nº árvores)	Erro (%)
Todas as classes com solo	17.033	462	2,64	17.683	-188	-1,07
Vegetação rasteira, galhos e dossel	16.732	763	4,36	17.293	202	1,15
Galhos e dossel	16.736	759	4,34	17.216	279	1,59
Dossel e galhos acima de 13 m	16.569	926	5,29	16.957	538	3,07
Dossel e galhos acima de 14 m	16.560	935	5,34	16.945	550	3,14

Tabela 5 Detecção de árvores pelo algoritmo de máxima local, filtro 5 x 5, para o talhão 2

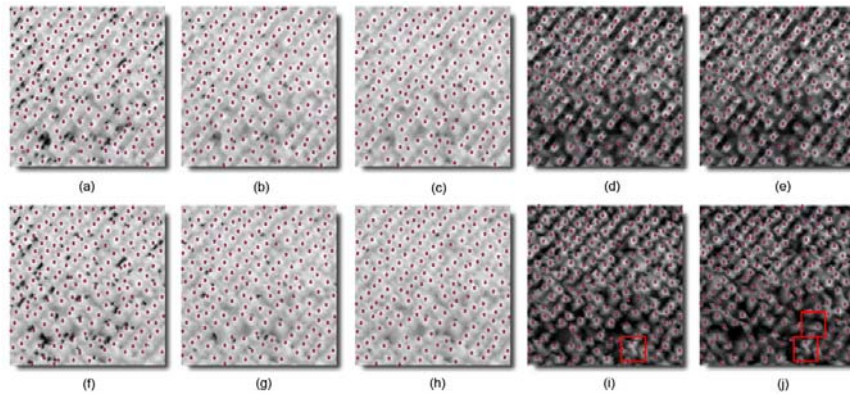
Classes geradas com o 1º pulso	(TIN) árvores	Erro (nº árvores)	Erro (%)	(IDW)	Erro (nº árvores)	Erro (%)
Todas as classes com solo	16.771	619	3,54	16.776	614	3,51
Vegetação rasteira, galhos e dossel	16.718	672	3,84	16.780	610	3,49
Galhos e dossel	16.706	684	3,91	16.791	599	3,42
Dossel e galhos acima de 13 m	16.574	816	4,66	16.435	955	5,46
Dossel e galhos acima de 14 m	16.390	1.000	5,71	16.316	1.074	6,14

Apesar de o TIN ter se mostrado mais eficiente no filtro 3 x 3 do que o IDW (Tabela 2 e 3), este não foi escolhido como ideal, já que todos os erros foram superiores ao filtro 5 x 5, mostrando este último como um filtro mais ideal para o espaçamento estudado. Sendo assim, quando novamente se faz a comparação entre os interpoladores TIN e o IDW (Tabelas 4 e 5), observa-se um melhor desempenho do IDW, o qual teve um menor erro para os dois talhões, perdendo apenas para o TIN quando se analisou o dossel do talhão 2.

Nota-se que a interpolação usando o TIN tende a descaracterizar o formato das copas, que tendem a ficar mais triangulares (Figuras 5j, 7i e 7j dentro do quadrado vermelho). Já o interpolador IDW tende a conservar a forma

da copa, característica que pode ser observada na Figura 6, a qual advém de uma imagem ótica de alta resolução.

Também foi observado que, quando se avalia só a informação do dossel, é gerado um erro maior do que quando se avaliam as informações geradas na combinação do dossel com galhos e vegetação rasteira para a população total (Figura 7a a 7j). Dessa forma, pode-se constatar que tal diferença foi devido às árvores que tiveram seu crescimento em altura prejudicado devido a alguma condição do solo ou adubação, tornando-se suprimidas em relação ao restante da população. Esta afirmação pode ser observada quando se analisam as Figuras 5a a 5e, evidenciando que as árvores abaixo da altura do dossel não foram detectadas no extrato das árvores dominantes.



**Figura 7** Resultados da contagem para os dados interpolados por IDW: (a) incluindo todos os primeiros retornos desde o solo até o dossel, (b) retornos desde a vegetação rasteira até o dossel, (c) galhos até o dossel, (d) dossel e galhos acima de 13 m, (e) dossel com galhos acima de 14 m e a mesma sequência para contagem usando os dados interpolados por TIN de (f) a (j)

Dessa forma, quando se retira o erro obtido pela análise da população em relação às informações de 1º pulso excluindo as do solo, observa-se que é possível gerar um percentual de árvores suprimidas no talhão, conforme pode ser

observado na análise da Tabela 6 e com situações encontradas nas Figuras 5 e 7. Outra observação importante de ser mencionada é que, além do número de árvores existentes no talhão, é gerado também o valor da altura de cada árvore contada, informação de maior dificuldade de aquisição e extraída com menor precisão no inventário florestal.

Tabela 6 Número de árvores suprimidas encontradas nos talhões 1 e 2

Classes geradas com o 1º pulso	Nº árvores (talhão 2)	Erro (nº árvores)	Erro (%)	Nº árvores (talhão 1)	Erro (nº árvores)	Erro (%)
Todas as classes com solo	16.776	-	-	17.683	-	-
Vegetação rasteira, galhos e dossel	16.780	0	0	17.293	0	0
Galhos e dossel	16.791	-	-	17.216	77	0,44
Dossel e galhos acima de 13 m	16.435	345	1,97	16.957	336	1,92
Dossel e galhos acima de 14 m	16.316	464	2,65	16.945	348	1,99

Estas informações podem ser de grande utilidade para avaliar a qualidade do plantio, a qualidade de sítio e melhorar o ajuste da modelagem da volumetria dos talhões, já que estas árvores terão um volume inferior ao do restante da população.

#### 4 CONCLUSÕES

Foi possível gerar uma metodologia para a finalidade específica de se obter dados de inventário florestal. Mais especificamente, trata-se da realização da contagem das árvores em povoamentos de *Eucalyptus* sp. com espaçamento 4 x 3m. Para tanto, foi fundamental a utilização apenas das informações dos galhos e do dossel das copas das árvores, obtidas a partir do 1º pulso das informações do LIDAR.

O filtro de máxima locais 5 x 5 conseguiu detectar os picos das árvores, possibilitando a contagem das árvores em talhões com 3 anos de idade, errando 202 árvores (1,15%) em uma população de 17.495 (clone “a”) e 599 árvores (3,42%) em uma população de 17.390 (clone “b”).

O interpolador *inverse distance weighted interpolation* (IDW) mostrou-se mais eficiente que o *triangulated irregular network* (TIN) para caracterizar a situação do dossel das árvores de *Eucalyptus* sp.

Com a metodologia proposta, foi possível indicar a quantidade de árvores suprimidas em talhões clonais de *Eucalyptus* sp. com 3 anos de idade.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Sabe-se que ainda são muitos os desafios a serem enfrentados para se utilizar todo o potencial das informações obtidas por meio do LIDAR. Então, é necessário realizar mais estudos nesta linha, no intuito de avaliar esta metodologia para diferentes idades, assim como diferentes espaçamentos e diferentes situações de relevo.

## REFERÊNCIAS

- BURROGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. New York: Oxford University, 1998. 333 p.
- CARVALHO, L. M. T. **Mapping and monitoring forest remanants: a multi-scale analysis of spatio-temporal data**. 2001. 140 p. Thesis (Ph. D) - Wageningen University, Wageningen, 2001.
- CARVALHO, L. M. T.; Detecção de modificações na cobertura do solo. In: INVENTÁRIO Florestal de Minas Gerais: monitoramento da flora nativa 2005-2007. Lavras: UFLA, 2008. 357 p.
- CASTRO, F. C.; CENTENO, T. M. Segmentação de imagens geradas por perfilamento a *laser* para delimitação de árvores individuais em uma área de reflorestamento de eucaliptos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...Goiânia**: INPE, 2005. 1 CD ROM.
- COELHO, A. H.; VARGAS, R. M. A. Geração de modelos digitais de terreno a partir de dados de *laser scanner* aerotransportado em área de floresta usando o *software* livre GRASS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 3653-3660.
- CROW, P. et al. Woodland vegetation and its implications for archaeological survey using LiDAR. **Forestry**, Cary, v. 80, n. 3, p. 241-252, 2007.
- DISPERATI, A. A. et al. Aplicação da técnica “filtragem de locais máximas” em fotografia aérea digital para a contagem de copas em reflorestamento de *Pinus elliottii*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 76, p. 45-55, dez. 2007.
- HEURICH, M.; THOMA, F. Estimation of Forestry stand parameters using laser scanning data in temperate, structurally rich natural European beech (*Fagus sylvatica*) and Norway spruce (*Picea abies*). **Forestry**, Cary, v. 81, n. 5, p. 645-661, 2008.
- IOKI, K. et al. Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach. **Landscape Ecological Engineering**, Tokio, v. 6, p. 29-36, 2010.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.  
JUPP, D. et al. Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called Echidna. **Tree Physiology**, Cary, v. 29, p. 171-181, 2007.

KANEGAE JÚNIOR, H. et al. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.* **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 123-136, abr./jun. 2006.

KOCH, B.; HEYDER, U.; WELNACKER, H. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v. 72, n. 4, p. 357-363, Apr. 2006.

LAURI, K. et al. The use of airbourne laser scanning to estimate sawlog volumes. **Forestry**, Cary, v. 81, n. 4, p. 499-509, 2008.

LEE, A. C.; LUCAS, R. M. A LIDAR-derived canopy density model for tree stem and crown mapping in Australian forests. **Remote Sensing of Environment**, Bethesda, v. 111, n. 4, p. 493-518, Dec. 2007.

LILLESSAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 4th ed. New York: J. Wiley, 2000. 724 p.

MCCOMBS, J. W.; ROBERTS, S. D.; EVANS, D. L. Influence of fusing lidar and multispectral imagery on remotely sensed estimates of stand density and mean tree height in a managed loblolly pine plantation. **Forest Science**, Bethesda, v. 49, n. 3, p. 457-466, 2003.

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

MALTAMO, M. et al. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. **Remote Sensing of the environment**, Bethesda, v. 90, p. 319-330, 2004.



MIQUELES, M. A. et al. Classificação de imagens obtidas do laser scanner baseada em atributos espectrais e espaciais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 1883-1890.

MORS DORF, F. et al. LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. **Remote Sensing of Environment**, Bethesda, v. 92, p. 353–362, 2004.

NAESSET, E.; BJERKNES, K. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, Bethesda, v. 78, p. 328–340, 2001.

OLIVEIRA, A. C. **Geotecnologia na estratificação de povoamentos de *Eucalyptus spp.*** 2006. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. **Computers and Electronics in Agriculture**, Toowoomba, v. 37 n. 1/3 p. 71-95, Dec. 2002.

SASAKI, T. et al. Estimation of leaf area index and canopy openness in broad-leaved forest using airborne laser scanner in comparison with high-resolution near-infrared digital photography. **Landscap Ecological Engineering**, Tokio, v. 4, p. 47-55, 2008.

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

SOUZA, C. S. et al. Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 409-417, out./dez. 2007.

TIEDE, D.; HOCHLEITNER, G.; BLASCHKE, T. A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. In: STILLA, U.; ROTTENSTEINER, F.; HINZ, S. (Ed.). **3D city models, road databases, and traffic monitoring: concepts, algorithms, and evaluation**. Vienna: IAPRS, 2005.

YU, X. et al. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. **Remote Sensing of the environment**, St. Paul, v. 90, p. 451-462, 2004.

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y. Varredura a laser aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 80, p. 295-306, dez. 2008.

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

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

### **CAPÍTULO 3 – INFLUÊNCIA DA IDADE NA CONTAGEM DE ÁRVORES DE *Eucalyptus* sp. COM DADOS DE LIDAR**

Luciano Teixeira de Oliveira<sup>1</sup>, Luis Marcelo Tavares de Carvalho<sup>2</sup>, Maria Zélia Ferreira<sup>3</sup>, Thomaz Chaves de Andrade Oliveira<sup>4</sup>, Vanessa Thaís Felipe Pimentel<sup>5</sup>

---

<sup>1</sup>Engenheiro Florestal, Doutorando em Engenharia Florestal – Departamento de Ciências Florestais/DCF – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 - 37200-000 – Lavras, MG – oliveiralt@hotmail.com

<sup>2</sup>Engenheiro Florestal, Professor Doutor in Geociências e Meio Ambiente – Departamento de Ciências Florestais/DCF – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – passarinho@dcf.ufla.br

<sup>3</sup>Engenheira Florestal, Doutora em Ciências Florestais – Veracel Celulose S.A – Cx. P. 23 – 45820-970 – Eunápolis, BA – maria.zelia@veracel.com.br

<sup>4</sup>Bacharel em Ciências da Computação, Doutorando em Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP – Av. James Clerck Maxwell, Cidade Universitária “Zeferino Vaz” – 3013083-868 – Campinas, SP, Brasil – thomazchaves@gmail.com

<sup>5</sup>Engenheira Florestal – Departamento de Ciências Florestais/DCF – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – vanessapimentel@dcf.ufla.br

## RESUMO

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de analisar a influência da idade na detecção automática de árvores em talhões de *Eucalyptus* sp. por meio de dados LIDAR. Foram analisados 3 talhões com as idades de 3, 5, e 7 anos. Esses talhões tiveram os dados da nuvem de pontos do LIDAR referentes ao primeiro pulso divididos em dois estratos verticais, o que gerou duas classes: Classe classe 1 (nuvem de pontos para toda a vegetação) e Classe classe 2 (nuvem de pontos para a vegetação acima de 10 metros). Os resultados da detecção do número de fustes para as duas classes foram comparados com o censo da área por meio de contagem visual em uma imagem de alta resolução espacial e com o inventário florestal. Na comparação com o censo, encontrou-se pouca diferença entre as idades para o número de fustes para a Classe 1, sendo mais indicado para as idades de 3 e 5 anos e a Classe 2, apesar de se observar uma tendência de subestimativa dos valores, é mais indicada para a idade de 7 anos. Quando se comparou com o inventário florestal, observou-se uma coerência entre o número de fustes encontrado quando comparado com a detecção automática nos dois estratos verticais.

Palavras-chave: Inventário florestal. LIDAR. Detecção de árvores. Local máxima.

***Eucalyptus* sp. AGE INFLUENCE ON TREE COUNTING WITH LIDAR  
DATA**

**ABSTRACT**

The present work's intention was to determine which is the best age to study dendrometric variables by using LIDAR datasets of scanned *Eucalyptus* *sp.* stands and digital filtering techniques. Three different stands with ages of 3, 5 e 7 years were analyzed. These stands were scanned using a LIDAR sensor and the resulting cloud point data of the first pulse was divided in two stratified datasets: Class 1 (Points for all vegetation), Class 2 (Points for vegetation above 10m). Results for obtaining the number of stems for each dataset were compared to the census of the area, which was done by visual counting procedure by means of an auxiliary high spatial resolution remote sensing image, and forest inventory. In comparison to the census, the difference was considered small among the ages for Class 1. In the other hand, Class 2 biased toward underestimated values, making Class 1 more suitable for this purpose. When compared to forest inventory, this methodology proved more efficient. Forest inventory biased toward overestimation, thus taking the number of stems variable out of the confidence interval supposed for this methodology. This leads to the necessity of intensification of sampling procedure in forest inventory, in order to acquire more accurate results, making this procedure economically unviable for the analyzed variable.

Key words: Forest inventory. LIDAR. Single tree detection. Local maxima.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, nosso país é um dos grandes exportadores de produtos de base florestal no mundo, principalmente celulose, madeira, móveis e carvão vegetal. No custo desses produtos estão embutidos os custos do planejamento, inventário florestal, assim como as atividades de colheita e transporte florestal, que elevam os custos da madeira posta em fábrica.

Segundo Diniz (2007), a movimentação de máquinas, equipes de colheita e transporte florestal, assim como equipe de silvicultura, é definida por meio das informações de produtividade de cada povoamento florestal. Para se definir a produtividade do povoamento é utilizado o inventário florestal, em que povoamentos são amostrados de forma representativa, por meio de uma boa intensidade amostral, o que possibilita estimar o volume e outras variáveis com a precisão desejada e custo que viabilize a produção (SCOLFORO; MELLO, 2006). No Brasil, o Inventário Florestal Contínuo é uma das formas de inventário mais utilizadas para acompanhar o crescimento da floresta. Nele são utilizadas parcelas permanentes, instaladas quando os povoamentos atingem dois ou três anos e são remedidas sistematicamente em períodos que variam de um a dois anos (KANEGAE JÚNIOR et al., 2006; OLIVEIRA, 2006; PELLICO NETTO; BRENA, 1997; SCOLFORO; MELLO, 2006). Contudo, tem-se observado que alguns erros podem estar associados aos inventários convencionais, tais como viés na mensuração de diâmetros e de alturas, erro na manipulação dos dados, erro na medição de área das parcelas e, principalmente, erros associados ao procedimento de amostragem, que variam em relação à variável dendrométrica analisada, sendo maior para a variável “número de árvores por hectare”. Esses erros levam à diminuição da qualidade dos dados obtidos, refletindo na imprecisão dos modelos de crescimento e produção e,

consequentemente, no planejamento. Contudo, os erros de amostragem só podem ser resolvidos se for realizado o censo na área.

Para Assis (2005), as formas de controlar as variações locais normalmente utilizadas levam em conta apenas características físicas ou cadastrais da floresta e, geralmente, não são suficientes para tratar a floresta como uma unidade contínua, ficando limitada à geração de informações dentro de uma unidade física (talhão), onde se assume uma homogeneidade de produtividade que nem sempre existe. Para Diniz (2007), é necessário conhecer todos os possíveis problemas do plantio florestal, como variação no espaçamento entre plantas, áreas onde não existam árvores devido à condição de relevo e mortalidade de mudas. Se não forem detectados, haverá uma deficiência na amostra representativa da população.

Apesar de a maioria das florestas comerciais ter sido plantada pela própria empresa, o número total de árvores não é conhecido com exatidão. Uma maneira de se obter o número de árvores em um povoamento florestal é por meio do inventário florestal (MELLO et al., 2009). Por isso, mesmo sendo calculado o volume de madeira de cada árvore da parcela, só é possível estimar o volume do povoamento extrapolando-se o volume total de madeira das parcelas para a área de plantio.

Se fosse conhecido o número de árvores dos povoamentos, o volume médio das árvores das parcelas poderia ser extrapolado pelo número total de árvores. Isso diminuiria o erro do inventário e poderia, até mesmo, reduzir a intensidade amostral necessária para o pré-corte, etapa onerosa e indispensável nos meses anteriores à colheita.

Diniz (2007) e Mello et al. (2009) avaliaram métodos para definir com maior precisão o número de fustes por unidade de manejo e o volume de madeira, por meio da amostragem casual simples (ACS) e geoestatística, utilizando diferentes intensidades amostrais e formas de parcelas. A exatidão do

número de fustes foi obtida por contagem visual de fotografias aéreas e comparada pela relação entre as estimativas das características número de fustes e volume de madeira por cada método. No estudo, os autores concluíram que existia uma diferença significativa entre os procedimentos amostrais; em todos houve tendência em superestimar o volume de madeira e o número de fustes por talhão.

Apesar de todos os esforços, nos inventários florestais tradicionais ainda são embutidos os erros de atualização da base cartográfica, existência de falhas, ocorrência de pragas, doenças e manchas de solos em reboleiras e variações no espaçamento ao longo do plantio. Visando a minimizar esses erros, a utilização de sensores remotos muito tem contribuído para melhorar o conhecimento do tamanho e forma do plantio, por meio da geração de mapas, assim como a estratificação dos povoamentos pelo uso imagens de alta resolução (OLIVEIRA, 2006; SOUZA et al., 2007) advindas de sensores passivos (CROSTA, 1992; JENSEN, 2009; LILLESSAND; KIEFER, 2000). Uma limitação desses sensores, porém, é a presença de nuvens sobre a área de interesse que, em determinadas regiões, são uma constante e inviabilizam o seu uso.

Para esses casos, a tecnologia desenvolvida com sensores ativos (CROSTA, 1992; JENSEN, 2009; LILLESSAND; KIEFER, 2000), tais como o RADAR e o LIDAR, pode ser empregada. Esses sensores conseguem imagear mesmo com a presença de nuvens, sendo muito utilizados na quantificação de biomassa, já que também conseguem penetrar no estrato arbóreo até atingir o solo (JENSEN, 2009).

O uso do *Light Detection and Ranging*, ou LIDAR, para a determinação precisa de elevação de terrenos iniciou-se na segunda metade da década de 1970 (LILLESSAND; KIEFER, 2000) e, desde os anos 1980, seu emprego para aplicações florestais tem avançado significativamente. À medida que as imagens de alta resolução espacial se tornam mais acessíveis, torna-se também viável a



obtenção de informações das florestas relativas a árvores individuais e não mais de talhões ou povoamentos (DISPERATI et al., 2007).

Na atualidade, o LIDAR possui uma grande gama de aplicações e em diversas áreas, tais como planejamento costeiro, avaliação de risco de inundações, telecomunicações e redes de transmissões de energia, florestas, agricultura, petróleo, transportes, planejamento urbano e mineração, entre outros (GIONGO et al., 2010).

Na América do Norte e na Escandinávia, essa tecnologia tem suas aplicações consolidadas para a quantificação de biomassa em extensas áreas, tendo um valor aproximado de US\$ 5/ha (RODRIGUEZ et al., 2010). Várias linhas de pesquisa para estimar parâmetros de parcelas, contagem de árvores individuais, quantificação do estoque florestal, biomassa e para a diminuição da intensidade amostral vêm sendo desenvolvidas, podendo-se destacar trabalhos de Crow et al. (2007), Heurich e Thoma (2008), Ioki et al. (2010), Jupp et al. (2007), Lauri et al. (2008), Maltamo et al. (2004), Naasset e Bjerknæs (2001), Popescu, Wynne e Nelson (2002, 2003), Sasaki et al. (2008), Tiede, Hochleitner e Blaschke (2005) e Yu et al. (2004). No Brasil, essa linha de pesquisa é bem recente, devido ao custo para aquisição dessas informações e também por apenas algumas empresas manusearem esse equipamento em aeronaves. Mesmo assim, podem-se destacar os trabalhos de Castro e Centeno (2005), Lingnau e Nakajima (2008), Macedo (2009), Oliveira et al. (2011), Rodriguez et al. (2010), Zonete (2009) e Zonete, Rodriguez e Packalén (2010).

Diante do exposto, foi realizado um estudo para determinar qual a melhor idade para se realizar um voo com LIDAR e, utilizando esses dados, realizar um censo da área em questão, conforme sugerido por Oliveira et al. (2011). Especificamente buscou-se:

- a) gerar uma metodologia para a contagem de árvores em plantios de *Eucalyptus* sp. no espaçamento 4 x 3 m, com 3 anos e no espaçamento 5 x 2,40 m, com 5 e 7 anos de idade;
- b) testar dois estratos verticais advindos das informações LIDAR, interpolados com a *Inverse Distance Weighted Interpolation* (IDW), para a contagem de árvores, em plantios de *Eucalyptus* sp. com espaçamento 4 x 3 m, com 3 anos e no espaçamento 5 x 2,4 m, com 5 e 7 anos de idade;
- c) avaliar qual dos estratos verticais é mais recomendado para ser aplicado nas diferentes idades;
- d) comparar os resultados obtidos pela metodologia com os gerados através do inventário florestal.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo está situada no extremo sul do estado da Bahia, entre as coordenadas 16°04'S; 39°28'O e 16°08'S; 39°20'O (Figura 1). O clima da região, segundo Koppen, é Tropical Equatorial, com chuvas distribuídas durante o ano inteiro e média anual de 1.200 mm. A temperatura média é de 24°C com pequena amplitude, por se tratar de uma região costeira. As áreas estudadas compreendem plantios comerciais de *Eucalyptus* sp., nos quais foram selecionados talhões com 3, 5 e 7 anos na época do voo, em que o talhão com 3 anos tinha o espaçamento 4 x 3m e os demais talhões tinham o espaçamento de 5 x 2,4 m.

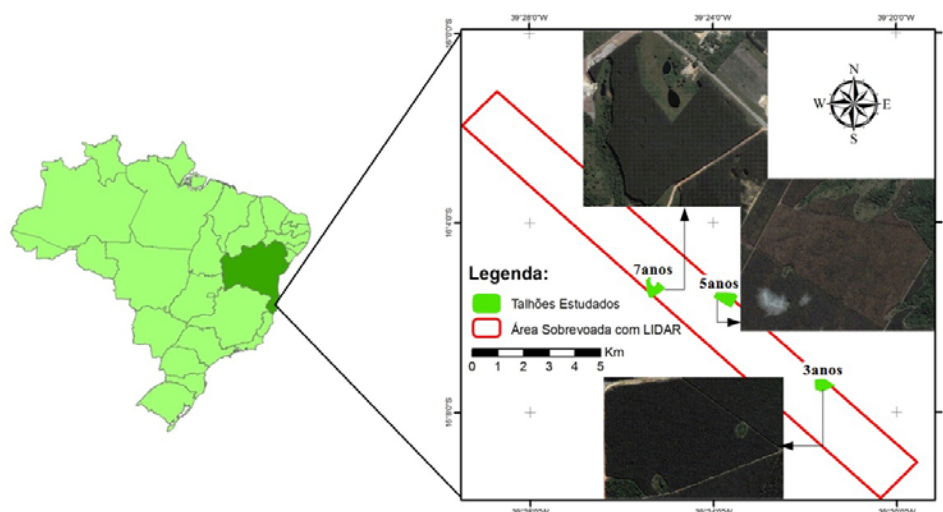


Figura 1 Localização geográfica dos talhões escaneados com o LIDAR

As idades 3, 5 e 7 anos foram as escolhidas, pois é nelas que ocorre a grande maioria dos inventários florestais contínuos (KANEGAE JÚNIOR et al.,

2006; OLIVEIRA, 2006; PELLICO NETTO; BRENA, 1997; SCOLFORO; MELLO, 2006). Para a determinação do número de fustes nos talhões por meio de contagem visual foi utilizada uma imagem Quickbird de 09/04/2007.

Os talhões foram inventariados com parcelas circulares de 530,93 m<sup>2</sup>, com o centro georreferenciado com DGPS, distribuídas aleatoriamente em uma suficiência amostral de 4 parcelas por talhão. Na Tabela 1 observa-se o número de árvores encontradas em cada parcela, tendo, para se definir o número estimado de árvores no talhão, sido consideradas as árvores bifurcadas como duas, descontando-se o número de falhas e árvores mortas por parcela.

Tabela 1 Número de indivíduos de cada idade por parcela, obtidos no inventário florestal

	Número de árvores por idade		
	3 anos	5 anos	7 anos
<b>Parcela 01</b>	45	46	39
<b>Parcela 02</b>	44	42	43
<b>Parcela 03</b>	47	45	43
<b>Parcela 04</b>	42	45	47

Para se obter o número de árvores por talhão, multiplicou-se o somatório de árvores encontradas nas parcelas de cada talhão pelo fator de proporcionalidade de área encontrado para cada talhão (PELLICO NETO; BRENA, 1997). Na Tabela 2 são apresentadas as estatísticas para o número de indivíduos por hectare e, na Tabela 3, os valores do intervalo de confiança.

A determinação do número de árvores por meio de contagem visual para cada idade é apresentada na Figura 2. Na Tabela 2, pode ser observada uma diferença entre a área existente no cadastro da empresa e a área encontrada pelo LIDAR.

Tabela 2 Estatísticas encontradas para a determinação do número de árvores por talhão

Idade (anos)	3	5	7
Média (nº de árvores)	44,5	44,5	43
Variância	4,3	3	10,7
Fator de área	409,00	555,83	443,52
Fator de correção	0,9902	0,9928	0,9910
Erro padrão	1,0	0,9	1,6
Erro do inventário	3,3	2,7	5,2
Área talhão	21,7 ha	29,5 ha	23,5 ha
Área parcela	530,9 m <sup>2</sup>	530,9 m <sup>2</sup>	530,9 m <sup>2</sup>
Área talhão (LIDAR)	22,1 ha	29,9 ha	24,7 ha

Tabela 3 Número de árvores por talhão e o respectivo intervalo de confiança

Idade (anos)	Intervalo de confiança	Intervalo de confiança	Intervalo de confiança	Contagem visual
	Valor inferior	Valor médio	Valor superior	
3	16.852	18.200	19.548	17.495
5	23.208	24.734	26.260	23.150
7	16.777	19.071	21.365	18.090

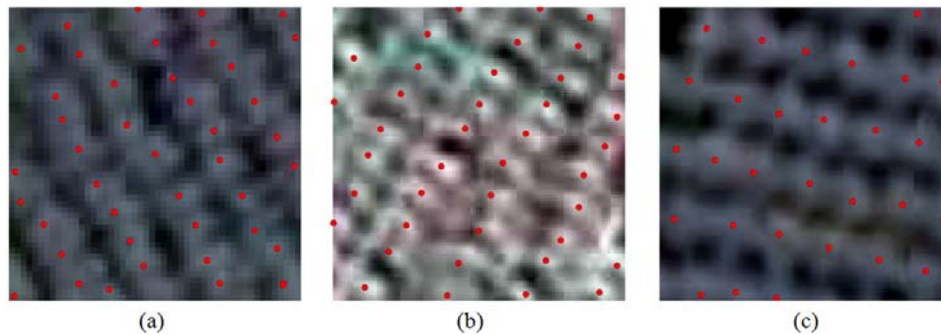


Figura 2 Contagem visual dos fustes nos talhões (pontos vermelhos) para as idades de (a) 7 anos, (b) 5 anos e (c) 3 anos

## 2.2 Aquisição dos dados do LIDAR e pré-processamento

Os dados do LIDAR foram coletados entre os dias 5 e 9 de setembro de 2008, utilizando-se o sistema ALTM 3100 acoplado a um avião bimotor Piper Seneca II. O voo foi realizado à velocidade de 150 km/h, altura de 1.000 m,

diâmetro do feixe de 20 cm, divergência do feixe de 0,3 mrad, ângulo de varredura de 15°, frequência de varredura de 58,7 Hz e intensidade de 1,5 pontos por metro quadrado. O erro planimétrico foi de 0,5 m (1,0 sigma), o altimétrico de 0,15 m (1,0 sigma) e a área de cobertura do laser foi de 0,32 m.

Os dados dos sinais do LIDAR referentes às áreas dos talhões foram organizados balizados nas informações das coordenadas latitude, longitude, altitude (x, y, z), retornos (1°, 2° e 3° pulso) e intensidade do sinal. Todos esses fatores podem influenciar a densidade de pontos da nuvem resultante, que pode variar de 0,5 a 5 pontos por metro quadrado. A precisão do scanner do laser é da ordem de aproximadamente 15 cm (CROW et al., 2007).

Após a estruturação das informações, analisou-se a rota de voo da aeronave, a fim de separar os pontos que estavam sobrepostos, por meio do cruzamento das informações de voo e do tempo de aquisição dos pulsos gerados e armazenados do LIDAR. As informações de sobreposição não foram consideradas neste estudo, pois se observou maior concentração de ruído sobre essas áreas. Isso, provavelmente, ocorreu devido ao deslocamento do dossel por influência do vento nas diferentes passagens da aeronave (OLIVEIRA et al., 2011).

### **2.2.1 Processamento dos dados LIDAR**

Os dados foram processados segundo a metodologia proposta por Oliveira et al. (2011), sendo utilizadas na primeira classe apenas as informações referentes ao primeiro pulso da vegetação e, na segunda classe, todas as informações referentes ao primeiro pulso da vegetação acima de 10 m de altura.

Nesta etapa, separaram-se as informações da nuvem de pontos em modelos de terreno (MDT) e modelos de superfície (MDS). Para isso, utilizaram-se regras de lógica binária, avaliando as informações de pulso,

altitude, angulação vertical e horizontal entre os pontos vizinhos com o desvio padrão das altitudes de cada pulso. A nuvem de pontos pode ser avaliada em três dimensões, renderizadas na forma da Figura 3. Na Figura 3a pode ser observada a renderização para a classe com toda vegetação (cor cinza e amarelo) e, na Figura 3b, a mesma classe em duas dimensões. Nas Figuras 3c e 3d a mesma área, porém, sem a influência da vegetação abaixo de 10 m (classe vegetação acima de 10 m), podendo ser visualizado de melhor forma o solo e a vegetação acima de 10 m.

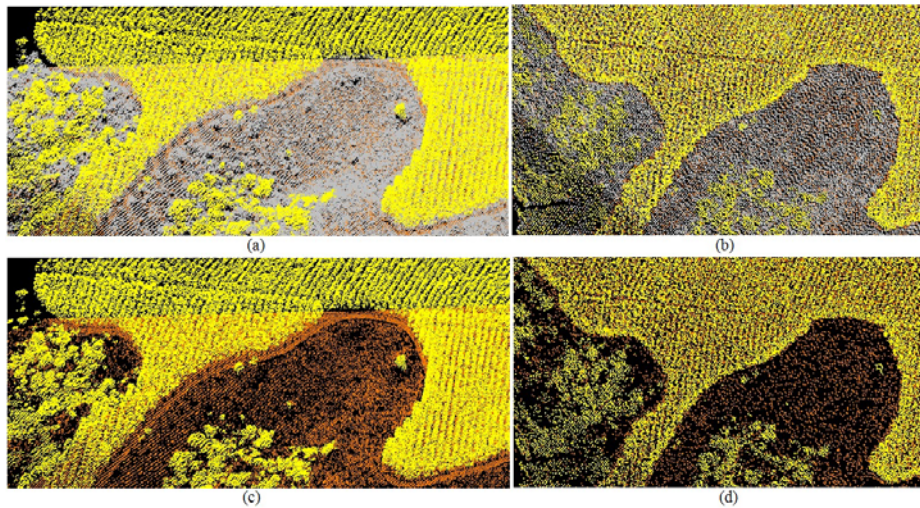


Figura 3 Nuvem de pontos 3D do LIDAR renderizadas, originadas do povoamento de *Eucalyptus* sp. com 5 anos: (a) classe contendo toda vegetação (renderizada), (b) mesma classe em duas dimensões, (c) classe contendo vegetação acima de 10 m (renderizada) e (d) mesma classe em duas dimensões

Com a diferença do MDT e MDS, gerou-se a informação de altura para todos os pontos em relação ao solo. Concomitantemente, foi gerada a classificação da nuvem de pontos em:

- a) solo (pontos com apenas um retorno e últimos retornos dos demais

pontos, os quais interagem com uma angulação plana de  $8^\circ$  e uma angulação vertical de  $88^\circ$  por meio de triangulação com os pontos vizinhos, até um máximo de 8 desvios padrões);

- b) vegetação (todos os pontos referentes ao primeiro pulso, não considerados como solo);
- c) vegetação acima de 10 m (todos os pontos referentes à classe Vegetação acima de 10 m do solo).

Essa divisão pode ser observada no perfil vertical da nuvem de pontos (Figura 4), em que podem ser avaliados o efeito das classes para as diversas idades nos talhões estudados e a altura média de cada talhão.

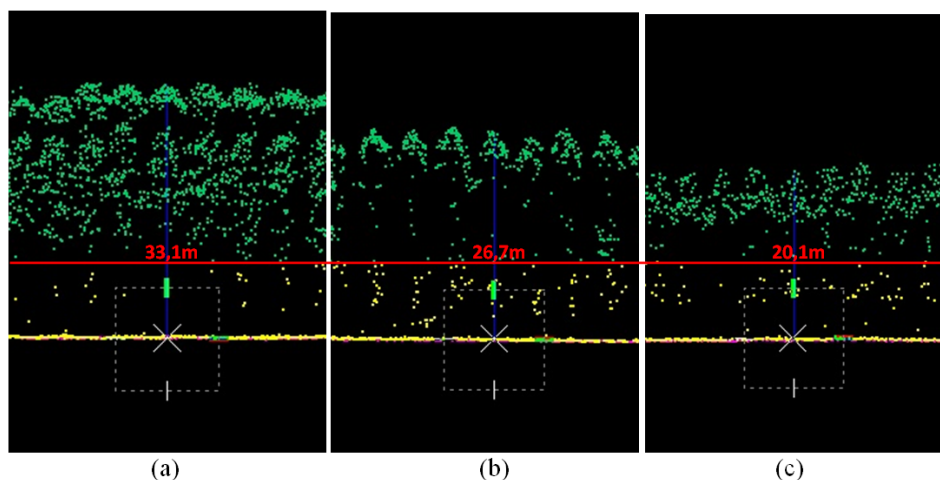


Figura 4 Perfil do povoamento de *Eucalyptus* sp. na nuvem de pontos obtidas pelo LIDAR nas diferentes idades, sendo (a) 7 anos, (b) 5 anos e (c) 3 anos

A informação de altura, existente no primeiro pulso, foi utilizada para todas as classes em que se aplicou o interpolador *Inverse Distance Weighted Interpolation* (IDW) (BURROGH; MC DONNELL, 1998). Esse interpolador foi utilizado devido aos resultados positivos observados em Oliveira et al. (2011).



Depois de se converter as informações para o formato raster, aplicou-se um filtro de máxima local (CARVALHO, 2001, 2008; OLIVEIRA et al., 2011). Esse método identifica os locais de máxima intensidade de brilho da imagem em bandas individuais por meio de uma máscara (DISPERATI; OLIVEIRA FILHO, 2005; WULDER; NIEMANN; GOODENOUGH, 2000). Neste caso, as áreas mais brilhantes referem-se às áreas mais altas das copas.

No algoritmo de máxima local, utilizou-se uma janela móvel de 5 x 5, a qual foi indicada como mais adequada em plantios com espaçamento 4 x 3, no trabalho de Oliveira et al. (2011). Esse procedimento foi repetido para todos os talhões analisados, conforme sequências de processos da Figura 5. Dessa forma, puderam ser contabilizadas todas as árvores existentes nos três talhões analisados. Esse resultado foi comparado com a estimativa das parcelas do inventário (Tabela 3) e esses dois métodos foram confrontados com as informações obtidas por meio de contagem visual de uma imagem Quickbird de 09/04/2007 (Figura 5), com os valores descritos na Tabela 3.

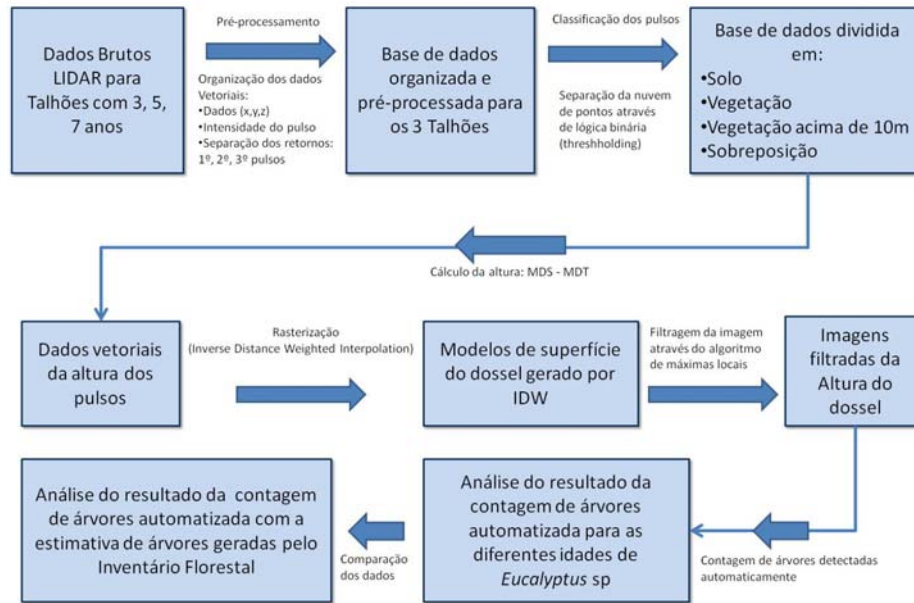


Figura 5 Esquema de passos para a execução da metodologia de contagem de árvores para os talhões

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As informações obtidas pela detecção dos fustes utilizando-se o filtro 5 x 5 para a toda a vegetação (Tabelas 4) e para a vegetação acima de 10 m (Tabela 5), foram confrontadas com o valor obtido por meio da contagem visual. Observou-se que a detecção teve um bom desempenho para todas as classes, quando comparado com o valor real (Tabela 4 e 5). O valor do erro manteve-se baixo, corroborando com a avaliação feita por Oliveira et al. (2011), que obteve um acerto superior a 96% para o número de fustes utilizando esta mesma técnica para *Eucalyptus* sp. com 3 anos de idade, além de outros trabalhos, como os de Maltamo et al. (2004), McCombs, Roberts e Evans (2003) e Zadoná et al. (2008).

Tabela 4 Detecção de árvores pelo algoritmo de máxima local, filtro 5 x 5, para os 3 talhões estudados (Classe Vegetação)

Idade (anos)	Contagem visual	Detecção automática	Erro (Nº árvores)	Erro (%)
3	17.495	17.293	202	1,15
5	23.150	23.333	-183	-0,79
7	18.090	19.700	-1.610	-8,90

Tabela 5 Detecção de árvores pelo algoritmo de máxima local, filtro 5 x 5, para os 6 talhões estudados (Classe Vegetação acima de 10 m)

Idade (anos)	Contagem visual	Detecção automática	Erro (Nº árvores)	Erro (%)
3	17.495	16.957	538	3,08
5	23.150	21.690	1.460	6,31
7	18.090	18.337	-247	-1,37

De maneira geral, a detecção automática utilizando o filtro 5 x 5 para a classe contendo todos os pontos referente à vegetação tendeu a detectar menos árvores do que a contagem visual para o espaçamento 4 x 3 e mais árvores para o espaçamento 5 x 2,40. A maior diferença foi encontrada para a floresta de 7 anos (-8,90%) e a menor, para a floresta de 5 anos (-0,79%), tendo um valor

ainda baixo na idade de 3 anos (1,15%). Nesse sentido, como o erro observado foi baixo para todas as classes e idades, pode-se dizer que a idade da floresta não influencia a contagem de árvores utilizando o LIDAR. Não foi possível fazer um teste de significância, já que as análises se baseiam na enumeração completa dos indivíduos. Assim, os melhores resultados foram obtidos em idades mais jovens, como observado para a idade de 3 e 5 anos.

Já para a detecção utilizando o mesmo filtro na classe de vegetação acima de 10 m, observou-se que a tendência de subestimativa aumentou (Tabela 5) para plantios com 3 anos (3,08%) no espaçamento 4 x 3. Isso pode ter ocorrido devido ao fato de árvores bifurcadas terem sido consideradas como uma apenas no momento da interpolação ou, ainda, pelo fato de árvores suprimidas não terem sido contabilizadas. Todavia, quando se analisam os plantios com 5 e 7 anos de idade no espaçamento 5 x 2,40, observa-se, na Tabela 5, que também houve uma tendência de subestimativa, quando comparado com a Tabela 4, o qual gerou um maior erro para a idade de 5 (6,31%) e uma redução no erro para a idade de 7 anos (-1,37%).

Este resultado indica que, para a contagem automática de fuste utilizando o algoritmo de máximas locais com o filtro 5 x 5 em um espaçamento 4 x 3, é mais adequado utilizar todas as informações dos pontos da vegetação. Já no espaçamento 5 x 2,40 é mais adequado utilizar o filtro 5 x 5 apenas nas idades mais jovens e, para toda a vegetação e nas idades de pré-corte, é mais indicado utilizar as informações dos pontos da vegetação acima de 10 m.

Na Figura 6 está ilustrada a detecção dos pontos para as diferentes idades em cada talhão, nas duas classes estudadas.

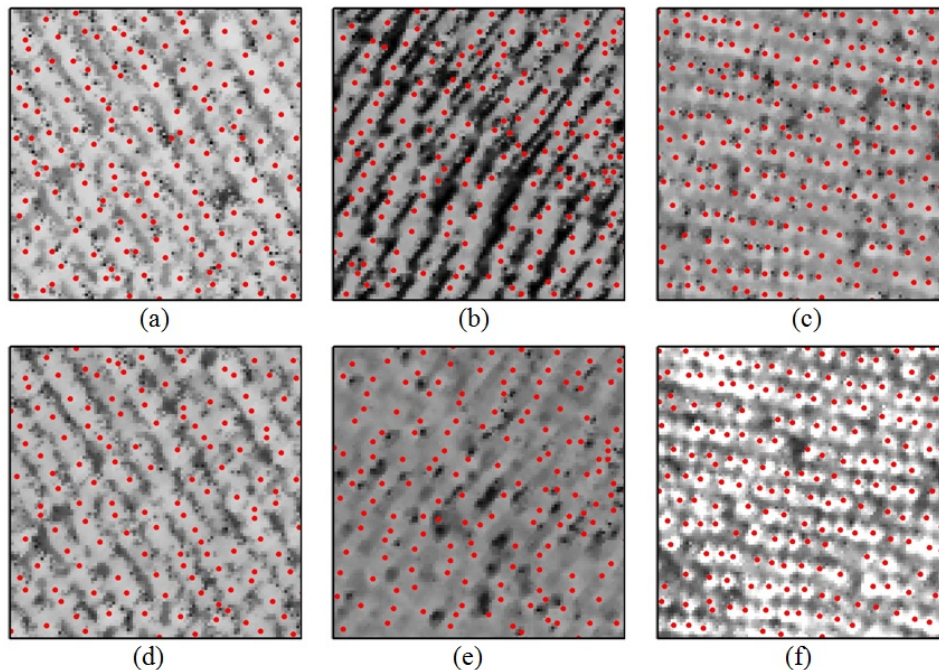


Figura 6 Resultados da contagem para os dados da classe vegetação para os talhões com: (a) 7 anos, (b) 5 anos, (c) 3 anos, e a mesma sequência para contagem usando os dados da classe de vegetação acima de 10 m (d) a (f)

Ao se comparar as informações da contagem visual com as informações do inventário florestal (Tabela 6), observou-se um erro compatível com o da metodologia proposta (Tabela 7), estando o número de árvores existente nos talhões com 3 e 7 anos dentro do intervalo confiança estabelecido pelo inventário florestal nas duas classes analisadas (Tabela 3). Todavia, observou-se uma variação na idade de 5 anos de, aproximadamente, 1,8% para menos na contagem visual, estando fora do intervalo de confiança do Inventário Florestal a 95%. Também houve a detecção, para a Classe 2, de uma maior subestimativa, o que evidencia que, para idades mais jovens no espaçamento  $5 \times 2,40$ , é melhor utilizar a Classe 1, a qual ficou mais próxima do valor real e dentro do intervalo de confiança do inventário. Este valor observado para menos, na idade de 5

anos, pode ter sido devido ao fato de árvores suprimidas não terem sido contabilizadas ou duas arvores terem sido contabilizadas como uma na Classe 2 e na contagem visual, já que neste talhão houve maior dificuldade para determinar o número de árvores, decorrente da situação do espaçamento combinado com a ação do vento.

Tabela 6 Estimativa gerada pelo inventário florestal, para a variável número de fustes nas diferentes idades dos talhões estudados

<b>Idade</b>	<b>Contagem visual</b>	<b>Inventário florestal</b>	<b>Erro (Nº árvores)</b>	<b>Erro (%)</b>
<b>3 anos</b>	17.495	18.200	-705	- 4,03
<b>5 anos</b>	23.150	24.734	-1.584	- 6,84
<b>7 anos</b>	18.090	18.986	-896	- 4,96

Tabela 7 Valores de erro percentual encontrados na avaliação da metodologia proposta e para o inventário florestal, comparado com o valor real encontrado por meio da contagem visual

<b>Idade</b>	<b>Inventário florestal</b>	<b>Erro (%)</b>	
		<b>Deteccão automática</b>	
		<b>Classe 1 (vegetação Total)</b>	<b>Classe 2 (vegetação acima de 10m)</b>
<b>3 anos</b>	- 4,03	1,15	- 1,37
<b>5 anos</b>	- 6,84	-0,79	6,31
<b>7 anos</b>	-8,63	-8,90	3,08

Quando se compara o Inventário Florestal com a metodologia proposta, observa-se que os valores nos números de fustes encontrados pelo método proposto nas idades de 3 e 5 anos (Classe 1) estão mais próximos da realidade, o que também foi observado por Oliveira et al. (2011). O mesmo autor também destaca que, quando se estratifica verticalmente a vegetação a subestimativa aumenta, o que aconteceu quando se analisou a classe de vegetação acima de 10 m (Classe 2). Todavia, quando se avalia a classe 2 para idade de 7 anos, idade em que, geralmente, pode ocorrer o pré-corte, o erro se torna inferior, o que pode

ser gerado melhores resultado utilizando esta classe, para o qual, na Classe 1, não se obteve um bom resultado quando comparado ao da Classe 2.

Cabe ressaltar que, além da informação do número de árvores obtida, existe também a informação da altura para cada árvore, outra variável de difícil obtenção em campo e que tem sua estimativa gerada por modelos hipsométricos. Além disso, podem-se aferir as áreas existentes no cadastro da empresa, já que foi verificada diferença de áreas entre o cadastro e a informação obtida pelo LIDAR (Tabela 2), e pode-se considerar esta última mais confiável.

Apesar dos bons resultados, é prudente observar que mais testes devem ser feitos utilizando-se todas as idades no mesmo espaçamento e testar outros espaçamentos para se avaliar o resultado, realizando a contagem dos indivíduos em campo, já que, para o espaçamento 5 x 2,40, notou-se uma maior dificuldade para proceder à contagem visual.

#### 4 CONCLUSÕES

A metodologia proposta para contagem de árvores utilizando um filtro 5 x 5 pode ser aplicada para as idades de 3, 5 e 7 anos, em plantios de *Eucalyptus* sp., nos espaçamentos 4 x 3 e 5 x 2,40.

Não houve diferença entre os dois estratos verticais (Classe 1 e 2) advindos das informações LIDAR interpolados com a *Inverse Distance Weighted Interpolation* (IDW) para a contagem de árvores em plantios de *Eucalyptus* sp. com espaçamento 4 x 3 m, com 3 anos de idade e no espaçamento 5 x 2,40, com 5 e 7 anos de idade.

A Classe 1 (informação dos pontos do primeiro pulso para toda a vegetação) é mais indicada para as idades de 3 e 5 anos e a Classe 2 (vegetação acima de 10 m) é mais indicada para ser utilizada na idade pré-corte (7 anos).

A metodologia proposta mostrou-se compatível com o inventário florestal com a intensidade amostral testada, para a obtenção da variável número de fustes.



## REFERÊNCIAS

- ASSIS, A. L. **Definição da estratégia amostral em plantios de Eucalyptus spp pelo uso de geoestatística.** 2005. 118 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.
- BALTSAVIAS, E. P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, Enschede, v. 54, p. 199-214, 1999.
- BURROGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems.** New York: Oxford University Press, 1998. 333 p.
- CARVALHO, L. M. T. **Mapping and monitoring forest remanants: a multi-scale analysis of spatio-temporal data.** 2001. 140 p. Thesis (Ph.D) - Wageningen University, Wageningen, 2001.
- CARVALHO, L. M. T.; Detecção de modificações na cobertura do solo. In: **Inventário Florestal de Minas Gerais: monitoramento da flora nativa 2005-2007.** Lavras: UFLA, 2008. 357 p.
- CASTRO, F. C. **Segmentação de imagens geradas por laser scanning aerotransportado para delimitação de árvores individuais em áreas de reflorestamento de eucaliptos.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- CASTRO, F. C.; CENTENO, T. M. Segmentação de imagens geradas por perfilamento a *laser* para delimitação de árvores individuais em uma área de reflorestamento de eucaliptos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., Goiânia, 2005. **Anais...** Goiânia: [s. n.], 2005. p. 737-744.
- COELHO, A. H.; VARGAS, R. M. A. Geração de modelos digitais de terreno a partir de dados de *laser scanner* aerotransportado em área de floresta usando o *software* livre GRASS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: [s. n.], 2007. p. 3653-3660.
- CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.** Campinas: UNICAMP, 1992. 170 p.

CROW, P. et al. Woodland vegetation and its implications for archaeological survey using LiDAR. **Forestry**, Cary, v. 80, n. 3, p. 241-252, 2007.

DINIZ, F. S. **Métodos de amostragem e geoestatística aplicados ao Inventário Florestal**. 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

DISPERATI, A. A. et al. Aplicação da técnica “filtragem de locais máximas” em fotografia aérea digital para a contagem de copas em reflorestamento de *Pinus elliottii*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 76, p. 45-55, dez. 2007.

DISPERATI, A. A.; OLIVEIRA FILHO, P. C. Delineamento de copas de árvores em fotografias aéreas de alta resolução, através de suas sombras periféricas: estudo de caso na floresta ombrófila mista. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 19, n. 2, p. 195-202, mar./abr. 2005.

GIONGO, M. et al. LIDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, ago./out. 2010.

HEURICH, M.; THOMA, F. Estimation of forestry stand parameters using laser scanning data in temperate, structurally rich natural European beech (*Fagus sylvatica*) and Norway spruce (*Picea abies*). **Forestry**, Cary, v. 81, n. 5, p. 645-661, 2008.

IOKI, K. et al. Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach. **Landscape Ecological Engineering**, Tokio, v. 6, p. 29-36, 2010.

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

JUPP, D. et al. Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called Echidna. **Tree Physiology**, Cary, v. 29, p. 171-181, 2009.

KANEGAE JÚNIOR, H. et al. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.* **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 123-136, abr./jun. 2006.

LAURI, K. et al. The use of airborne laser scanning to estimate sawlog volumes. **Forestry**, Cary, v. 81, n. 4, p. 499-509, 2008.

LILLESSAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 4th ed. New York: J. Wiley, 2000. 724 p.

MCCOMBS, J. W.; ROBERTS, S. D.; EVANS, D. L. Influence of fusing lidar and multispectral imagery on remotely sensed estimates of stand density and mean tree height in a managed loblolly pine plantation. **Forest Science**, Bethesda, v. 49, n. 3, p. 457–466, 2003.

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

MALTAMO, M. et al. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. **Remote Sensing of the environment**, Bethesda, v. 90, p. 319-330, 2004.

MELLO, J. M. et al. Continuidade espacial para características dendrométricas (número de fustes e volume) em plantios de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 185-194, 2009.

MIQUELES, M. A. et al. Classificação de imagens obtidas do laser scanner baseada em atributos espectrais e espaciais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 1883-1890.

NAESSET, E.; BJERKNES, K. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, Bethesda, v. 78, p. 328–340, 2001.

OLIVEIRA, A. C. **Geotecnologia na estratificação de povoamentos de *Eucalyptus spp.*** 2006. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

OLIVEIRA, L. T. et al. Aplicação do LIDAR no Inventário de Florestas Plantadas com *Eucalyptus* sp para Contagem de Árvores. **Revista Cerne**, Lavras, 2011. No prelo.

PELLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário florestal**. Curitiba: Os Autores, 1997. 316 p.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. **Computers and Electronics in Agriculture**, Toowoomba, v. 37 n. 1-3 p. 71-95, Dec. 2002.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Measuring individual tree crown diameter with LIDAR and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ontário, v. 29, n. 5, p. 564-577, 2003.

RODRIGUEZ, L. C. E. et al. Inventário florestal com tecnologia *laser* aerotransportada de plantios de *Eucalyptus spp* no Brasil. **Ambiência**, Garapuava, v. 6, p. 67- 80, 2010. Edição Especial.

SASAKI, T. et al. Estimation of leaf area index and canopy openness in broad-leaved forest using airborne laser scanner in comparison with high-resolution near-infrared digital photography. **Landscape Ecological Engineering**, Tokio, v. 4, p. 47-55, 2008.

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

SOUZA, C. S. et al. Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 409-417, out./dez. 2007.

TIEDE, D.; HOCHLEITNER, G.; BLASCHKE, T. A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. In: STILLA, U.; ROTTENSTEINER, F.; HINZ, S. (Ed.). **3D city models, road databases, and traffic monitoring: concepts, algorithms, and evaluation**. Vienna: IAPRS, 2005.

YU, X. et al. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. **Remote Sensing of the environment**, St. Paul, v. 90, p. 451-462, 2004.

WULDER, M; NIEMANN, K. O.; GOODENOUGH, D. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. **Remote Sensing of the Environment**, St. Paul, v. 73, p. 103-114, 2000.

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

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

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

## **CAPÍTULO 4 – DETERMINAÇÃO DO VOLUME EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. POR MEIO DADOS DE LIDAR**

Luciano Teixeira de Oliveira<sup>1</sup>, Maria Zélia Ferreira<sup>2</sup>, Luis Marcelo Tavares de Carvalho<sup>3</sup>, Antônio Carlos Ferraz Filho<sup>4</sup>, Thomaz Chaves de Andrade Oliveira<sup>5</sup> Eduarda Martiniano de Oliveira Silveira<sup>6</sup>

---

<sup>1</sup>Engenheiro Florestal, Doutorando em Engenharia Florestal – Departamento de Ciências Florestais/DCF – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 - 37200-000 – Lavras, MG – oliveiralt@hotmail.com

<sup>2</sup>Engenheira Florestal, Doutora em Ciências Florestais – Veracel Celulose S.A – Cx. P. 23 – 45820-970 – Eunápolis, BA – maria.zelia@veracel.com.br

<sup>3</sup>Engenheiro Florestal, Professor Doutor in Geociências e Meio Ambiente – Departamento de Ciências Florestais/DCF – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – passarinho@dcf.ufla.br

<sup>4</sup>Engenheiro Florestal, Doutorando em Engenharia Florestal – Departamento de Ciências Florestais/DCF – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 - 37200-000 – Lavras, MG – acferrazfilho@gmail.com

<sup>5</sup> Bacharel em Ciências da Computação, Doutorando em Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP – Av. James Clerk Maxwell, Cidade Universitária “Zeferino Vaz” – 3013083-868 – Campinas, SP, Brasil – thomazchaves@gmail.com

<sup>6</sup> Engenheira Florestal, Mestre em Engenharia Florestal - Geoid Laser Mapping - Cx. P. 30130-131 - Belo Horizonte, MG - dudalavras@hotmail.com

## RESUMO

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar as possibilidades de se estimar o DAP a partir dos dados de altura obtidos com o LIDAR e determinar o volume para um talhão correlacionando estas duas variáveis com o número total de árvores detectadas por meio do filtro de máxima local. A estimativa para a variável DAP mostrou-se coerente com os valores encontrados no inventário florestal, o qual tendeu a ter a altura do LIDAR subestimada obtida pelos pontos de máxima local. Já a variável número de fustes, gerada por meio do filtro de máxima local, tendeu a dar um valor próximo ao que realmente ocorria nas parcelas do inventário. A variável volume total do talhão, quando obtida por meio do LIDAR, tendeu a ser subestimada, devido ao fato de a mesma metodologia subestimar as alturas das árvores, o que também é observado quando se avalia o volume individual.

Palavras-chave: Inventário florestal. LIDAR. detecção de árvores. Filtro de local máxima. Modelos hipsométricos. Biomassa.

## **ABSTRACT**

### **DETERMINING TIMBER VOLUME OF EUCALYPTUS SP BY MEANS OF LIDAR DATA**

The present work's objective was to evaluate the possibilities of estimating DBH from stem height information derived from LIDAR dataset and conversely determining timber volume for a Eucalyptus sp stand. This was achieved by means of correlating these two variables with the total number of stems detected by a local maxima filter. The estimates for the DBH variable were coherent to the results encountered in the forest inventory, which biased toward underestimation in comparison to LIDAR derived datasets. In the other hand, the number of stems variable was found to sub estimate the variable number of individuals in a plot, which was achieved by the use of a local maximum kernel filter. This indicates that this method does not capture suppressed trees. For the variable volume, the result is also underestimated by the use of the proposed methodology. This indicates that the developed methodology captured mostly dominant trees. This was not observed when evaluating individual volume that resulted in a more coherent value when compared to those obtained via forest inventory.

Key words: Forest inventory. LIDAR. Single tree detection. Local maximum filtering kernel. Hypsometric models. Biomass.



## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento contínuo da tecnologia aeroespacial, disponibilizando imagens com características distintas, juntamente com os avanços das técnicas de extração e análise das informações provenientes dos sensores e à crescente necessidade de melhorar as estimativas dos inventários florestais, tem motivado estudos no intuito de utilizar os dados de sensoriamento remoto para auxiliar na quantificação volumétrica de povoamentos florestais.

O uso do *Light Detection and Ranging*, ou LIDAR, para a determinação precisa de elevação de terrenos, iniciou-se na segunda metade da década de 1970 (LILLESAND & KIEFER, 2000) e, desde os anos 1980, seu emprego para aplicações florestais tem avançado significativamente. À medida que as imagens de alta resolução espacial se tornam mais acessíveis, viabiliza-se a obtenção de informações das florestas relativas às árvores individuais e não mais de talhões ou povoamentos (DISPERATI et al., 2007).

Na atualidade, o LIDAR tem uma gama de aplicações em diversas áreas, tais como arqueologia (HARMON et al., 2006), planejamento costeiro, avaliação de risco de inundações, telecomunicações e redes de transmissões de energia, florestas, agricultura, petróleo, transportes, planejamento urbano e mineração, entre outras (GIONGO et al., 2010). No Brasil, esta linha de pesquisa ainda é incipiente, provavelmente devido ao custo para aquisição das informações e também por poucas empresas manusearem este equipamento em aeronaves. Mesmo assim, podem-se destacar os trabalhos de Castro & Centeno (2005), Castro (2006), Zandoná et al. (2008), Macedo (2009), Rodriguez et al. (2010), Zonete (2009) e Zonete (2010).

No mundo, vários estudos para estimar parâmetros de parcelas, contagem de árvores individuais, quantificação do estoque florestal, biomassa e para a diminuição da intensidade amostral vêm sendo desenvolvidos, podendo-

se destacar os trabalhos de Naesset & Bjercknes (2001), Popescu et al. (2002), Popescu et al. (2003), Maltamo et al. (2004), Yu, et al. (2004), Naesset (2004), Tiede et al. (2005), Crow et al. (2007), Jupp et al. (2007), Naesset (2007), Heurich & Thoma (2008), Sasaki et al. (2008), Lauri et al. (2008) e Ioki et al. (2010).

Dessa forma, o desenvolvimento de novas técnicas e a validação das já existentes para as condições florestais brasileiras são muito importantes para que o Brasil possa, com o passar do tempo, consolidar o uso desta tecnologia no setor florestal.

Fato semelhante aconteceu com os sensores orbitais, os quais tinham alto custo na década de 1990, sendo as imagens de alta resolução inviáveis economicamente para diversas linhas de pesquisa, bem como para aplicações práticas em empresas florestais. Entre todas as informações que podem ser obtidas com dados do LIDAR estão altura, densidade de plantio, diâmetro de copa, distribuição espacial das plantas, índices de heterogeneidade dos talhões, ocorrências de falhas em reboleiras e outras. Deve-se ressaltar que o volume do povoamento é a variável mais valiosa para a gestão das florestas, tanto em âmbito estratégico como no operacional.

Com exceção da variável volume, no inventário florestal, a altura das árvores é a variável dendrométrica de maior dificuldade para aquisição. A altura possui forte correlação com o volume de um talhão. Segundo postulado por Eichhorn em 1902, a variável dendrométrica altura é de grande importância para a determinação do crescimento de volume em talhões homogêneos (SKOVSGAARD & VANCLAY, 2008). Zandoná et al. (2008) utilizaram informações de altura obtida pelo LIDAR para obter, por meio de uma regressão linear, o diâmetro de copa, gerando, posteriormente, uma segunda regressão em função do diâmetro de copa e altura para extrair a variável dendrométrica diâmetro à altura do peito (DAP). Zonete et al. (2010) utilizaram os percentis 10,

30, 50, 70 e 90, para extrair variáveis biométricas e correlacioná-las com o volume, testando os modelos de Schumacher,(1939) Schumacher e Hall (1933), Clutter (1963) e Buckman (1962). A partir da informação de altura, podem-se utilizar modelos hipsométricos para estimar o DAP das árvores, os quais são utilizados tradicionalmente de forma inversa, podendo-se citar o trabalho de Ribeiro et al. (2010), que encontraram bons resultados utilizando o modelo de Curtis para a determinação da altura a partir do DAP.

Sendo assim, este trabalho foi realizado com o objetivo principal de estimar o volume para um talhão com oito anos de idade, por meio das informações de altura obtidas por meio de dados LIDAR.

Para isso, consideraram-se os seguintes objetivos específicos no desenvolvimento do trabalho:

- a) analisar os modelos tradicionais parabólico, linha reta, Curtis e Stofel para estimativa do DAP em função da altura, partindo de informações obtidas pelo inventário florestal;
- b) determinar a acurácia na estimativa do DAP, a partir das informações de alturas obtidas por meio de dados LIDAR, pelo melhor modelo ajustado com as informações do inventário florestal;
- c) determinar a acurácia da estimativa volumétrica, em talhão, usando informações geradas a partir de dados LIDAR;
- d) comparar os resultados para dois procedimentos de detecção de árvores e alturas: Classe 1 (primeiro pulsos acima de 10 m) e Classe 2 (primeiro pulso acima de 1 m), obtidos por meio de máxima locais em dados LIDAR para estimativa de DAP e volume.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo está situada no extremo sul da Bahia, entre as coordenadas 16°05'10"S; 39°25'30"O e 16°05'40"S; 39°25'00"O (Figura 1). O clima da região, segundo Köppen, é do tipo tropical equatorial, com chuvas distribuídas durante o ano inteiro e média anual de 1.200 mm. A temperatura média é de 24°C, com pequena amplitude, por se tratar de uma região costeira. A área de estudo compreende um talhão de *Eucalyptus* sp. de 23,5 ha, plantado em um espaçamento de 5 x 2,40 m e com 7 anos de idade, na época do voo.

Este talhão foi inventariado, na semana em que ocorreu o voo com o LIDAR, considerando-se com uma suficiência amostral de quatro parcelas. O número de parcelas foi definido com o objetivo de obter, no inventário, um erro inferior a 10% para a variável volume e uma superfície de análise de, pelo menos, 2.000 m<sup>2</sup>. Dessa forma, 4 parcelas circulares de 530,93 m<sup>2</sup>, com o centro georreferenciado com DGPS, foram distribuídas aleatoriamente pelo talhão, conforme os círculos em vermelho da Figura 1.

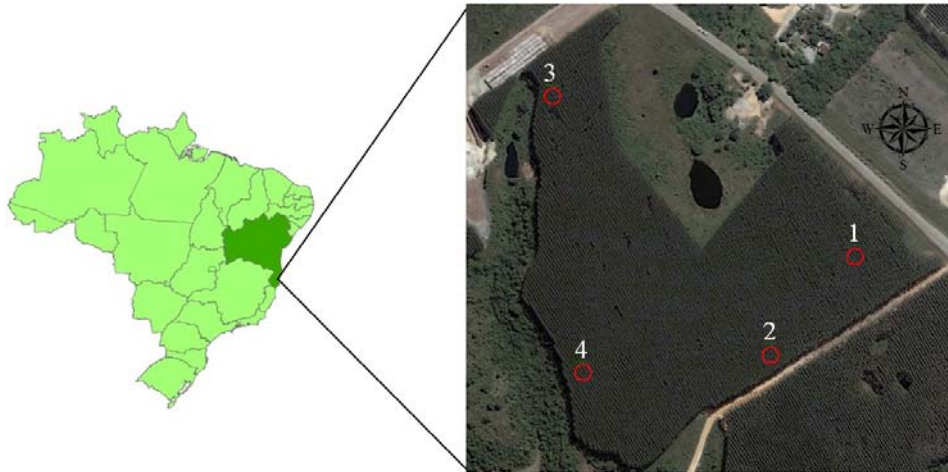


Figura 1 Localização geográfica do talhão escaneado com o LIDAR e com as parcelas circulares usadas no inventário florestal em vermelho.

Nessas parcelas foi feita a medição do DAP em todas as árvores e altura em seis árvores. Para a estimativa das alturas totais das demais árvores foi utilizada a relação hipsométrica descrita a seguir, proposta por Campos et al. (1984), ajustada para o talhão em estudo.

$$HTest = \exp \left[ \beta_0 + \frac{\beta_1}{DAP} + \beta_2 \cdot \ln(Hdom) \right] + \varepsilon,$$

em que

*HTest* - altura estimada;

*DAP* – diâmetro à altura do peito, tomado a 1,30 m do solo;

*Hdom* – altura dominante;

*Ln* - logaritmo neperiano;

$\beta_{is}$  - parâmetros estimados;

$\varepsilon$  – erro.

Já para estimativa de volume, foi utilizado o modelo proposto por Schumacher & Hall. A equação foi ajustada utilizando-se informações de árvores cubadas rigorosamente para o clone existente no talhão, na mesma idade e em diferentes classes diamétricas.

$$V_i = \beta_0 DAP^{\beta_1} HT^{\beta_2} + \varepsilon,$$

em que

$V_i$  – volume total estimado para a *i*ésima árvore;

$DAP$  – diâmetro à altura do peito, tomado a 1,30 m do solo;

$HT$  - altura total;

$\beta_{is}$  - parâmetros estimados;

$\varepsilon$  – erro.

## 2.2 Aquisição dos dados do LIDAR e pré-processamento

Os dados do LIDAR foram coletados entre os dias 5 e 9 de setembro de 2008, utilizando-se o sistema ALTM 3100 acoplado a um avião bimotor Piper Seneca II. O voo foi realizado à velocidade de 150 km/h, altura de 1.000 m, diâmetro do feixe de 20 cm, divergência do feixe de 0,3 mrad, ângulo de varredura de 15°, frequência de varredura de 58,7 Hz e intensidade de 1,5 pontos por metro quadrado. O erro planimétrico foi de 0,5 m (1,0 sigma), o altimétrico de 0,15 m (1,0 sigma) e a área de cobertura do laser foi de 0,32 m.

Os dados dos sinais do LIDAR referentes às áreas dos talhões foram organizados e balizados nas informações das coordenadas latitude, longitude, altitude (x, y, z), retornos (1°, 2° e 3° pulso) e intensidade do sinal. Todos esses fatores podem influenciar a densidade de pontos da nuvem resultante, que pode variar de 0,5 a 5 pontos por metro quadrado. A precisão do scanner do laser é da ordem de aproximadamente 15 cm (Crow et al., 2007).

Após a estruturação das informações, analisou-se a rota de voo da aeronave, a fim de separar os pontos que estavam sobrepostos, por meio do cruzamento das informações de voo e do tempo de aquisição dos pulsos gerados e armazenados do LIDAR. As informações de sobreposição não foram consideradas neste estudo, pois se observou maior concentração de ruído sobre essas áreas. Isso, provavelmente, ocorreu devido ao deslocamento do dossel por influência do vento nas diferentes passagens da aeronave (OLIVEIRA et al., 2011a e OLIVEIRA et al., 2011b).

### **2.2.1 Processamento dos dados LIDAR**

Os dados foram processados segundo a metodologia proposta por Oliveira et al. (2011b), utilizando-se, na primeira classe, todas as informações referentes ao primeiro pulso acima de 10 m de altura e, na segunda classe, apenas as informações referentes ao primeiro pulso acima de 1 m.

A altura das árvores foi obtida por meio da diferença da nuvem de pontos em modelos de terreno (MDT) e modelos de superfície (MDS). Para isso, utilizaram-se regras de lógica binária, avaliando-se as informações de pulso, altitude, angulação vertical e horizontal entre os pontos vizinhos com o desvio padrão das altitudes de cada pulso (OLIVEIRA et al., 2011a, OLIVEIRA et al., 2011b).

A altura média das árvores e a distribuição dos pulsos podem ser observadas no perfil vertical da nuvem de pontos (Figura 2).

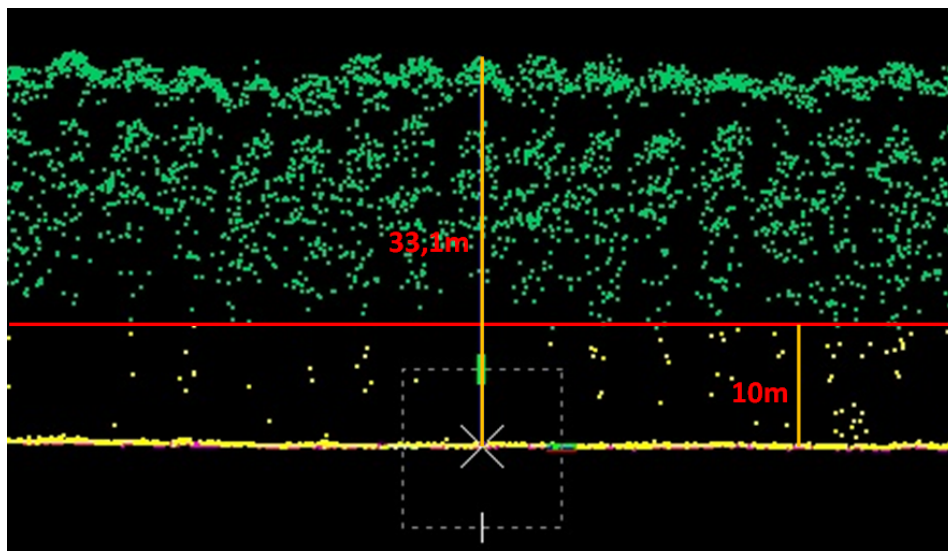


Figura 2 Perfil vertical do povoamento de *Eucalyptus* sp. na nuvem de pontos obtidas pelo LIDAR

O número de árvores e suas respectivas alturas foram obtidas pelo método proposto por Oliveira et al. (2011b).

### 2.3 Determinação do volume através da altura e do número de árvores obtidos por meio dos dados LIDAR

Na determinação do volume ajustou-se um modelo hipsométrico para estimar o diâmetro a partir das alturas das árvores obtidas pelos dados do LIDAR. Para isso foram testados quatro modelos tradicionais para relação hipsométrica tomados na sua forma inversa, assumindo as seguintes formas:

- a) modelo parabólico

$$DAP = \beta_0 + \beta_1HT + \beta_2HT^2 + \varepsilon_i$$

- b) modelo da linha reta



$$DAP = \beta_0 + \beta_1 HT + \varepsilon_i;$$

c) modelo de Stofel

$$\text{Log}(DAP) = \beta_0 + \beta_1 \text{Log}(HT) + \text{Log}(\varepsilon_i);$$

d) modelo de Curtis

$$\text{Log}(DAP) = \beta_0 + \beta_1 1/\text{Log}(HT) + \text{Log}(\varepsilon_i),$$

em que

$DAP$  = diâmetro à altura do peito (diâmetro tomado a 1,30 m do solo);

$HT$  = altura total;

$\beta_{is}$  = parâmetros a serem estimados;

$\varepsilon_i$  = erro associado ao modelo.

Todos os modelos foram ajustados com base na informação do inventário florestal, sendo utilizada a melhor equação para a estimativa do DAP nas duas classes obtidas pelos dados do LIDAR, classe 1 (primeiro pulso acima de 10 m) e classe 2 (primeiro pulso acima de 1 m), interpolados pela *Inverse Distance Weighted Interpolation* (IDW), por meio de uma janela móvel 5x5 (Oliveira et al., 2011a e Oliveira et al., 2011b).

Após a estimativa da altura, aplicou-se a equação ajustada para o modelo volumétrico de Schumacher & Hall, apresentado no item 2.1.

Os resultados encontrados foram comparados entre as duas classes obtidas por meio dos dados do LIDAR e as informações obtidas para todo o talhão por meio do inventário florestal, do registro de colheita das colhedadeiras (harvester) e do volume entregue na fábrica. Neste último caso, a madeira é pesada e sua densidade é estimada com base no princípio de Arquimedes para a obtenção do volume.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 1 e 2 apresenta-se uma síntese das informações obtidas no inventário florestal realizado no talhão na época do voo.

Tabela 1 Síntese das informações obtidas pelo inventário

Parcelas	Nº de fustes	DAP (cm) (médio)	HT (m) (médio)	HDOM. (m)	Vol. Ind. (m <sup>3</sup> ) (médio)	Vol/parcela (m <sup>3</sup> )
1	39	20,3	32,0	33,8	0,4696	18,31
2	43	19,6	30,6	34,5	0,4473	19,23
3	43	21,2	32,8	35,0	0,4549	19,55
4	47	19,0	31,3	32,5	0,3668	17,24

Tabela 2 Síntese das medidas de precisão obtidas pelo inventário, para a variável volume

Estatísticas	Estimativas	Unidades
Variância	1,08	(m <sup>3</sup> /ha) <sup>2</sup>
Desvio padrão	1,04	(m <sup>3</sup> /ha)
Erro padrão da média	0,52	(m <sup>3</sup> /ha)
Erro padrão da média	2,79	(%)
Volume médio	18,59	(m <sup>3</sup> /ha)
Coefficiente de variação	5,60	(%)
Número de amostras (n)	4,00	
Erro inventário	1,65	(m <sup>3</sup> )
Erro inventário	8,87	(%)
Intervalo confiança (limite inferior)	16,94	(m <sup>3</sup> /parcela)
Intervalo confiança (limite superior)	20,23	(m <sup>3</sup> /parcela)
Intervalo confiança (limite inferior)	318,97	(m <sup>3</sup> /ha)
Intervalo confiança (limite superior)	381,07	(m <sup>3</sup> /ha)
Intervalo confiança (limite inferior)	7.495,87	(m <sup>3</sup> /população)
Intervalo confiança (limite superior)	8.955,19	(m <sup>3</sup> /população)

Utilizando-se os dados das parcelas do inventário, procedeu-se ao ajuste dos modelos para estimar o diâmetro em função das alturas. Os resultados estão apresentados na Tabela 3

Tabela 3 Resultado para o ajuste dos modelos analisados

<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup> ajustado</b>	<b>S<sub>YX</sub>(cm)</b>	<b>S<sub>YX</sub> (%)</b>
DAP = 32,22669 -2,06826*HT+0,052255*HT <sup>2</sup>	92,5	0,98	4,9
DAP = -12,0414 + 1,003624*HT	89,7	1,15	6,0
LN(DAP) = -2,69033+1,639601*LN(HT)	92,6	1,09	5,0
LN(DAP)=112,3936-319,126*1/(LN(HT))	85,4	1,36	6,9

Pela avaliação do gráfico de dispersão (Figura 3) foi observado um melhor ajuste do modelo parabólico em relação aos demais. Para a seleção dos modelos, considerou-se a avaliação do gráfico de resíduos, do erro padrão da estimativa (% e cm) e, por último, o coeficiente de determinação R<sup>2</sup>.

É importante ressaltar que, por ser um modelo essencialmente matemático, a aplicação do modelo parabólico deve-se restringir ao intervalo de dados do qual foi ajustado.

Os valores de DAP estimados por meio da altura obtida pelo LIDAR apresentaram boa aderência com os valores obtidos no inventário florestal para as parcelas 1 e 2 (Tabela 4), As parcelas 3 e 4 tiveram seus valores de DAP médios subestimados em relação aos dados do inventário florestal. Esta subestimação na característica DAP ocorreu devido a uma subestimação da altura média pelo LIDAR. Assim, foi verificado que quando a variável altura é corretamente estimada pelos dados do LIDAR, a tendência é um bom acerto na variável DAP.

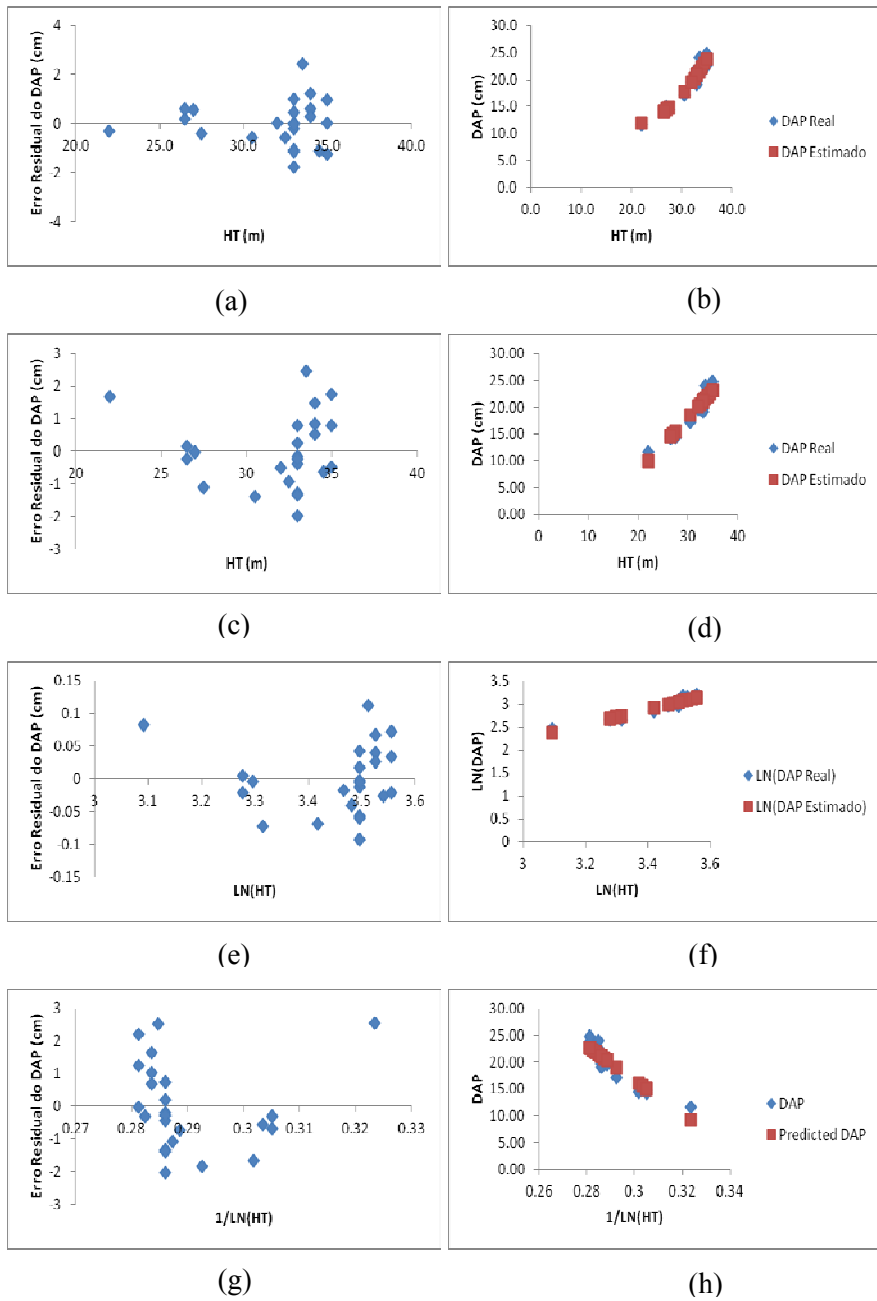


Figura 3 Gráfico de resíduo e inclinação da reta para os modelos: (a) e (b) parabólico, (c) e (d) linha reta, (e) e (f) Stofel e (g) e (h) Curtis.

Tabela 4 Valores médios de altura (LIDAR) e DAP (estimado) comparados com os valores médios de altura e DAP obtidos pelo Inventário Florestal

		Classe 1	Classe 2	<b>Inventário</b>
Parcela 1	Altura média (m)	31,94	31,81	32,50
	DAP (cm)	19,52	19,36	20,35
Parcela 2	Altura média (m)	30,79	30,70	30,58
	DAP (cm)	18,12	18,02	18,83
Parcela 3	Altura média (m)	29,88	29,89	32,83
	DAP (cm)	17,16	17,15	20,82
Parcela 4	Altura média (m)	28,03	28,03	31,33
	DAP (cm)	15,33	15,33	18,70
Valor	Altura média (m)	30,16	30,11	31,81
Médio	DAP (cm)	17,53	17,47	19,68

Após a estimativa do DAP, os dados foram submetidos ao modelo volumétrico, cujos parâmetros e medidas de precisão estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 Coeficientes e medidas de precisão do modelo volumétrico

<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup> ajustado</b>	<b>S<sub>YX</sub>(m<sup>3</sup>)</b>	<b>S<sub>YX</sub>(%)</b>
$V = 0,000041 * DAP^{1,76383} * HT^{1,165339}$	98,40	0,020851	5,3

Os dados gerados da volumetria pelos dados LIDAR para as duas classes foram comparadas com a informação obtida pelo inventário florestal, volume apontado pelas colhedadeiras (harvesters) e volume posto no pátio da fábrica (Tabela 6), em que se observou menor diferença no resultado do volume obtido pelo inventário pré-corte, inventário da época do voo e harvester, seguido pela menor variação do volume para a classe 2, obtida pelos dados LIDAR. Todos os dados volumétricos para o talhão, excetuando-se a classe 1, estavam dentro do intervalo de confiança do inventário (Tabela 2), porém, a classe 1 excedeu o limite inferior em 256,28 m<sup>3</sup>, gerando um erro de subestimativa de 14%.

Tabela 6 Valores para número de árvores e volume encontrados para os métodos

	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Valores médios	Talhão
	1	2	3	4		Valor total
Nº árvores contagem	39	43	41	46	42	18.090
Nº árvores Classe 1	41	31	45	42	40	18.337
Nº árvores Classe 2	46	32	41	47	42	19.700
Nº árvores inventário	39	43	43	47	43	18.986
Nº árvores pré-corte	-	-	-	-	-	19.308
Nº árvores Harvester	-	-	-	-	-	20.019
Vol. árv. Classe 1 (m <sup>3</sup> )	0,44	0,37	0,33	0,25	0,35	7.239,59
Vol. árv. Classe 2 (m <sup>3</sup> )	0,43	0,37	0,33	0,25	0,35	7.684,99
Vol. árv. inventário (m <sup>3</sup> )	0,47	0,45	0,45	0,36	0,43	8.225,53
Vol. Inv. pré-corte (m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	0,43	8.288
Volume Harvester (m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	-	8.593
Vol. total fábrica (m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	-	8.418

O resultado do número de árvores para o Harvester gerou um resultado um pouco mais alto quando comparado ao volume posto em fábrica. Isso pode ocorrer, pois se observa, neste equipamento, quando em operação, que tende a contar árvores mais de uma vez quando as mesmas se quebram durante esta operação, gerando um valor superior de volume com o posto no pátio da fábrica.

Todavia observa-se, na Tabela 6, que a contagem visual tendeu a subestimar o número de árvores encontradas nas parcelas do inventário florestal, indicando que, para o valor total do número de árvores, ela deve ser maior do que o indicado pela contagem visual que, provavelmente, não captou árvores suprimidas ou muito próximas.

Todavia, observou-se, na classe 2 e na classe 1, que a diferença na subestimativa para o volume proveniente do LIDAR, quando comparado ao inventário florestal, pode ter sido provocado pela subestimativa das alturas detectadas pelos pontos de máxima. Entretanto, como foi gerada uma subestimativa para a altura, o modelo gerou um volume subestimado quando comparado ao posto em fábrica, estando o volume total da classe 2 dentro do intervalo de confiança do inventário. Isso indica que a altura é uma variável

dendrométrica de grande importância para o inventário florestal, conforme exposto por Eichhom, em 1902, e citado por Skovsgaard & Vanclay (2008), a qual, se não tivesse sido subestimada pela detecção, teria um valor de volume mais próximo do real.

Este resultado sugere que a subestimativa encontrada se deve ao fato de os dados do LIDAR não estarem captando as árvores suprimidas da parcela e, conseqüentemente, no talhão na classe 1, conforme exposto por Oliveira et al. (2011b) e dos pontos de máxima também não terem captado os picos das árvores nas classes 1 e 2. Tal diferença pode indicar que, apesar de se acertar no número total das árvores do talhão, podem estar ocorrendo erros compensantes no decorrer de todo o talhão, bem como na contagem visual, a qual pode não ter captado as árvores suprimidas.

Nota-se também, na Tabela 4, que as informações do inventário florestal tenderam a ter suas alturas médias maiores que as alturas médias do LIDAR nas parcelas 3 e 4, o que pode ter ocorrido devido a um deslocamento da parcela na plotagem da mesma no talhão. Isso influenciaria um valor diferente nas informações observadas no inventário e naquelas obtidas com a contagem visual e a detecção automática, sendo o valor estimado para o DAP nos dados do LIDAR coerentes com o valor real obtido pelo inventário.

Mesmo assim, os dados indicam boa exatidão para o volume total do talhão para a classe 2, a qual teve o valor do volume dentro do intervalo de confiança do inventário florestal tradicional. Assim, o LIDAR mostra-se uma ferramenta promissora para o uso florestal, devendo ser realizados mais estudos para sua implementação, devido ao alto custo de aquisição, assim como procurar alinhar seu emprego com outras atividades dentro das atividades florestais.

#### 4 CONCLUSÕES

Com a execução deste trabalho, pode-se constatar que:

- a) pode-se obter informações de volume a partir de informações de altura para todo um talhão;
- b) que é possível gerar relações hipsométricas para estimativa do DAP a partir dos dados LIDAR, com boa precisão;
- c) o modelo parabólico foi o que gerou melhor resultado para a estimativa do DAP, a partir da altura das árvores detectadas usando dados do LIDAR;
- d) é possível obter bons resultados na determinação do volume para todo o talhão utilizando dados do LIDAR;
- e) a Classe 2 (todos os primeiros pulsos da vegetação) obtida pelo LIDAR obteve um resultado mais satisfatório que o da Classe 1 (pulsos acima de 10 m), para a quantificação do volume do talhão, não havendo diferença no volume individual.



## REFERÊNCIAS

- CAMPOS, J.C.C.; RIBEIRO, J.O.; PAULA NETO, F. **Inventário florestal nacional, reflorestamento**: Minas Gerais. Brasília: IBDF, 1984. 126p.
- CASTRO, F. C. **Segmentação de imagens geradas por laser scanning aerotransportado para delimitação de árvores individuais em áreas de reflorestamento de eucaliptos**. Curitiba: UFTPR, 2006. (Dissertação de Mestrado)
- CASTRO, F. C.; CENTENO, T. M. Segmentação de imagens geradas por perfilamento a *laser* para delimitação de árvores individuais em uma área de reflorestamento de eucaliptos. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Goiânia, 2005.
- CROW, P.; BENHAM, S.; DEVEREUX, B.J.; AMABLE, G.S. **Woodland vegetation and its implications for archaeological survey using LiDAR**. *Forestry*, Vol. 80, n. 3, (2007), doi: 10.1093/forestry/cpm018.
- DISPERATI, A. A.; SANTOS, J. R.; OLIVEIRA FILHO, P. C.; NEEFF, T. **Aplicação da técnica “filtragem de locais máximas” em fotografia aérea digital para a contagem de copas em reflorestamento de Pinus elliottii**. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 76, p. 45-55, dez. 2007.
- GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MACHETTI, M. **LiDAR: Princípios e aplicações florestais**. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 30, n63, p. 231-244, ago./out. 2010
- HARMON, J. M.; LEONE, M. P.; PRINCE, S. D.; SNYDER, M. Lidar for Archaeological Landscape Analysis: A Case Study of Two Eighteenth-Century Maryland Plantation Sites, **American Antiquity**. Vol. 71, No. 4, 649-670. 2006.
- HEURICH, M. & THOMA, F., **Estimation of Forestry stand parameters using laser scanning data in temperate, structurally rich natural European beech (*Fagus sylvatica*) and Norway spruce (*Picea abies*) forests** (2008), *Forestry*, Vol 81, No 5, 645-661.
- IOKI, K.; JUNICHI, I.; SASAKI, T.; MORIMOTO, Y.; KITADA, K. **Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach**, *Landscape Ecological Engineering* (2010) 6:29-36 DOI 10.1007/s11355-009-0077-4.

JUPP, D.; CULVENOR, D.; LOVELL, G.; NEWHAM, G.; STRAHLER, A.; WOODCOCK, C. **Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called Echidna**, Tree Physiology 29, 171-181. 2007

LAURI, K.; JUSSI, P.; JUKKA, M.; AKI, S.; MATTI, M.; PETTERI, P.; JYRKI, K. **The use of airborne laser scanning to estimate sawlog volumes**, Forestry, Vol. 81, n.4 (2008) 499-509.

LILLESSAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 4. ed. USA: John Wiley, 2000. 724 p.

MACEDO, R. C. **Estimativa volumétrica de povoamento clonal de Eucalyptus sp. através de laserscanner aerotransportado. Dissertação de mestrado**. INPE, São José dos Campos. 2009.

MALTAMO, M.; EERIKÄINEN, K.; PITKÄNEN, J.; HYYPPÄ, J.; VEHMAS, M. **Estimation of Timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions**, Remote Sensing of the environment 90 (2004) 319-330 (2004).

NAESSET, E.; BJERKNES, K.; **Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data**. Remote Sensing of Environment 78 (2001) 328 – 340.

NAESSET, E. **Practical Large-scale Forest Stand Inventory Using a Small-footprint Airborne Scanning Laser**. Scandinavian Journal of Forest Research, 2004, 19: 2, 164 - 179p.

NAESSET, E. **Airborne laser scanning as method in operational forestry inventory: Status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia**. Scandinavian Journal of Forest Research, 2007; 22: 5, 433 - 442p.

OLIVEIRA, L. T., CARVALHO, L. M. T., FERREIRA, M. Z., OLIVEIRA, T. C. A., ACERBI JUNIOR, F. W. **Aplicação do LIDAR no Inventário de Florestas Plantadas com Eucalyptus sp para Contagem de Árvores**. Revista Cerne, 2011a, no prelo.

OLIVEIRA, L. T., CARVALHO, L. M. T., FERREIRA, M. Z., OLIVEIRA, T. C. A., PIMENTEL, V. T. F. **Avaliação de diversas idades de Eucalyptus sp para contagem de árvores com dados de LIDAR**. Revista Cerne, 2011b, no prelo.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. **Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size.** *Computers and Electronics in Agriculture*, v.37 n.1-3 p. 71-95 dez. 2002.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. **Measuring individual tree crown diameter with LIDAR and assessing its influence on estimating forest volume and biomass.** *Can J. Remote Sensing*, v.29 n. 5, pp. 564 - 577, 2003.

RODRIGUEZ, L. C. E.; POLIZEL, J. L.; FERRAZ, S. F. B.; ZONETE, M. F.; FERREIRA, M. Z. **Inventário florestal com tecnologia laser aerotransportada de plantios de *Eucalyptus spp* no Brasil.** *Ambiência*. Garapuava (PR), v.6, Ed. Especial, p. 67- 80. 2010.

SASAKI, T.; IMANISHI, J.; IOKI, K.; MORIMOTO, Y.; KITADA, K. **Estimation of Leaf Area index and canopy openness in broad-leaved forest using airborne laser scanner in comparison with high-resolution near-infrared digital photography,** *Landscape Ecological Engineering* (2008) 4:47-55.

SKOVSGAARD, J. P.; VANCLAY, J. K. **Foresta site productivity: a review of the evolution of dendrometric.** *Forestry*, Vol. 81, n. 1, p. 13 – 31, 2008.

TIEDE, D.; HOCHLEITNER, G.; BLASCHKE, T. A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. **In: 3D city models, road databases, and traffic monitoring: concepts, algorithms, and evaluation.** Vienna: IAPRS, 2005.

YU, X.; Hyyppä, J.; KAARTINENE, H.; MALTAMO, M. **Automatic Detection of Harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning,** *Remote Sensing of the environment* 90 (2004) 451-462.

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

ZONETE, M. F. **Análise do uso da tecnologia laser aerotransportado para inventários florestais em plantios clonais de *Eucalyptus sp* no sul da Bahia.** Dissertação de mestrado. Dissertação de mestrado. ESALQ, Piracicaba, 2009.

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

## CAPITULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de novas tecnologias, como os sensores aeroespaciais, tem trazido muita contribuição no âmbito de monitoramento para conservação, bem como na quantificação da biomassa existente. Nesse sentido, o LIDAR aerotransportado abordado neste trabalho mostrou-se uma ferramenta muito promissora para se conhecer o estoque de madeira existente em povoamentos de plantios de *Eucalyptus* sp. no sul do estado da Bahia.

Todavia, observou-se que pesquisas com este equipamento no Brasil ainda são incipientes, por conta do custo de operacionalização dos voos com este equipamento e pelo pouco conhecimento técnico-científico sobre esta ferramenta, por parte dos profissionais da área. Porém, tal ferramenta já tem seu uso consolidado em países como Canadá, países escandinavos, Alemanha e EUA, dentre outros, os quais podem ser vistos nas citações deste trabalho alguns autores que vêm se destacando nesta linha de pesquisa fora e dentro do Brasil.

Os resultados obtidos no decorrer deste trabalho mostram quão promissora é esta ferramenta para o inventário florestal, podendo ser utilizada em pesquisas nas áreas de conservação e monitoramento dos recursos naturais, as quais têm maior carência de pesquisa.

Quanto aos resultados obtidos no trabalho, sugere-se que sejam desenvolvidas mais pesquisas na linha de detecção de copas, porém, que seja utilizada a contagem das árvores no campo para uma melhor verificação do motivo de superestimativa do inventário florestal na quantificação de fustes e analisar as situações que não podem ser observadas por contagem visual.

Outra ação importante é promover a derrubada de árvores georeferenciadas utilizando DGPS ou GPS geodésicos, para viabilizar a validação das alturas dos fustes encontradas com o LIDAR e com o inventário.

Na mensuração do inventário florestal seria interessante que fosse feita uma comparação, utilizando-se parcelas circulares e de parcelas quadradas ou retangulares, para verificar qual destes formatos é capaz de captar, com maior certeza, a localização das árvores analisadas e facilitar a análise de árvores individuais, para uma comparação das variáveis biométricas estimadas.

Em se tratando de parcelas, devem-se realizar pesquisas analisando o efeito de parcelas com tamanhos diferentes, já que toda a calibração dos dados avaliados nas parcelas será extrapolada para áreas maiores. As relações das variáveis independentes derivadas usando LIDAR com as variáveis dependentes tendem a ficar mais fortes para maiores áreas.

Deve-se avaliar várias atividades na cadeia produtiva florestal, em que se possa analisar o uso conjunto desta ferramenta, no intuito de pulverizar mais o custo de aquisição dos dados, tendo um uso ótimo e mais adequado de toda a informação que possa ser obtida com esta tecnologia.

Por fim, deve-se promover a realização de pesquisas que explorem com maior detalhamento a informação das nuvens de pontos sem sua interpolação.