



Revista Brasileira de Cartografia (2013) N^o 65/4: 717-729
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

INDIVIDUALIZAÇÃO DE ÁRVORES EM AMBIENTE FLORESTAL NATIVO UTILIZANDO MÉTODOS DE SEGMENTAÇÃO EM MODELOS DIGITAIS PRODUZIDOS A PARTIR DA TECNOLOGIA LIDAR

Individualization of Trees in Native Forest Environment using Methods of Segmentation in Digital Models produced from LIDAR Technology

**Rodrigo Pinheiro Ribas
Marcos Antônio Timbó Elmiro**

**Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Instituto de Geociências, Departamento de Cartografia**
Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus Pampulha CEP: 31270-901 – Belo Horizonte – MG, Brasil.
ribasgeo@gmail.com, mtimbo@ufmg.br

*Recebido em 27 de novembro, 2012/ Aceito em 03 de maio, 2013
Received on November 27, 2012/ Accepted on May 3, 2013*

RESUMO

O sistema de perfilamento a LASER aerotransportado, baseado na tecnologia Light Detection and Ranging (LIDAR) é uma técnica de sensoriamento remoto ativo que tem demonstrado bons resultados na mensuração da estrutura vertical e horizontal em ambientes florestais, auxiliando o entendimento dos ecossistemas florestais, produzindo informações com alta confiabilidade sobre variáveis-chaves no estudo de parâmetros biofísicos da vegetação. Contudo, a maioria dos estudos se concentra em florestas plantadas para fins comerciais ou em tipos florestais mais homogêneos, são poucos os estudos em florestas tropicais, caracterizadas pela heterogeneidade de espécies e formas. Este estudo foi realizado em uma unidade de conservação urbana formada por vegetação típica de matas semidecíduas e de cerrado. A pesquisa propõe uma metodologia para individualização de árvores em ambiente florestal nativo por meio de modelos digitais produzidos a partir da tecnologia LIDAR. Os dados utilizados foram adquiridos por meio de um sistema de perfilamento a LASER Aerotransportado modelo Leica ALS 50. Foi testado um procedimento de segmentação por crescimento de regiões em modelos digitais com os valores de altura das árvores. Foram demarcadas parcelas em campo, sendo então georreferenciadas todas as árvores dominantes contidas dentro de cada parcela. Algumas árvores, usadas como amostras de validação, tiveram suas áreas de copas mensuradas em campo, permitindo a avaliação da eficácia do procedimento de segmentação por meio de análises estatísticas de correlação e regressão.

Palavras-chave: Copa das Árvores, Perfilamento a Laser Aerotransportado, Modelo Digital de Terreno, Modelo Digital de Superfície.

ABSTRACT

The Airborne LASER profiling system based on Light Detection and Ranging (LIDAR) technology is an active remote sensing technique that has shown good results in the measurement of vertical and horizontal structure in forest environments, being able to enhance the understanding of forest ecosystems, giving information with high reliability on

key variables in the study of biophysical parameters of vegetation. However, most studies focused on plantation forests for commercial purposes or in more homogeneous forest types, there are few studies in tropical forests, characterized by heterogeneity of species and forms. This study was conducted in an urban conservation area made up of vegetation typical of semi-deciduous forests and savannah. The research proposes a methodology for the individualization of native trees in the forest environment through digital models produced from the LIDAR technology, which used data collected through a system of airborne laser profiling model Leica ALS 50. It was tested a procedure for segmentation by region growth approach over tree height digital models. Plots were established in the field, and then all dominant trees contained within each plot were georeferenced. Some trees had their crown area measured in the field, thus permitting the evaluation of the segmentation procedure by means of statistical analysis of correlation and regression.

Keywords: Crown Trees, Airborne Laserscanner, Digital Terrain Model, Digital Surface Model.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação dimensional da estrutura vertical e horizontal de dosséis florestais constitui um fator chave para o estudo do funcionamento dos ecossistemas terrestres, sendo a representação do dossel nas três dimensões do espaço, diretamente relacionada com os fluxos de energia e matéria entre a vegetação, o solo e a atmosfera. Importantes processos fisiológicos da vegetação como a fotossíntese e a evapotrans-piração são influenciados por parâmetros biofísicos da floresta. A quantificação estrutural do dossel permite a avaliação da biomassa acima do solo e também do estoque de carbono acima do solo presente na floresta. O sequestro de carbono pela vegetação, na qual as plantas capturam o carbono da atmosfera, estocando-o em forma de biomassa viva é um tema que vem sendo muito debatido desde as tentativas de se implementar as estratégias de sequestro de carbono através do uso da terra, mudança do uso da terra e das atividades de silvicultura estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto (CHANG, 2004).

A mensuração de florestas atende a necessidade de quantificação dos recursos florestais para fins comerciais, de preservação, gestão e pesquisas. Diversas variáveis dendrométricas podem ser medidas ou estimadas, servindo de ponto de partida para derivações de importantes informações sobre as características intrínsecas a determinada cobertura vegetal. A Dendrometria por métodos tradicionais de campo apesar de na maioria das vezes serem mais fidedignos, demandam muito tempo e recursos financeiros ou simplesmente não podem ser realizadas, devido à dificuldade de acesso aos locais de interesse. Nestes aspectos as técnicas de sensoriamento remoto proporcionam um

ganho considerável e têm cada vez mais se desenvolvido no sentido de obter melhores respostas sobre a estrutura da vegetação. Uma técnica de sensoriamento remoto que tem apresentado um progresso promissor na estimativa de variáveis dendrométricas florestais é o sistema Airborne Laser Scanner (ALS), baseado na tecnologia LIDAR. Os equipamentos que utilizam o sistema LIDAR são capazes de criar um grande conjunto de pontos com informação das coordenadas X, Y e Z e com grande acurácia. O processamento da nuvem de pontos gerada com a utilização de algoritmos otimizados é capaz de modelar a superfície do terreno tridimensionalmente (DALMOLIN, 2004). Aplicando-se um procedimento de filtragem nos dados LIDAR, dentre os diversos existentes na literatura (VOSELMAN, 2000; WACK e WIMMER, 2002; SITHOLE e VOSELMAN, 2003) produtos como o Modelo Digital de Terreno (MDT) e o Modelo Digital de Superfície (MDS) são derivados, representando o terreno (sem nenhuma cobertura) e a superfície (edifícios, árvores, etc.). A partir destes dados estudos florestais são viabilizados, observando-se que serão disponibilizados dados do topo das árvores e do terreno logo abaixo da cobertura vegetal. O objetivo principal deste trabalho é testar uma metodologia para segmentação de árvores individuais em ambiente florestal nativo usando modelos digitais criados a partir do sistema ALS, baseado na tecnologia LIDAR. Para se alcançar esse objetivo foi gerado um Modelo Digital de Altura das Árvores (MDAA) a partir dos dados LIDAR originais e desenvolvido um algoritmo para delimitação da copa de árvores individuais por meio da aplicação de procedimentos de segmentação de imagens.

2. TECNOLOGIA LIDAR NA ÁREA FLORESTAL

A mensuração da vegetação por meio de sensoriamento remoto pode ser dividida em duas categorias: (1) modelos preditivos baseados na radiância dos alvos, levando em consideração as características de reflectância da folhagem das árvores nas bandas do visível, infravermelho e microondas e (2) técnicas de reconstrução em três dimensões tais como LIDAR, Interferometric Synthetic Aperture Radar (INSAR) ou Estéreo-Fotogrametria, direcionadas para a quantificação da estrutura vertical de dosséis (ST-ONGE et al., 2008). A técnica de avaliação quantitativa de parâmetros florestais baseada na tecnologia LIDAR, tem importante aplicação na área florestal, principalmente por sua capacidade de prover informação de altura de dosséis florestais e de árvores individuais. A capacidade de mensurar diretamente a altura e derivar outras medidas a partir desta é uma grande vantagem em relação a outras formas de sensoriamento remoto.

De acordo com Hyyppa e Inkinen (1999) os primeiros estudos utilizando a tecnologia LIDAR em investigações florestais ocorreram na década de 80, concentrando-se na utilização do sistema perfilador para obtenção de informações da estrutura vertical de florestas. Em um dos primeiros estudos realizados com o sistema perfilador na mensuração florestal, Nelson et al. (1984) efetuaram medidas em área de floresta caducifólia, onde um pulso laser era emitido a cada 25 centímetros criando um perfil com a altura das árvores.

No início da década de 90, com a substituição dos perfiladores pelos sistemas do tipo scanner, estudos mais complexos sobre os ecossistemas florestais começaram a ser desenvolvidos com dados LIDAR. Estes sistemas se caracterizavam por serem de pequeno ponto projetado com uma frequência de pulso muito alta, usualmente gravando o primeiro ou o último retorno ou ambos os retornos do pulso laser (HOLMGREN, 2003). Atualmente os equipamentos incorporam a tecnologia multipulso, gravando até quatro retornos do pulso laser. Os equipamentos de pequeno ponto projetado, normalmente são desenvolvidos para fins comerciais (BALTSAVIAS, 1999). A densa malha de pontos por metro quadrado criada pelo equipamento habilita a percepção de características relativamente pequenas nos locais varridos. Dubayah

e Drake (2000) observaram fatores que limitam a capacidade de sensores de pequeno ponto projetado na obtenção de medidas florestais, entretanto, diversos estudos utilizando esses sistemas para mensuração de variáveis dendrométricas têm obtido sucesso (NILSSON, 1996; NÆSSET, 1997; MAGNUSSEN et al., 1999; HYYPPA e PYYSSALO, 1999; POPESCU et al., 2003; CLARK et al., 2004; WANG e GLENN, 2008). As aplicações bem sucedidas reforçam sua potencialidade para estudos florestais com foco em árvores individuais ou em parcelas com grupo de árvores (NÆSSET, 2002).

Mais recentemente foram desenvolvidos os sistemas de grande ponto projetado que são equipamentos que gravam toda a sequência da onda de energia refletiva de um ponto projetado em um perfil de altura e intensidade (MEANS et al., 1999). Vários destes equipamentos foram desenvolvidos em plataformas aerotransportadas para estudo da topografia terrestre e da cobertura vegetal, incluindo a estimativa da altura da vegetação no planeta (Holmgren, 2003). Em destaque, na área florestal, podem ser citados o Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery (SLICER) (HARDING et al., 2001) e o Laser Vegetation Imaging Sensor (LVIS) (BLAIR et al., 1999) instalados em plataformas aerotransportadas e com ponto projetado de 10 e 25 metros, respectivamente. Esses equipamentos foram algumas das plataformas de teste para missões com a tecnologia LIDAR em plataformas aeroespaciais chamados de Airborne Laser Altimetry (CARABAJAL et al., 1999). A missão aeroespacial Ice Cloud and Land Elevation Satellite (ICESat) utilizando a tecnologia LIDAR foi capaz de prover informações a nível global, tendo como um dos principais objetivos a mensuração de dosséis florestais (LEFSKY et al., 2005). Outra missão importante foi a Vegetation Canopy Lidar (VCL) da NASA realizada com o objetivo de caracterizar a estrutura tridimensional da Terra, em particular a estrutura vertical e horizontal dos dosséis florestais e a topografia da superfície terrestre, utilizando o altímetro MBLA (DUBAYAH et al., 1997).

2.1 Estimativa de variáveis dendrométricas

Em uma floresta podem ser realizadas medidas de forma direta ou indireta, sendo que as medidas diretas se referem a uma determinação da

realidade, como por exemplo, a medida de circunferência, já as medidas indiretas se referem a uma medição aproximada, uma estimativa através de técnicas específicas, tendo como exemplo o volume. A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto se caracteriza como uma forma indireta de mensuração da vegetação. A altura e área de copa (ACopa) são variáveis dendrométricas, relacionadas à estrutura vertical e horizontal de uma floresta, respectivamente, que podem ser derivadas a partir de dados LIDAR e são principalmente utilizadas em pesquisas de quantificação de volume, biomassa acima do solo e estoque de carbono florestal. Drake et al (2002) utilizando como variável independente a altura em estudo para avaliar a sensibilidade de um sistema LIDAR de grande ponto projetado LVIS na estimativa de biomassa acima do solo numa área de floresta tropical, obteve como resultado um alto coeficiente de correlação ($R^2 = 0.94$) entre as medidas de campo e do LIDAR. Bortolot e Wynne (2005) conduziram uma pesquisa para estimativa de biomassa florestal acima do solo a partir de um sistema LIDAR de pequeno ponto projetado, baseando-se numa abordagem direcionada a medição de árvores individuais. Eles utilizaram uma regressão linear múltipla para encontrar uma equação de previsão da biomassa utilizando a contagem das árvores na parcela e a altura derivada dos dados LIDAR, obtendo resultados satisfatórios.

2.1.1 Estimativa de altura

A altura é uma importante característica da árvore, obtida por medição ou estimativa. Wang e Glenn (2008) dividem os métodos para estimativa de altura total de dosséis florestais baseados na tecnologia LIDAR em duas categorias: (1) métodos diretos, que extraem a altura do dossel mensurando a diferença vertical entre o sinal de retorno do solo e o sinal do topo das árvores e os (2) métodos indiretos, que estimam a altura do dossel a partir do estabelecimento de modelos estatísticos que ilustram a relação entre a altura do dossel e as variáveis preditoras derivadas dos dados LIDAR.

Após processada a nuvem de pontos LIDAR e obtidos o MDT e o MDS, ao se considerar apenas a máxima elevação contida no MDS de uma área de floresta, esta informação será correspondente ao topo do dossel, podendo ser chamada de Modelo Digital das Copas (MDC). O método direto

de estimativa de altura das árvores consiste na criação de um MDAA gerado a partir da diferença entre o MDC e o MDT ($MDAA = MDC - MDT$). Este método permite a detecção de altura de conjuntos florestais e também de árvores individuais. Embora tenha a capacidade de estimar a altura das árvores com elevada acurácia muitos estudos demonstram que o método direto tem a tendência de subestimar a altura das árvores. Buscando determinar a altura de árvores em uma floresta boreal na Noruega, utilizando o método direto de determinação, Næsset (1997) comprovou uma subestimação da altura obtida com o LIDAR de pequeno ponto projetado em relação à verdade de campo da ordem de 4,1 a 5,5 metros e o desvio padrão entre a média da altura do LIDAR e do campo foi de 1,1 a 1,6 metros. Também utilizando um sistema de pequeno ponto projetado e o método direto de determinação de altura das árvores, Clark et al. (2004) observaram uma subestimação da altura das árvores na estação biológica La Selva na Costa Rica, predizendo a altura do sub-dossel com acurácia de 2,29 metros e para a altura individual de árvores um erro médio absoluto de 8%.

O uso do método indireto, com aplicação de modelos estatísticos, resulta numa forte relação entre a altura das árvores derivada dos dados LIDAR e as medidas de campo (WANG e GLENN, 2008). Em estudo realizado na Noruega Næsset e Okland (2002), desenvolveram uma abordagem para estimar a altura de parcelas de pinheiros da região usando estimadores de quantis, testando sete variáveis preditoras. A regressão da verdade de campo em contrapartida com os valores derivados do LIDAR foi capaz de explicar 75% da variabilidade. A validação do estudo revelou uma acurácia de 1,49 metros (7,6%) na média de altura das parcelas florestais, reforçando que o método pode ser utilizado para estimativa de altura das árvores. Andersen et al., (2005) desenvolveram um método de regressão múltipla utilizando cinco variáveis preditoras baseadas nos dados LIDAR para estimar a altura de árvores, obtendo coeficiente de correlação R^2 de 0.98, sugerindo consistência do método na obtenção dessa estimativa

2.1.2 Estimativa de propriedades das copas arbóreas

A copa de uma árvore é responsável pelo processo de fotossíntese, transformando a energia

do Sol em energia química, sendo a mensuração de características da copa, variáveis diretamente relacionadas com o crescimento e a produção de uma árvore (Tonini, 2005). A mensuração das copas das árvores com uma acurácia adequada se torna um parâmetro importante em estudos da dinâmica do fogo (TACHAJAPONG et al., 2006), da fisiologia das plantas (MAGUIRE, 1989) e da análise de habitat (XIAO et al., 2003). Entretanto, a mensuração da copa de uma árvore é bastante complexa de ser realizada em campo, sendo de grande utilidade o uso de técnicas alternativas para a sua estimativa.

Uma aplicação que pode ser implementada por sistemas LIDAR de pequeno ponto projetado é a detecção de árvores individuais e a delimitação de suas copas a partir de estudos em parcelas florestais. Algumas abordagens têm sido propostas com essa finalidade. Basicamente, os algoritmos utilizados partem do pressuposto que todo local de máxima altura em um MDAA representa o topo da copa de uma árvore e, levando-se em consideração a densa nuvem de pontos gerada por equipamentos LIDAR de pequeno ponto projetado, é grande a chance de existirem pontos pertencentes ao topo da árvore. Magnussen et al. (1999) afirmam que são necessários de seis a dez pulsos laser atingindo a copa, para que seja possível detectar árvores individuais.

De acordo com Hyyppä e Inkinen (1999) dois diferentes métodos podem ser utilizados para detectar árvores e delinear suas copas: (1) o método manual, onde os pontos visualizados no topo do MDS são delimitados ao redor da copa de cada árvore, a partir de uma interpretação visual da geometria da copa no modelo e (2) o método automático, que consiste na utilização de técnicas de processamento de imagens.

Hyyppä et al. (2001), estudando uma floresta boreal no sul da Finlândia, realizaram medidas de altura de árvores e diâmetro de copa com um sistema LIDAR com o objetivo de estimar o volume da floresta. O algoritmo utilizado consistiu numa filtragem pelos locais de máxima altura no modelo. Encontrados estes locais eles são referidos como o topo de uma árvore avulsa, sendo rotulados como pontos semente. Para delimitar as copas de cada árvore identificadas e mensurar o seu diâmetro foi feita a aplicação de um filtro passa-baixa por convolução com janela de 3x3 seguida de um

processo de segmentação por crescimento de regiões, buscando individualizar e delinear cada copa. A precisão relatada foi superior às respostas obtidas em inventários florestais. Em estudo similar Persson et al. (2002) estimou a altura e diâmetro de copa em árvores detectadas individualmente com erro médio quadrático (RMSE) de 0,63 e 0,61 metros, respectivamente.

Tiede et al. (2005) apresentam uma metodologia para extrair e delinear árvores individuais utilizando a nuvem de pontos georeferenciada como dado de entrada para o algoritmo de individualização e delineamento das copas. Neste estudo, as árvores dominantes nas parcelas testadas foram detectadas com 72,2 % de acurácia. A literatura apresenta vários outros estudos tratando da individualização e delineamento de copas arbóreas em diferentes biomas ou sob condições diversas (POPESCU et al., 2003; MALTAMO et al., 2004; ROBERTS, 2005; CHEN, 2006; POPESCU e ZHAO, 2008; HIRATA, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Estação Ecológica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), campus da Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. A estação é uma unidade de conservação urbana cujas coordenadas da sede, no sistema UTM fuso 23, datum SAD 69 são: 607612 E e 7802154 N. Sua área engloba cento e quatorze hectares, formada por vegetação típica de matas semidecíduas e de cerrado. As parcelas deste



Fig.1 - Detalhe da área de estudo com a situação das parcelas.

estudo foram demarcadas em uma área de predominância de mata semidecídua. A Figura 1 apresenta um detalhe da área de estudo com a situação das parcelas.

3.1 Dados de campo

Os dados de campo foram adquiridos entre os meses de julho e novembro de 2010, sendo alocadas três parcelas retangulares com dimensões de 50 por 30 metros. Para o georreferenciamento das parcelas foram utilizados receptores do sistema GPS marca ASHTECH modelo PROMARK2 de frequência simples na portadora L1, operando em modo de posicionamento relativo estático, com intervalo de registro de observações de 15 segundos e tempo de coleta de observações de aproximadamente uma hora em cada ponto. Os receptores GPS foram instalados em locais com clareiras ou com maior espaço entre as árvores buscando obter uma melhor recepção do sinal e uma boa qualidade dos dados para o processamento das posições geográficas. Para o pós processamento diferencial das posições foi utilizada a base de dados da estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) localizada em Belo Horizonte.

A partir dos pontos GPS as posições geográficas das árvores dominantes dentro das parcelas foram determinadas por métodos topográficos de precisão utilizando estações totais e outros instrumentos de levantamentos topográficos. Foram obtidas as posições geográficas de 71 árvores na parcela 1, 51 árvores na parcela 2 e 54 árvores na parcela 3. As posições geográficas de cada árvore foram obtidas na projeção UTM, fuso 23, datum SAD 69.

Devido à impossibilidade de se mensurar a totalidade das copas arbóreas, tendo em vista sua difícil obtenção em campo, foram mensuradas somente as áreas das copas mais espaçadas entre si, permitindo sua medição com precisão, evitando problemas de fusão de galhos entre árvores vizinhas. A mensuração da área seguiu o método apresentado por O'Brien et al. (1995), que se caracteriza pela medição da distância horizontal a partir do tronco da árvore até a extremidade da projeção vertical da copa no solo em oito direções geográficas espaçadas de 45 graus, iniciando na direção Norte. Assim, a área da copa é definida como sua projeção num plano horizontal embaixo da árvore e calculada

como um círculo de raio igual à média dos oito raios medidos. Foram mensuradas 10 árvores para cada parcela (amostras de validação) extraindo-se oito raios para cada uma delas nas oito direções geográficas definidas. A partir do raio médio da copa de cada árvore a área circular de sua copa foi calculada pelo produto do raio ao quadrado pela constante $PI=3,1416$ ($A=\delta r^2$).

3.2 Dados LIDAR

Os dados LIDAR foram adquiridos com um sistema Leica ALS-50, voando a uma altura de 1688,1 m, operando na frequência de 43 Hz, com ângulo de 20 graus e coletando dados a uma densidade de 0,99 pontos por metros quadrados.

Os dados LIDAR são processados em duas etapas. Na primeira fase, chamada de pré-processamento dos dados brutos, as observações do GPS da estação base e da aeronave inicialmente são processadas de forma individual e posteriormente concatenadas de modo a se obter uma solução cinemática única e ajustada a um sistema de coordenadas conhecido, para isto foi utilizado o módulo de processamento GPS do programa GRAFNAV. A solução GPS obtida foi combinada com os dados do sistema inercial no programa IPAS de modo a gerar a melhor trajetória suavizada, iniciando-se então o processamento para obtenção da nuvem de pontos com as coordenadas UTM e altitude (X,Y,Z) para cada um dos pontos criados pelo LIDAR. Para esta finalidade utilizou-se o programa ALS40 Post Processor, que aplica parâmetros de calibração do equipamento, dados relativos ao tipo de terreno e cobertura vegetal, temperatura e pressão atmosférica e configurações do scanner (ângulo de varredura, frequência de varredura e taxa de repetição) visando à obtenção de pontos com precisão compatível com o levantamento GPS e em um sistema de coordenadas conhecido.

A segunda etapa da fase de processamento é a fase de processamento dos dados LIDAR na qual se realiza a classificação dos pontos para a geração do MDT. A nuvem de pontos georreferenciados criada pela tecnologia LIDAR forma o MDS e a partir da filtragem desta nuvem de pontos é possível a criação do MDT. A nuvem de pontos gerada pelo sistema ALS disponibilizada para este estudo foi filtrada utilizando o software TERRASCAN. Segundo Soininen (1999) o TERRASCAN é um

software desenvolvido pela Terrasolid Limited, dedicado a processamento de pontos com coordenadas tridimensionais gerados por sistemas de laserscanner, que pode lidar com milhões de pontos em diversas rotinas otimizadas para um bom desempenho. O TERRASCAN é um aplicativo componente do MICROSTATION, ambiente Computer-aided Design (CAD), capaz de ler pontos em arquivos de texto do tipo XYZ e arquivos binários. O programa possui a ferramenta (classify – routine – ground) que realiza uma filtragem automática na nuvem de pontos laser gerados pelo LIDAR. De acordo com Temba (2008) o princípio que norteia o funcionamento da ferramenta é o da declividade (inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal), sendo que ao considerar a nuvem de pontos altimétrica medida pelo sensor laser, a ferramenta (classify – routine – ground) filtra os pontos ao traçar um plano tangente à superfície terrestre a partir de um ponto P. Segundo Loch et al. (2004) o processo de filtragem se desenvolve em duas etapas: (1) A ferramenta pesquisa os pontos com cotas mais baixas e constrói uma grade do tipo Triangular Irregular Network (TIN). Na maioria das vezes os triângulos deste modelo inicial, têm os lados mais baixos que a superfície terrestre, com poucos vértices tocando o terreno e essas irregularidades são removidas pelo programa, na próxima fase (2) o programa inicia a modelagem da superfície do terreno, adicionando mais pontos ao modelo tornando-o cada vez mais próximo do formato real do terreno. Os pontos que são adicionados no modelo são definidos por parâmetros de iteração, a saber: ângulos e distâncias. Esses parâmetros determinam quão próximos os pontos devem estar do plano de um triângulo para que possam ser aceitos no modelo construído.

3.3 Segmentação das árvores

A segmentação é um processo onde a imagem é particionada em regiões que devem corresponder às áreas de interesse da aplicação. Na literatura são abordadas várias classes de algoritmos de segmentação, Tilton e Lawrence (2000) relatam que o método de segmentação por crescimento de regiões é um dos preferidos em diferentes aplicações por considerar a característica espacial dos dados e garantir a formação de segmentos fechados. Segundo Espindola (2006) o sistema SPRING incorpora um algoritmo de segmentação de imagens

baseado na técnica de crescimento de regiões, com alguns aperfeiçoamentos que resolvem parcialmente o problema da dependência na ordem de agrupamento das regiões. São implementações que propõem um agrupamento de regiões baseado no conceito de região vizinha mais similar. A cada iteração do algoritmo o par mais semelhante de regiões espacialmente adjacentes é agrupado.

Em linhas gerais o algoritmo obedece à lógica a seguir:

Seja T o limiar de similaridade; M_i o vetor de média da região R_i ; $dist(R_i, R_j) = [M_i - M_j]$ a distância Euclidiana entre as regiões R_i e R_j ; e $N(R_i)$ o conjunto de regiões vizinhas da região R_i . Duas regiões vizinhas R_i e R_j serão agrupadas se satisfizerem as seguintes condições:

- (1) Condição de Similaridade: $dist(R_i, R_j) \leq T$;
- (2) Condição de Vizinhaça 1: $R_j \in N(R_i)$ e $dist(R_j, R_i) \leq (R_k, R_i), R_k \in N(R_i)$;
- (3) Condição de Vizinhaça 2: $R_i \in N(R_j)$ e $dist(R_i, R_j) \leq dist(R_k, R_j), R_k \in N(R_j)$;

De acordo com a condição (1), a distância Euclidiana entre as regiões R_i e R_j deverá ser menor que o limiar de similaridade T. As condições (2) e (3) garantem que, dados os conjuntos $N(R_i)$ e $N(R_j)$ de regiões vizinhas, as regiões R_i e R_j são mutuamente as mais similares destes conjuntos. Uma região menor que o limiar de área se agrupa com a região vizinha mais similar. Os resultados deste processo de segmentação são sensíveis à escolha dos limiares de área, sendo este o valor de área mínima para que uma região seja individualizada e de similaridade, valor abaixo do qual duas regiões são consideradas similares. Baixos limiares tendem a produzir resultados com grande número de regiões fragmentadas e em contrapartida, altos valores forçam a união de regiões distintas, gerando regiões mais aglutinadas (Espindola, 2006).

Após a obtenção dos MDAA referentes às três parcelas, foram aplicados sobre estes modelos os algoritmos para a segmentação de cada árvore individual utilizando o suporte do software SPRING. O primeiro passo do método consistiu na filtragem por convolução com uma máscara 3x3, utilizando um filtro passa-baixa, de média ponderada..

No passo seguinte foi aplicado um procedimento de segmentação por crescimento de regiões nos MDAA suavizados visando à separação da copa de cada árvore em unidades homogêneas. O algoritmo de crescimento de regiões efetua o

processamento com base nos limiares de similaridade e de área. O parâmetro de similaridade controla o particionamento da imagem em regiões similares de acordo com critérios estabelecidos, neste caso um teste de hipótese estatístico que testa a media dos níveis de cinza (alturas do dossel) entre as regiões do MDAA. A similaridade corresponde ao valor da distância euclidiana mínima entre as médias das regiões. Se as regiões são consideradas similares, elas são agrupadas. O limiar de área é o valor de área mínima para que uma região seja individualizada, ou seja, o número mínimo de pixels necessários para agrupar uma região da imagem. Na segmentação por crescimento de regiões, pixels vizinhos e com características semelhantes são agrupados. Inicialmente um pixel semente pertencente à região a ser segmentada será fornecido e a partir deste se iniciará o processo de agrupamento.

Neste estudo foram testados diferentes valores para os limiares de similaridade e área, buscando o melhor resultado na delimitação dos segmentos referentes à copa de uma árvore individualizada. Para similaridade iniciou-se com valor 1 e efetuou-se um incremento de 1 nível digital até atingir o valor 7. Para o limiar de área partiu-se do valor 200, realizando um incremento de 50 pixels para os testes seguintes até se atingir o valor 500. Foram testadas 49 combinações as quais foram avaliadas por meio de fotointerpretação usando fotografias aéreas de alta resolução das parcelas confrontando com os resultados da segmentação de cada par de combinações de limiar no MDAA.

3.4 Extração da ACopa e análise da segmentação

Os segmentos gerados no processo de segmentação foram exportados para o Sistema ArcGis na forma de polígonos fechados e extraída a ACopa das árvores utilizando a ferramenta disponível no software. O cálculo de área foi efetuado para as árvores que tiveram sua mensuração em campo a fim de formar um banco de dados com os valores de ACopa extraídos a partir da segmentação. Para a avaliação da eficácia do processo de segmentação foram realizadas análises estatísticas de correlação e regressão linear entre as copas arbóreas mensuradas em campo (amostras de validação) e as geradas pelo procedimento de

segmentação no MDAA das parcelas. O foco é determinar o grau de relacionamento entre as variáveis ACopa extraídas em campo e as obtidas por meio da tecnologia LIDAR. A análise de correlação indica o grau de relacionamento entre variáveis. Quanto mais próximo de 1 é a correlação mais forte é a relação entre as variáveis. A análise de regressão por sua vez é uma extensão da análise de correlação, porém enquanto a análise de correlação permite concluir a força da relação entre as 2 variáveis (magnitude e direção), a regressão soluciona a questão de quanto a variável y será modificada em função de uma mudança na variável x , estabelecendo relações entre variáveis dependentes e independentes.

Neste estudo foi verificada a existência de dependência entre as variáveis ACopa_CAMPO e ACopa_LIDAR por meio da aplicação de uma regressão linear simples, utilizando ACopa_CAMPO como variável independente e ACopa_LIDAR como variável dependente.

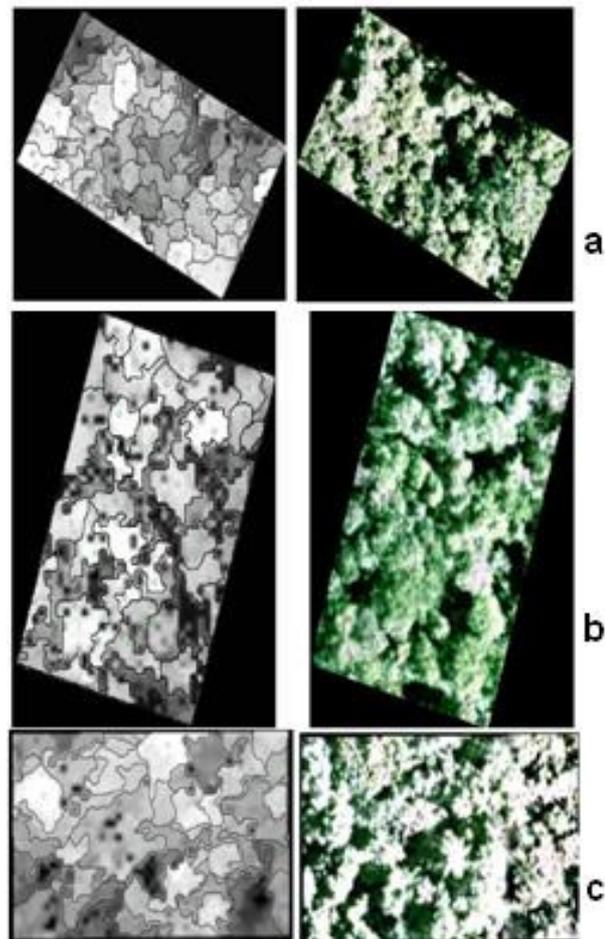


Fig.2 - Segmentação e fotografia aérea de referência. a) Parcela 1, b) Parcela 2, c) Parcela 3

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Modelos digitais e realce das imagens

Na primeira etapa do processo de individualização das árvores foram criados os modelos digitais: MDT, MDC e MDAA, para cada parcela analisada. Na geração desses modelos os pontos georreferenciados obtidos por meio da tecnologia LIDAR foram interpolados pelo método de convolução cúbica, que apresentou o melhor resultado na distinção do formato das copas das árvores individuais. Neste método o valor do pixel foi estimado com base nos 16 pixels vizinhos, apresentando o melhor aspecto visual e mantendo as formas mais próximas da realidade representada pelos dados de validação. A aplicação de um filtro de suavização sobre o MDAA melhorou o realce da imagem, fundindo os pequenos componentes de copa de cada árvore permitindo a otimização do processo de segmentação na separação de indivíduos arbóreos.

4.2 Segmentação da copa das árvores

Os limiares que proporcionaram melhores resultados na segmentação permitindo a maior aproximação dos dados de referência obtidos pela fotointerpretação foram os valores de 5 para o parâmetro de similaridade e 450 para o parâmetro área na parcela 1 (Figura 2a). Na parcela 2 os melhores valores de limiares foram 7 e 400 para similaridade e área, respectivamente (Figura 2b). Por fim, para a parcela 3 os melhores valores desses parâmetros foram 7 e 500 (Figura 2c).

4.3. Análise estatística da segmentação

Foi observada uma correlação positiva entre as variáveis nas três parcelas analisadas, indicando que os relacionamentos entre ACopa_LIDAR e ACopa_CAMPO nas três parcelas foram fortes e positivos, conforme resultados apresentados pelos valores de coeficiente de correlação linear de Pearson (R): 0,95; 0,94 e 0,99 para as parcelas 1, 2 e 3, respectivamente.

Na análise de regressão linear simples realizada, o limite de confiança estabelecido foi de 95%. Observando-se o coeficiente de determinação (R^2) na análise da variância da Parcela 1, nota-se que 91% da variância na medida de ACopa_LIDAR pode ser explicada pela variância na medida de

ACopa_CAMPO. Para as Parcelas 2 e 3 foram encontrados os valores de 87% e 97%, respectivamente, da variância na medida de ACopa_LIDAR que podem ser explicados pela variância na medida de ACopa_CAMPO.

O erro padrão, que corresponde ao desvio padrão da distribuição amostral da média, fornece uma medida do grau com que as médias amostrais se desviam da média das médias amostrais. O erro padrão estimado nas parcelas em estudo forneceu uma medida de quão correta foi a estimativa, sendo o erro padrão de 3,06m para a parcela 1, de 2,60m para a parcela 2 e 2,71m para a parcela 3. O valor estima a variância de ACopa_LIDAR, para cada valor de ACopa_CAMPO.

Na análise de regressão linear, foram obtidas as retas de melhor aderência e a equação de regressão para cada uma das três parcelas analisadas, mostrando o quanto a variável dependente ACopa_LIDAR varia em relação a variável independente ACopa_CAMPO.

A reta de melhor aderência, ajustada por mínimos quadrados, traçada no gráfico de

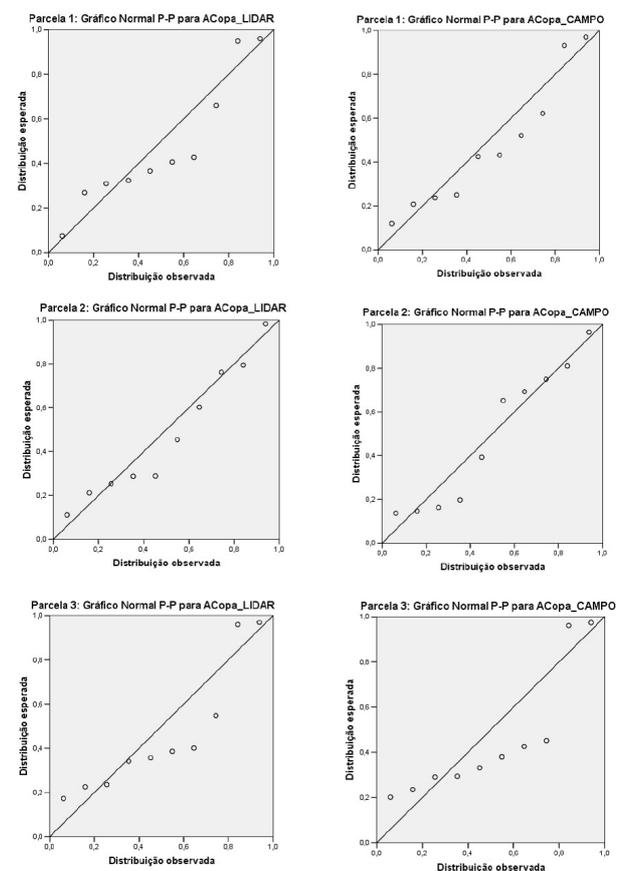


Fig.3 - Gráfico Normal P-P das parcelas analisadas mostrando a normalidade da distribuição dos dados.

dispersão referente à parcela 1, fornece a melhor previsão possível de quanto a ACopa_LIDAR se altera em relação a variável ACopa_CAMPO. A partir da Equação 1 de regressão obtida para a parcela 1, observa-se que a cada 1 m² de aumento na área de ACopa_CAMPO, ocorre um aumento de 1,10 m² na ACopa_LIDAR, existindo assim uma tendência de superestimação do tamanho de ACopa. Existe, portanto, com os limites estabelecidos 95% de confiança de que a inclinação da população se encontra entre 0,82 e 1,39.

$$ACopa_LIDAR = 1,10 * ACopa_CAMPO + 6,11$$

(1)

A partir da Equação 2 de regressão obtida para a parcela 2, observa-se que a cada 1 m² de aumento na área de ACopa_CAMPO, ocorre um aumento de 1,06 m² na ACopa_LIDAR, existindo assim uma tendência de superestimação do tamanho de ACopa. Com os limites estabelecidos, há 95% de confiança de que a inclinação da população se encontra entre 0,73 e 1,39.

$$ACopa_LIDAR = 1,06 * ACopa_CAMPO + 7,03$$

(2)

A partir da Equação 3 de regressão obtida para a parcela 3, observa-se que a cada 1 m² de aumento na área de ACopa_CAMPO, ocorre um aumento de 1,04 m² na ACopa_LIDAR, existindo assim uma tendência de superestimação do tamanho de ACopa. Existe 95% de confiança de que a inclinação da população se encontra entre 0,89 e 1,19.

$$ACopa_LIDAR = 1,04 * ACopa_CAMPO + 5,31$$

(3)

Para se testar o pressuposto de normalidade da distribuição dos dados considerada nas análises estatísticas foi utilizado um gráfico de probabilidade normal (Normal P-P) (Figura 3). O gráfico representa a probabilidade acumulada que seria de se esperar se a distribuição fosse normal, em função da probabilidade observada acumulada dos erros. O que evidencia a normalidade dos dados segundo este teste é a tendência dos pontos se concentrarem em torno da reta que passa na origem, indicando assim que a distribuição dos erros é normal. Observando-se os gráficos referentes às parcelas

estudadas, apresentados na Figura 3, assume-se que os dados apresentam distribuição normal.

5. CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi analisar a capacidade de medição de área de copa de árvores em ambiente florestal nativo a partir de dados provenientes de um sistema ALS, baseado na tecnologia LIDAR, utilizando um método de segmentação de imagens por crescimento de regiões. A possibilidade de interpolação da densa nuvem de pontos gerada pelo sistema LIDAR permitindo a criação de superfícies de grades regulares de pixels ampliam o leque aplicação deste tipo de dado de sensoriamento remoto, principalmente pela sua característica de prover informação de alturas em diferentes extratos potencializando, particularmente, o estudo da vegetação. A interpolação dos pontos pelo método de convolução cúbica destacou-se na obtenção dos bons resultados alcançados, permitindo conservar as formas das copas mais próximas das amostras de validação, tendo em vista que outros métodos de interpolação avaliados não apresentaram formas adequadas das copas arbóreas.

O critério de análise de limiares dos parâmetros de similaridade e de área baseado na chave de fotointerpretação apresentou-se como alternativa eficiente para a avaliação inicial dos segmentos formados no MDAA, contribuindo para os bons resultados obtidos posteriormente na análise quantitativa da segmentação. Esta forma de avaliação vem reforçar as grandes perspectivas de integração de dados LIDAR com informações provenientes de fotografias aéreas.

Os resultados do trabalho mostram que é possível a medição de área da copa de árvores individuais com precisão adequada, conforme indicação fornecida pelos altos coeficientes de correlação e de determinação entre as variáveis ACopa_LIDAR e ACopa_CAMPO. Esses coeficientes mostraram alta correspondência entre as medidas de campo e as medidas extraídas por meio da tecnologia LIDAR, indicando que o método testado apresentou capacidade adequada para segmentação das copas das árvores. Foi observado também que as medidas de área de copa extraídas a partir dos dados LIDAR nesta investigação

apresentaram ligeira tendência na superestimação do tamanho da copa das árvores, estando de acordo com outros resultados da literatura.

Deve ser destacado que o filtro aplicado para a suavização do MDAA pode produzir efeitos adversos, tais como fundir árvores diferentes ou dividir uma única árvore em diversas outras, comprometendo a individualização buscada pelo algoritmo de segmentação. Isso vai depender do grau de suavização do filtro que deve ser escolhido com critério. A aplicação do filtro utilizado neste estudo se mostrou necessária e na medida adequada para a resolução e extensão geográfica das imagens trabalhadas. Em outras situações com parâmetros diferentes, devem ser testados diferentes filtros para atingir os melhores resultados.

Os resultados se mostraram muito promissores, no entanto para conclusões mais sólidas, devem ser realizados novos estudos utilizando conjuntos maiores de amostras. A área de copa é uma variável dendrométrica que pode ser utilizada em modelos para estimativa de biomassa e estoque de carbono florestal, porém por ser de difícil mensuração em campo é uma variável pouco incluída nestes modelos. Assim, a mensuração indireta por meio da tecnologia LIDAR apresenta grande potencial de aplicabilidade em pesquisas desta natureza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSEN, H.E.; MC GAUGHEY, R.J.; REUTEBUCH, S.E. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 4, p. 441-449, 2005.
- BALTSAVIAS, E.P. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, p. 164–198, 1999.
- BLAIR, J.B.; RABINE, D.L.; HOFTON, M.A. The laser vegetation imaging sensor (LVIS): A medium-altitude, digitations-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, p. 115–122, 1999.
- BORTOLOTT, Z.; WYNNE, R. Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: An individual tree-based approach that incorporates training data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 59 p. 342-360, 2005.
- CARABAJAL, C.C.; HARDING, D.L.; LUTHCKE, S.B.; FONG, W.; ROWTON, S.C.; FRAWLEY, J.J. Processing of Shuttle Laser Altimeter range and return pulse data in support of SLA-02. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 32 (3W14), p. 65-72, 1999.
- CHANG, M.Y. **Seqüestro florestal de carbono no Brasil – dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas**. Curitiba: UFPR, 2004, 293p.
- CLARK, M. L.; CLARK, D. B.; ROBERTS, D. A. Small-footprint LiDAR estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, p. 68-89. 2004.
- CHEN, Q. Isolating Individual Trees in a Savanna Woodland Using Small Footprint Lidar Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 8, p. 923–932, 2006.
- DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laserscanner: Conceitos e Princípios de Funcionamento**. Curitiba: Editora do Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas – UFPR. 2004.
- DRAKE, J.B.; DUBAYAH, R.O.; KNOX, R.G.; CLARK, D.B.; BLAIR, J.B. Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 378–392, 2002.
- DUBAYAH, R.O.; DRAKE, J.B. LiDAR remote sensing for forestry. **Journal of Forestry**, v. 98 (6), p. 44–46, 2000.
- DUBAYAH, R.; BLAIR, J.B.; BUFTON, J.L.; CLARK, D.B.; JAJA, J.; KNOX, R.; LUTHCKE, S.B.; PRINCE, S.; WEISHAMPEL, J. **The vegetation canopy lidar mission**. in Proceedings of Land Satellite Information in the Next Decade, II: Sources and Applications. Bethesda (MD): American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, p. 100- 112, 1997.
- ESPINDOLA, G. M. **Ajuste de parâmetros em algoritmos de segmentação de imagens por crescimento de regiões**. São José dos Campos: INPE, 2006. 64p. (INPE-14659-TDI/1215)

- HARDING, D.J.; LEFSKY, M.A.; PARKER, G.G.; BLAIR, J.B. LIDAR altimeter measurements of canopy structure: Methods and validation for closed canopy, broadleaf forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, p. 283–297, 2001.
- HIRATA, Y. Airborne laser scanning in forest management: Individual tree identification and laser pulse penetration in a stand with different levels of thinning. **Forest Ecology and Management**, v.258, p.752-760, 2009.
- HOLMGREN, J. **Estimation of forest variables using airborne laser scanning**. Tese Phd, Acta Universitatis. Agriculturæ Sueciæ, Silvestria, 278.Umeå, Suécia, 2003.
- HYYPPA, J.; INKINEN, M. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. **The Photogrammetric Journal of Finland**, v. 16, p. 27-42. 1999.
- HYYPPA, J.; KELLE, O.; LEHIKONEN, M.; INKINEN, M. A segmentation- based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 5, p. 969-975, 2001.
- LEFSKY, M. A.; HARDING, D. J.; KELLER, M.; COHEN, W. B.; CARABAJAL, C. C.; DEL BOM ESPIRITO-SANTO, F.; HUNTER, M. O.; DE OLIVEIRA JR, R. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat, **Geophys. Res. Lett.**, v.32, p. 35-46, 2005.
- LOCH, R.E.N.; SCHÄFER, A.G.; VARGAS, R.M.A. **Filragem e classificação de pontos laser scanner utilizando o software Terrascan**. In: Geodésia Online. Anais, Florianópolis, 2004.
- MAGNUSSEN, S.; EGGERMONT, P.; LARICIA, V.N. Recovering tree heights from airborne laser scanner data. **Forest Science**, v. 45, p. 407– 422, 1999.
- MAGUIRE, D. A., HANN, D.W.. The relationship between gross crown dimensions and sapwood area at crown base in Douglas-fir. **Canadian Journal of Forest Research**, v.19, p. 557"565, 1989.
- MALTAMO, M.; MUSTONEN, K.; HYYPPA, J.; PITKANEN, J.; YU, X. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, p. 1791–1801, 2004.
- MEANS, J.E.; ACKER, S.A.; HARDING, D.J.; BLAIR, J.B.; LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; HARMON, M.E.; MCKEE, W.A. Use of large-footprint scanning airborne LiDAR to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon. **Remote Sensing of Environment**, v. 67, n.3, p. 298–308, 1999.
- NÆSSET, E. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 52, p. 49– 56, 1997.
- NAESSET, E.; ØKLAND, T. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. **Remote Sensing of Environment**, v.79, p.105–115, 2002.
- NELSON, R.; KRABILL, W. B.; MACLEAN, G. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. **Remote Sensing of Environment**, v.15, p. 201-212, 1984.
- NILSSON, M. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. **Remote Sensing of Environment**, v.56, p. 1-7, 1996.
- O' BRIEN, S.T. Diameter, Height, crown and age relationship in eight Neotropical tree species. **Ecology**, v.76, n.6, p.1926-1939, 1995.
- PERSSON, A.; HOLMGREN, J.; SÖERMAN, U. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.68, n.9, p. 925"932, 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**, v.29, p.564"577, 2003.
- POPESCU, S. C.; ZHAO, K. A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 767-781, 2008.
- ROBERTS, D. Estimating individual tree leaf area in loblolly pine plantations using LiDAR-derived measurements of height and crown dimensions. **Forest Ecology and Management**, v. 213, p. 54-70, 2005.

- SITHOLE, G.; VOSSelman, G. Comparison of Filter Algorithms. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n.3, p. 71-78, 2003.
- ST-ONGE, B.; HU, Y.; VEGA, C. Mapping the height and above-ground biomass of a mixed forest using LIDAR and stereo Ikonos images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n.5, p. 1277-1294, 2008.
- SOININEN, A. Terrascan for microstation, user's guide. Helsinki: Terrasolid. 1999
- TACHAJAPONG, W.; ZHOU, X.; MAHALINGAM, S.; WEISE, D. Experimental and numerical modeling of crown fire initiation. **Forest Ecology and Management**, v.234, n.97, p. 97-115, 2006.
- TEMBA, P.C. Ajustamento Simultâneo do Bloco de Faixas do Laser Scanner Aerotransportado (ALS). Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2008.
- TIEDE, D.; HOCHLEITNER, G; BLASCHKE, T. A Full GIS-BASED Workflow for Tree identification and Tree Crown Delineation Using Laser Scanning. Stilla U, Rottensteiner F, Hinz S. CMRT05. IAPRS, v.XXXVI (3/W24), Vienna, Austria, 2005.
- TILTON, J. C.; LAWRENCE, W. **Interactive analysis of hierarchical image segmentation**. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, (IGARSS'00), Honolulu, United States, 2000. Proceeding. Honolulu, 2000.
- TONINI, H; ARCO-VERDE, M.C. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.40, n.7, p.633-638, 2005.
- Vosselman, G. Slope based filtering of laser altimetry data. In **Proceedings of IAPRS** (Amsterdam, The Netherlands) ,XXXIII, Part B3, p.935-942, 2000.
- XIAO, Y.; JOKELA, E.J.; WHITE, T.L. Species differences in crown structure and growth performance of juvenile loblolly and slash pine. **Forest Ecology and Management**, v.174, n.51, p. 295-313, 2003.
- WACK, R. E WIMMER A. Digital Terrain Models from Airborne Laser Scanner Data – A grid Approach. **International Archives of Photogrammetry Remote Sensing**. v. 34, Part B3, p. 293-296, 2002.
- WANG, C.; GLENN, N.F. A linear regression method for tree canopy height estimation using airborne LIDAR data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 2, p. 217 – 227, 2008.