

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

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

Rodrigo Pinheiro Ribas

Belo Horizonte
2011

Rodrigo Pinheiro Ribas

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação EM Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Timbó
Elmiro

Belo Horizonte

2011

Banca examinadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. Marcos Antônio Timbó Elmiro

Prof. Dr. Plínio da Costa Temba

Prof. Dr. Sérgio Donizete Faria

“A Geografia é um campo cuja matéria inclui a maior complexidade de fenômenos e ao mesmo tempo, preocupa-se, mais do que a maior parte dos outros, com estudos de casos individuais, dos inumeráveis lugares do mundo e do caso ímpar do próprio mundo.”

Richard Hartshorne

À minha amada, especial e linda filha Laila,
dedico.

Agradecimentos

Aos meus pais pelo suporte durante esta caminhada e pelo incentivo para o resto do percurso.

À minha noiva Cristiane e filha Laila pelo amor, paciência e companheirismo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Antônio Timbó Elmiro pelas sabias palavras que tanto me esclareceram nesta jornada.

Aos colegas, professores e funcionários do IGC pelas conversas e ensinamentos tão importantes no cotidiano.

Ao colega de pós-graduação e amigo Paulinho pela ajuda no trabalho de campo.

À Estação Ecológica da UFMG pelo suporte nas investigações de campo.

À Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (PRODABEL), pelos dados cedidos para a pesquisa, em especial ao funcionário Leandro.

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 chave 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, sendo utilizados dados 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 tiveram suas áreas de copas mensuradas em campo, permitindo assim a avaliação da eficácia do procedimento de segmentação por meio de análises estatísticas de correlação e regressão.

INDIVIDUALIZED OF TREES IN NATIVE FOREST ENVIRONMENT USING METHODS OF SEGMENTATION IN DIGITAL MODELS PRODUCED FROM LIDAR TECHNOLOGY

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 a conservation area made up of urban 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.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xiii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	15
1.1 Contexto em que se insere a pesquisa.....	15
1.2 Objetivos	17
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 A tecnologia LIDAR	19
2.1.1 Sistema Laser Scanner.....	21
2.1.2 Sistema de Posicionamento Global Diferencial	22
2.1.3 Sistema de Navegação Inercial.....	22
2.2 A tecnologia LIDAR na área florestal.....	23
2.2.1 A tecnologia LIDAR na estimativa de variáveis dendrométricas.....	26
2.3 Segmentação de imagens	31
2.3.1 Algoritmo baseado em crescimento de regiões	32
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 Área de estudo	36
3.2 Coleta e processamento dos dados	37
3.2.1 Dados de campo.....	37
3.2.2 Dados LIDAR.....	41
3.2.3 Geração dos modelos digitais	44
3.3 Segmentação das árvores	45
3.4 Extração da ACopa do LIDAR.....	48
3.5 Análise da segmentação.....	50
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 Modelos digitais	51
4.2 Realce das imagens	53

4.3 Segmentação da copa das árvores.....	54
4.4 Análise estatística da segmentação	56
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema ALS baseado na tecnologia LIDAR.....	21
Figura 2- Atitude da aeronave.....	23
Figura 3 - Detecção e delimitação de copas.....	29
Figura 4 - Pulsos LASER que refletem na copa de uma árvore.....	29
Figura 5 - Fluxograma detalhando a metodologia.....	35
Figura 6 - Área de estudo	36
Figura 7 - Comprimento do eixo Y	38
Figura 8 - Medição do eixo X	38
Figura 9 - Árvores georreferenciadas na parcela 1.....	38
Figura 10 - Árvores georreferenciadas na parcela 2.....	39
Figura 11 - Árvores georreferenciadas na parcela 3.....	39
Figura 12 - Filtro passa-baixa.....	45
Figura 13 - Segmentação por crescimento de regiões.....	46
Figura 14 - Combinação de limiares de similaridade e área	47
Figura 15 - Polígonos formados pela segmentação.....	48
Figura 16 - MDT, MDC e MDAA referentes a parcela 1	51
Figura 17 - MDT, MDC e MDAA referentes a parcela 2	52
Figura 18 - MDT, MDC e MDAA referentes a parcela 3	52
Figura 19 - Visualização 3D do MDAA	53
Figura 20 - Filtro de suavização.....	54
Figura 21 - Segmentação e referência da parcela 1	55
Figura 22 - Segmentação e referência da parcela 2.....	55
Figura 23 - Segmentação e referência da parcela 3.....	56

Figura 24 - Retas de regressão da parcela 1.....	58
Figura 25 - Retas de regressão da parcela 2.....	59
Figura 26 - Retas de regressão da parcela 3.....	60
Figura 27 - Gráfico Normal P-P das parcelas analisadas	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados para ACopa mensuradas em campo	41
Tabela 2 - Parâmetros de aquisição dos dados LIDAR	42
Tabela 3 - ACopa extraídas por meio da tecnologia LIDAR.....	49
Tabela 4 - Coeficientes de correlação	56
Tabela 5 - Erro padrão	57

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Acopa.....	Área de copa
ALA.....	<i>Airborne Laser Altimetry</i>
ALS.....	<i>Airborne Laser Scanner</i>
CAD.....	<i>Computer-Aided Design</i>
CO ₂	Gás Carbônico
COP ^{'s}	Conferências das Partes
DIAL.....	<i>Differential Absorption LIDAR</i>
dGPS.....	<i>Differential Global Positioning System</i>
EA.....	Escola de Arquitetura
ECMVS.....	Ecologia Conservação e Manejo da Vida Silvestre
GEE.....	Gases do Efeito Estufa
GLAS.....	<i>Geoscience Laser Altimeter System</i>
IBGE.....	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICB.....	Instituto de Ciências Biológicas
ICESat.....	<i>Ice, Cloud and Land Elevation Satellite</i>
IGC.....	Instituto de Geociências
IMU.....	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INSAR.....	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
LADAR.....	<i>Laser Detection And Ranging</i>
LASER.....	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LIDAR.....	<i>Light Detection and Ranging</i>
LULUCF.....	<i>Land Use, Land Use Change and Forestry</i>
LVIS.....	<i>Laser Vegetation Imaging Sensor</i>
MBLA.....	<i>Multi-Beam Laser Altimeter</i>
MDAA.....	Modelo Digital de Altura das Árvores
MDC.....	Modelo Digital das Copas
MDS.....	Modelo Digital de Superfície
MDT.....	Modelo Digital de Terreno
NASA.....	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>

Nd: YAG.....	<i>Neodimium: Ytrium Aluminum Garnet</i>
INS.....	<i>Inertial Measurement Unit</i>
ONU.....	Organização das Nações Unidas
PMBH.....	Prefeitura Municipal de Belo Horizonte
PRODABEL.....	Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte
R.....	Correlação linear de Pearson
R ²	Coefficiente de determinação
REDD.....	<i>Reducing Emissions from Deforestation and Degradation</i>
RMSE.....	Erro Médio Quadrático
SLA.....	<i>Shuttle Laser Altimeter</i>
SLICER.....	<i>Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery</i>
TIN.....	Triangular Irregular Network
UFMG.....	Universidade Federal de Minas Gerais
UNCED.....	Conferência da ONU sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
VCL.....	<i>Vegetation Canopy Lidar</i>

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Contexto em que se insere a pesquisa

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 evapotranspiração são influenciados por parâmetros biofísicos da floresta, os quais são descritos a partir das peculiaridades estruturais do dossel florestal de determinada região.

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 e estudos abordando a quantificação destas variáveis têm sido muito valorizados, levando-se em consideração que o gás carbônico (CO₂), um dos principais Gases do Efeito Estufa (GEE) vem, a partir da revolução industrial, aumentando sua concentração na atmosfera a níveis preocupantes. Desde o estabelecimento da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas durante a conferência da Organização das Nações Unidas (ONU) sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED) em 1992 no Rio de Janeiro, conhecida também como Eco 92 (DIAS, 2006), muitas discussões sobre o aquecimento global e as formas de mitigar o problema vem ocorrendo periodicamente nas Conferências das Partes (COP^{ss}). O seqüestro 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 debatido desde a COP^{ss} 3, onde se deu o início as tentativas de se implementar as atividades de *Land Use, Land Use Change and Forestry* (LULUCF). Tais atividades são estratégias de seqüestro de carbono através do uso da terra, mudança do uso da terra e das atividades de silvicultura, estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto (CHANG, 2004). Conhecidas como sumidouros, são motivo de muita polêmica nas

negociações, debatendo-se sobre argumentos em favor, que ressaltam suas vantagens, e outros contra, que apontam para suas limitações.

Após grandes impasses nas COP⁷s sediadas em Haia e Bonn, no ano de 2001 na COP⁷s 7 em Marrakesh ficou estabelecido um acordo para limitar os créditos do sequestro de carbono apenas as ações de florestamento e reflorestamento, ficando estabelecido que não valeriam créditos de carbono a simples presença do estoque, pois assim daria margem à reivindicação de crédito pelo crescimento natural das árvores devido ao efeito natural de fertilização por CO₂. A partir da COP¹¹s 11, ocorrida em Montreal no ano de 2005, iniciaram-se discussões sobre a Redução de Emissões Provenientes de Desflorestamento e Degradação, em inglês *Reducing Emissions from Deforestation and Degradation* (REDD), idealizada com o intuito de incentivar a preservação de florestas, compensando financeiramente os proprietários de matas naturais que se compromissarem a proteger as áreas, ajudando a traçar caminhos mais sólidos de preservação das florestas e conseqüente combate ao aquecimento global, trazendo importantes ponderações sobre o período pós- Protocolo de Kyoto.

A Dendrometria representa uma vertente de estudos da ciência florestal responsável pela mensuração da árvore, individualmente ou de um povoamento. Dendrometria, Dendro = árvore e Metria = medição, é uma palavra de origem grega, que tem como sinônimos usualmente empregados a Dasometria, Silvimensuração, Medição Florestal, Mensuração Florestal e Silvimetria (SILVA e PAULA NETO, 1979). 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 tem 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 (VOSSSELMAN, 2000; WACK e WIMMER, 2002; SITHOLE e VOSSSELMAN, 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.) e a partir destes dados estudos florestais são viabilizados, observando-se que serão disponibilizados dados do topo das árvores e do terreno logo abaixo das mesmas.

1.2 Objetivos

O sistema ALS baseado na tecnologia LIDAR representa um avanço na área de modelagem de terreno e de superfície surgido relativamente há pouco tempo se comparando a outras técnicas de sensoriamento remoto. Essa técnica tem experimentado um grande crescimento de suas aplicações em diversos ramos que utilizam subprodutos gerados a partir do MDT e MDS e utilizando estas características deste sistema, o objetivo principal desta pesquisa é testar uma metodologia para segmentação de árvores individuais em ambiente florestal nativo em modelos digitais criados a partir do sistema ALS, baseado na tecnologia LIDAR. Para se alcançar esse objetivo, tem-se como objetivos específicos da pesquisa os seguintes:

- geração de um Modelo Digital de Altura das Árvores (MDAA) a partir dos dados LIDAR;

- validação de um algoritmo para delimitação da copa de árvores individuais em ambiente florestal nativo através da aplicação de procedimentos de segmentação de imagens.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O problema discutido nesta pesquisa é a aplicação de métodos de processamento digital de imagens, mas especificamente a técnica de segmentação de imagens em modelos digitais gerados a partir da tecnologia LIDAR. Neste contexto a revisão de literatura abordará alguns conceitos básicos do funcionamento dessa tecnologia, uma vez que o objetivo da pesquisa não é aprofundar na discussão sobre as características de aquisição de dados do sistema, ficando a recomendação que para o aprofundamento no assunto os interessados efetuem uma pesquisa diretamente nos textos citados como referência nesta dissertação.

2.1 A tecnologia LIDAR

A tecnologia LIDAR se desenvolveu rapidamente no início da década de 1970, especialmente na América do Norte, com experimentos realizados para aplicações em batimetria e hidrografia. O sistema era operado em modo *profile* ou perfil, obtendo um perfil do terreno, extraindo informações sobre as características verticais das estruturas. A partir deste sistema, no início da década de 1990, começou a ser desenvolvido o equipamento do tipo *scanner* para suprir necessidades na área da geotecnia (HOLMGREN, 2003). Definida por alguns autores com a nomenclatura LIDAR e por outros como *Laser Detection And Ranging* (LADAR) (WEHR e LOHR, 1999), ela representa uma tecnologia de sensoriamento remoto ativo capaz de coletar dados tridimensionais da superfície do terreno e da superfície, sendo capaz de gerar respectivamente o MDT e o MDS.

Existem três tipos básicos de LIDAR:

- *Range finders*
- DIAL

- *Doppler* LIDAR

O LIDAR Range finder, o mais simples dos três tipos, é um telêmetro que dispara um feixe de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER) é utilizado para medir a distância entre o alvo e o instrumento, em função do tempo percorrido. O LIDAR *Differential Absorption LIDAR* (DIAL) é utilizado para mensurar concentrações químicas na atmosfera, ele utiliza dois diferentes comprimentos de onda do laser, selecionando um comprimento de onda que será absorvido pela molécula de interesse e o outro não, assim pela diferença entre os dois retornos pode-se deduzir a concentração da molécula investigada. O LIDAR *Doppler* calcula a velocidade baseado na reflectância da energia da luz. O LIDAR *range finder* é o tipo utilizado nesta pesquisa.

Duas das principais características que distinguem os instrumentos LIDAR são a largura do feixe de LASER disparado e a maneira como a intensidade do retorno é gravado. Existem duas categorias em que se dividem os equipamentos com a largura do feixe laser diferenciadas: (1) pequeno ponto projetado (*small footprint*) com o diâmetro do raio laser normalmente inferior a um metro e (2) grande ponto projetado (*large footprint*) com diâmetro superior a cinco metros (BORTOLOTTI e WYNNE, 2005). Com relação à maneira como o retorno do laser é gravado, existem dois sistemas considerados: (1) retorno discreto (*discret return*) para os equipamentos de pequeno ponto projetado e (2) ondas contínuas (*continuous wave*) para os de grande ponto projetado (WEHR e LOHR, 1999).

Os equipamentos com tecnologia LIDAR podem ser estáticos ou dinâmicos (DALMOLIN, 2004). Os sistemas dinâmicos são instalados em plataformas aerotransportadas, geralmente pequenos aviões ou helicópteros, sendo por este motivo citados na literatura como sistema ALS e foi a partir deste sistema que se obteve os dados para esta pesquisa. São sistemas constituídos por três componentes principais, sendo eles o *LASER Scanner*, o *Differential Global Positioning System* (dGPS) e o

Inertial Navigation System (INS) que fazem uma varredura na superfície conforme ilustrado na Figura 1.

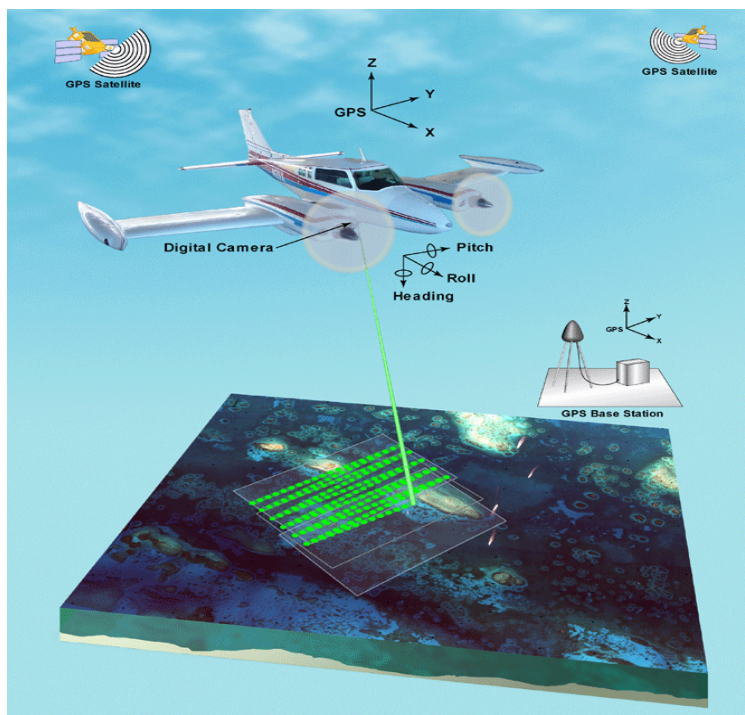


Figura 1 - Sistema ALS baseado na tecnologia LIDAR

FONTE: USGS (2010)

2.1.1 Sistema Laser Scanner

O seu funcionamento se baseia em um pulso de LASER, ou seja, Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação gerado a partir do estímulo do cristal *Neodimium: Ytrium Aluminum Garnet* (Nd: YAG) que tipicamente emite luz no infravermelho e quando disparado em direção a superfície da terra, bate no alvo e volta para o equipamento. Por meio do tempo decorrido durante a emissão e a captura do pulso, realiza-se o cálculo da distância entre a superfície atingida pelo laser e o sensor, determinando uma posição na superfície e também a intensidade, no comprimento de onda do infravermelho, para o pulso refletido.

A emissão de pulsos LASER em intervalos regulares realizada pelo LIDAR é direcionada para a superfície terrestre por um conjunto óptico de lentes e espelhos com varredura geralmente perpendicular à trajetória da aeronave que sustenta o equipamento. Segundo Brandalize (2004) todo scanner emprega um método de varredura, resultando cada qual em um padrão de varredura característico, sendo este, a forma como se encontram distribuídos os pontos adquiridos sobre a faixa do terreno amostrada.

2.1.2 Sistema de Posicionamento Global Diferencial

O dGPS é a tecnologia que permite a definição exata da localização do ponto gerado pelo pulso LASER na superfície terrestre. O funcionamento do dGPS se baseia no uso de dois receptores GPS, que registram, simultaneamente a posição no espaço. Através de uma definição precisa de coordenadas x,y,z uma estação GPS é instalada como base em terra, registrando a sua posição durante a coleta de dados e um segundo aparelho GPS vai a bordo da aeronave, registrando a posição do LIDAR durante a aquisição de cada ponto do levantamento em questão. Os pontos adquiridos pelos receptores são concatenados de modo a se obter o georreferenciamento dos dados em um sistema de projeção determinado.

2.1.3 Sistema de Navegação Inercial

O INS utiliza o *Inertial Measurement Unit* (IMU) para determinar a atitude da aeronave durante o levantamento da massa de pontos, que são o rolamento (*roll*), a guinada (*yaw*) e a arfagem (*pitch*), conforme ilustrado na Figura 2. De acordo com Torres e Hemerly (2002) desde a década de 1940, os sistemas de navegação, em especial os sistemas de navegação inercial tornaram-se importantes componentes em aplicações científicas e militares, baseando-se em medições das acelerações e velocidades angulares do corpo

em movimento em relação a um determinado sistema de referência. Girômetros e acelerômetros fornecem os sinais necessários para uma navegação autônoma, sendo que os girômetros medem as rotações e os acelerômetros, as acelerações. Através de processos de integração, torna-se possível obter velocidade e posição, bem como determinar a orientação do corpo.

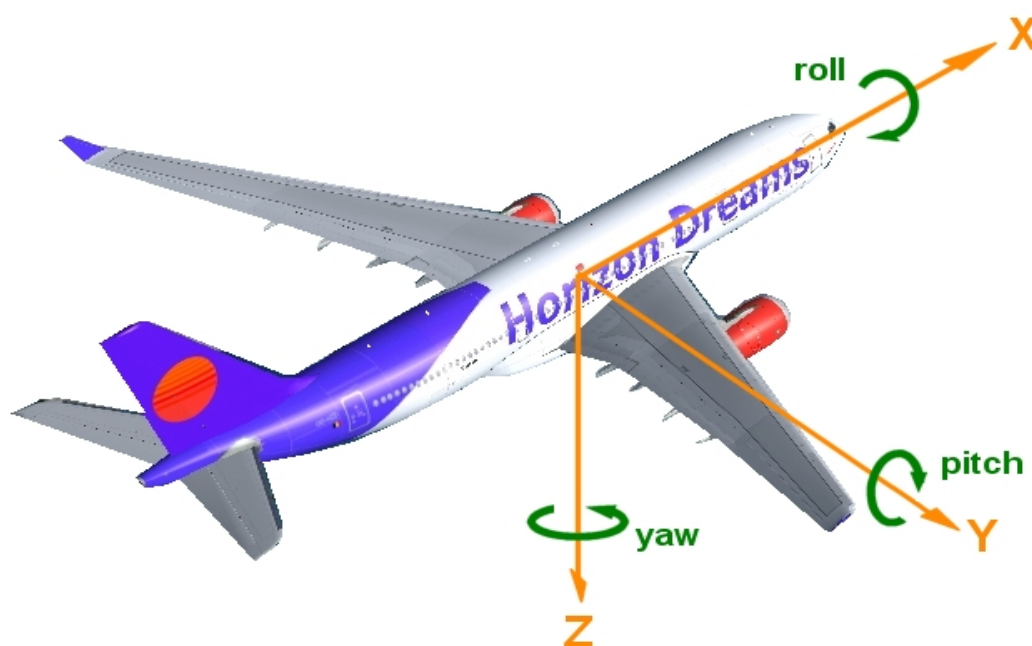


Figura 2- Atitude da aeronave

FONTE: FLIGHTSIM (2010)

2.2 A 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). Uma das mais promissoras técnicas de avaliação quantitativa de parâmetros florestais é o sistema ALS, baseado na tecnologia LIDAR. Esta técnica de sensoriamento remoto 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 da tecnologia LIDAR em relação a outras formas de sensoriamento remoto.

De acordo com Hyypä e Inkinen (1999) os primeiros estudos utilizando a tecnologia LIDAR em investigações florestais ocorreram por volta de 1980 e se concentravam na utilização do sistema *profile* na obtenção de informações a respeito da estrutura vertical de florestas. Num dos primeiros estudos realizados com a utilização do sistema *profile* na mensuração florestal, Nelson et al. (1984) efetuaram medidas numa área de cobertura vegetal composta por uma floresta caducifólia, na qual um pulso laser era emitido a cada 25 centímetros, criando um perfil com a altura das árvores de tal floresta.

No início da década de 90 com a substituição dos sistemas do tipo *profiler* pelo tipo *scanner* estudos mais complexos sobre os ecossistemas florestais começaram a ser desenvolvidos com dados provenientes da tecnologia LIDAR. Estes sistemas se caracterizavam por serem de pequeno ponto projetado com uma frequência de pulso muito alta (HOLMGREN, 2003). Usualmente gravando o primeiro ou o último retorno ou ambos retornos do pulso laser. Atualmente, equipamentos mais modernos como o laser aerotransportado *GEMINI* da empresa *Optech* 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). Devido à grande malha de pontos por metro quadrado capaz de ser criada pelo equipamento, ele habilita a percepção de características relativamente pequenas nos locais varridos. Dubayah e Drake (2000) observaram que alguns fatores limitam a capacidade de sensores de pequeno ponto projetado na obtenção de medidas florestais: (1) o pulso laser pode penetrar na copa antes de ser refletido, perdendo o contato com o

topo das árvores (2) devido ao pequeno tamanho do feixe de laser é necessário voar extensas áreas para se obter dados suficientes para análise, (3) não se pode garantir que algum pulso penetrará o dossel e alcançará o solo. Entretanto, diversos estudos utilizando esses sistemas para mensuração de variáveis dendrométricas têm obtido sucesso (NILSSON, 1996; NÆSSET, 1997; MAGNUSSEN et al., 1999; HYYPPA e PYYSALO, 1999; POPESCU et al., 2003; CLARK et al., 2004; WANG e GLENN, 2007), demonstrando sua potencialidade para estudos florestais com foco em árvores individuais ou em parcelas com grupo de árvores (NÆSSET, 2002).

Mais recentemente desenvolvidos, os sistemas de grande ponto projetado são dispositivos que, em sua grande maioria, são de caráter experimental, construídos por instituições de pesquisa. São equipamentos que gravam toda a sequência da onda de energia refletiva de um ponto projetado, num perfil de altura e intensidade (MEANS et al., 1999). Segundo Holmgren (2003) diversos destes equipamentos foram desenvolvidos recentemente em plataformas aerotransportadas, sendo concebidos como preparação para sistemas aeroespaciais que utilizam a tecnologia LIDAR para estudo da topografia terrestre e da cobertura vegetal, incluindo a estimativa da altura da vegetação no planeta. 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 também de *Airborne Laser Altimetry* (ALA), tendo como exemplo a *Shuttle Laser Altimeter* (SLA) que foi uma experiência designada para desenvolver a engenharia e algoritmos para as missões espaciais, servindo de teste para os altímetros a laser orbitais *Multi-Beam Laser Altimeter* (MBLA) e *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS) (CARABAJAL et al., 1999). Outras missões aeroespaciais utilizando a tecnologia LIDAR foram a *Ice, Cloud and Land Elevation Satellite* (ICESat), levando a bordo o equipamento GLAS, sendo capaz de prover informações a nível global e tendo como uma das missões a mensuração de dosséis florestais (LEFSKY et al., 2005) e *Vegetation Canopy Lidar* (VCL) uma missão

da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) realizada com o objetivo principal 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).

2.2.1 A tecnologia LIDAR na estimativa de variáveis dendrométricas

Segundo Silva e Paula Neto (1979) 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 estimação através de técnicas específicas, tendo como exemplo o volume. A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto também 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, utilizaram uma regressão linear múltipla para encontrar uma equação para prever a biomassa utilizando a contagem das árvores na parcela e a altura derivada dos dados LIDAR, obtendo resultados satisfatórios.

2.2.1.1 Estimativa de altura

A altura é uma importante característica da árvore, obtida por medição ou estimação. Wang e Glenn (2007) 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 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 estimação 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, como será explicitado no próximo tópico do texto. 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 numa floresta boreal na Noruega, utilizando o método direto de determinação, Næsset (1997) comprovou uma subestimação da média aritmética de altura obtida com o LIDAR de pequeno ponto projetado em relação à verdade de campo da ordem de 4,1 – 5,5 metros e o desvio padrão entre a média da altura do LIDAR e do campo foi de 1,1 – 1,6 metros. Também utilizando o sistema de pequeno ponto projetado e o método direto de determinação de altura das árvores, Clark et al. (2004), observaram uma subestimação da altura ao estimarem a elevação de sub-dossel e 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%.

A aplicação 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, 2007). Num 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: (1) 25, (2) 50, (3) 75, e (4) 90 percentis da distribuição de altura dos pulsos laser que atingiram o dossel, (5) os valores de altura máximos, (6) a média das alturas e (7) os coeficientes de variação. A regressão da verdade de campo em contrapartida com os valores derivados do LIDAR foi capaz de explicar 75% da variabilidade. A validação revelou 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 estimação 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: (1) a altura máxima, (2) 25, (3) 50 e (4) 75 percentis da altura dos pontos LIDAR na vegetação e (5) a densidade do dossel, relativo a porcentagem dos primeiros retornos com informação do dossel, obtendo coeficiente de correlação $R^2 = 0.98$, sugerindo a boa capacidade do método na obtenção de tal estimativa.

2.2.1.2 Estimativa de propriedades das copas arbóreas

A copa de uma árvore é o órgão 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 boa acurácia se torna um parâmetro importante em estudos da dinâmica do fogo (TACHAJAPONG et al., 2006), fisiologia das plantas (MAGUIRE, 1989), análise de habitat (XIAO et al., 2003). Entretanto, a mensuração da copa de uma árvore é bastante complicada de ser realizada em campo sendo interessante a utilização 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

parcelas florestais (Figura 3). Algumas abordagens têm sido propostas com tal finalidade, sendo que 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 grande nuvem de pontos gerada por equipamentos LIDAR de pequeno ponto projetado, é grande a chance de existirem pontos pertencentes ao topo da árvore, tal qual ilustrado na Figura 4. Magnussen et al. (1999) afirmam que são necessários de seis a dez pulsos laser atingindo a copa, para que seja possível detectar árvores individuais.

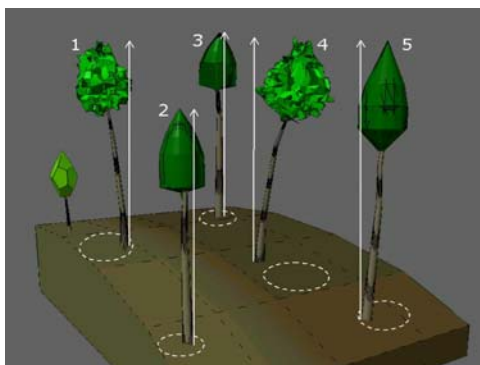


Figura 3 - Detecção e delimitação de copas
FONTE: MISSISSIPPI STATE UNIVERSITY (2010)



Figura 4 - Pulsos LASER que refletem na copa de uma árvore
FONTE: MISSISSIPPI STATE UNIVERSITY (2010)

De acordo com Hyypä 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 delineados 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.

Conduzindo um estudo em uma área de floresta boreal no sul da Finlândia Hyypä et al. (2001) 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 identificada e mensurar o seu diâmetro optaram pela aplicação de um filtro passa-baixa numa convolução com janela de 3x3 e a utilização de um processo de segmentação por crescimento de regiões, buscando assim, individualizar e delinear cada copa. A precisão obtida no estudo foi superior as 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. Desta forma são minimizados os possíveis erros de interpolação no processo de rasterização dos pontos ao se criar os modelos digitais de altura das árvores e conseqüentemente o topo das árvores é identificado com mais acurácia. Neste estudo, as árvores dominantes nas parcelas testadas foram detectadas com 72,2 % de acurácia.

Os estudos que buscam individualização e delineamento de copas arbóreas normalmente seguem os métodos descritos neste tópico, encontrando-se na literatura estudos realizados em biomas ou sob condições diversas (POPESCU et al., 2003; MALTAMO

et al., 2004; ROBERTS, 2005; CHEN, 2006; POPESCU e ZHAO, 2008; HIRATA, 2009).

2.3 Segmentação de imagens

As técnicas de segmentação são baseadas na definição geral de Zucker (1976) que apresenta quatro condições básicas para o processo: (1) todos os pixels da imagem devem pertencer a uma região, (2) as regiões devem ser conectadas, (3) todos os pixels de uma dada região devem ser considerados similares e (4) o resultado final deve satisfazer todas as três condições enumeradas acima. Sob o ponto de vista computacional e numa determinação mais abrangente, a segmentação caracteriza-se como um processo que busca subdividir uma imagem em segmentos homogêneos. Existem na literatura diversas definições sobre o procedimento de segmentação de imagens. Segundo Zhang (1996) é um processo da análise de imagens, que consiste em subdividir uma imagem em suas partes constituintes, extraíndo assim objetos de interesse. De acordo com a definição de Moigne e Tilton (1995) a segmentação de imagens é um processo que busca agrupar pixels avulsos utilizando propriedades inerentes da imagem, tendo como exemplo os níveis de cinza. Sob a ótica do Sensoriamento Remoto a segmentação é parte constituinte do processo de análise de imagens digitais, tratando da definição de objetos geográficos ou regiões em uma imagem, fornecendo assim dados para procedimentos de classificação e interpretação.

De acordo com Gonzalez e Woods (2000) os algoritmos de segmentação de imagens geralmente se apóiam em duas propriedades básicas de relacionamento dos valores dos níveis de cinza. Sendo elas (1) a descontinuidade, que consiste na subdivisão da imagem levando em conta mudanças bruscas nos níveis de cinza e (2) a similaridade que engloba métodos de crescimento de regiões, limiarização e na divisão e fusão imagens. Segundo Pekkarinem (2002) os métodos de segmentação podem ser descritos em três grandes grupos apresentados: (1) *pixel-based*, que inclui a determinação de *clusters* no

domínio dos atributos, (2) *edge-based*, que abrange as técnicas de detecção de bordas e (3) *region-based*, normalmente apresentado como crescimento de regiões.

2.3.1 Algoritmo baseado em crescimento de regiões

De acordo com Gonzalez e Woods (2000) a segmentação por crescimento de região é uma técnica aplicada em imagens para realizar o agrupamento de grupos de *pixels* seguindo algum critério de similaridade, tendo assim o objetivo de particionar a imagem em regiões, sendo a sua formulação básica a seguinte: Seja R a completa região da imagem, pode-se descrever a segmentação como o processo de particionar R em n regiões R_1, R_2, \dots, R_n , tal que,

- $$(1) \bigcup_{i=1}^n R_i = R;$$
- (2) R_i é uma região conexa, $i = 1, 2, \dots, n$;
- (3) $R_i \cap R_j = \emptyset$ para todo $i \neq j$;
- (4) $P(R_i) = \text{VERDADEIRO}$, para $i = 1, 2, \dots, n$;
- (5) $P(R_i \cup R_j) = \text{FALSO}$, para $i \neq j$,

em que $P(R_i)$ é um predicado lógico sobre os pontos do conjunto R_i e \emptyset é o conjunto vazio. A propriedade (1) indica que a segmentação deve ser completa, ou seja, cada *pixel* precisa fazer parte de uma região. A propriedade (2) requer que os *pixels* em uma região sejam conexos, ou seja, eles devem ser adjacentes e seus níveis de cinza devem satisfazer alguma característica de similaridade. A propriedade (3) indica que as regiões devem ser disjuntas. A propriedade (4) trata das propriedades que devem ser satisfeitas pelos *pixels* em uma região segmentada, por exemplo, $P(R_i) = \text{VERDADEIRO}$ se todos os *pixels* em R_i possuírem a mesma intensidade. Finalmente, a propriedade (5) indica que as regiões R_i e R_j são diferentes no mesmo sentido do predicado P , ou seja, são regiões homogêneas.

As condições citadas anteriormente valem para todos os algoritmos de crescimento de regiões, porém algumas variantes são possíveis. Pekkarinen (2002) expõe três variações para o algoritmo: (1) *pure merging*, que tem início a partir de pequenas regiões sementes da imagem integrando-as iterativamente segundo algum critério de homogeneidade, (2) *pure split*, iniciando da imagem original dividindo-a sucessivamente até que se chegue a regiões consideradas homogêneas e (3) *split-and-merge*, que combina os dois primeiros métodos de forma a dividir a imagem em pequenas sub-regiões uniformes para em seguida unir tais regiões segundo algum critério de homogeneidade. Os algoritmos destinados às aplicações de sensoriamento remoto, em geral, são do tipo *pure merging*, podendo-se citar como exemplo os algoritmos implementados nos softwares SPRING (CÂMARA et al., 1996). Para as aplicações em sensoriamento remoto, são descritas na literatura várias classes de algoritmos de segmentação, entretanto, Tilton e Lawrence (2000) sustentam que o método de crescimento de regiões é preferível, visto que considera a característica espacial dos dados e garante a formação de segmentos fechados.

Segundo Espindola (2006) o software SPRING contém um algoritmo de segmentação de imagens baseado na técnica de crescimento de regiões, com algumas modificações que parcialmente resolvem 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. Isto significa dizer que, a cada iteração, o par mais semelhante de regiões espacialmente adjacentes é agrupado.

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 Vizinhança 1: $R_j \in N(R_i)$ e $dist(R_j, R_i) \leq dist(R_k, R_i)$, $R_k \in N(R_i)$;

(3) Condição de Vizinhança 2: $R_i \in (R_j)$ e $dist(R_i, R_j) \leq dist(R_k, R_j)$, $R_k \in N(R_j)$,

Desta forma, 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).

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo foram apresentados os procedimentos metodológicos aplicados na pesquisa e também a área e os dados utilizados para a realização do estudo, o processo se desenvolveu conforme detalhado no fluxograma ilustrado na (Figura 5) e foi descrito nos itens que compõem o presente capítulo.

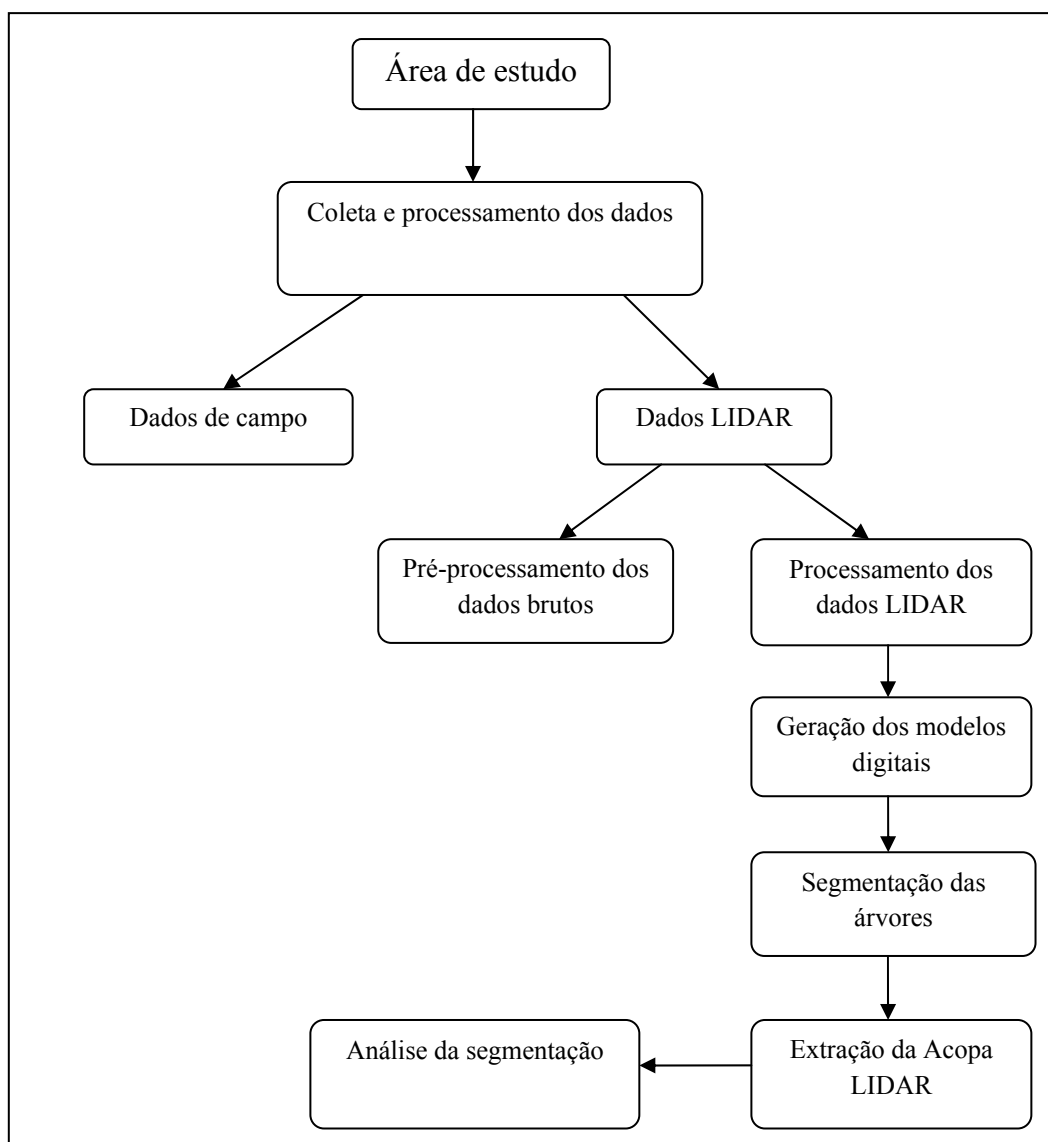


Figura 5 - Fluxograma detalhando a metodologia

3.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na Estação Ecológica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), localizada no campus universitário da Pampulha, município de Belo Horizonte capital do estado de 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 estudo foram demarcadas em uma área de predominância de mata semidecídua, conforme se observa na foto aérea apresentada na Figura 6.



Figura 6 - Área de estudo

3.2 Coleta e processamento dos dados

3.2.1 Dados de campo

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

Para cada parcela foram coletados dois pontos distantes 50 metros entre si em um eixo longitudinal Y, tal eixo foi localizado no meio da parcela, ou seja, distante 15 metros para cada borda. Para o alinhamento dos dois pontos foi utilizado o método de igualdade dos triângulos. No eixo Y foi colocada uma trena de 50 metros (Figura 7) e a partir desta, utilizando uma vara graduada foi possível medir o eixo X da parcela, conforme ilustrado na Figura 8.



Figura 7 - Comprimento do eixo Y



Figura 8 - Medição do eixo X

Foram criadas falsas coordenadas planas regulares (X,Y) para cada árvore dominante presente em determinada parcela. Após a coleta das falsas coordenadas em campo, a próxima etapa consistiu em transformá-las em coordenadas cartográficas e para isto foi utilizado o software GPS TrackMaker, considerando o azimute entre os dois pontos georreferenciados e as distâncias nos eixos (X,Y) para cada árvore. Foram georreferenciadas 71 árvores na parcela 1 (Figura 9), 51 árvores na parcela 2 (Figura 10) e 54 árvores na parcela 3 (Figura 11). Feita a transformação cada árvore foi georreferenciada na projeção UTM, fuso 23, datum SAD 69.

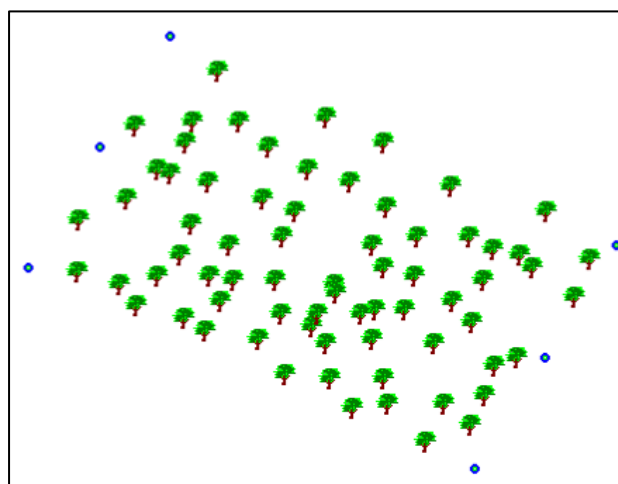


Figura 9 - Árvores georreferenciadas na parcela 1

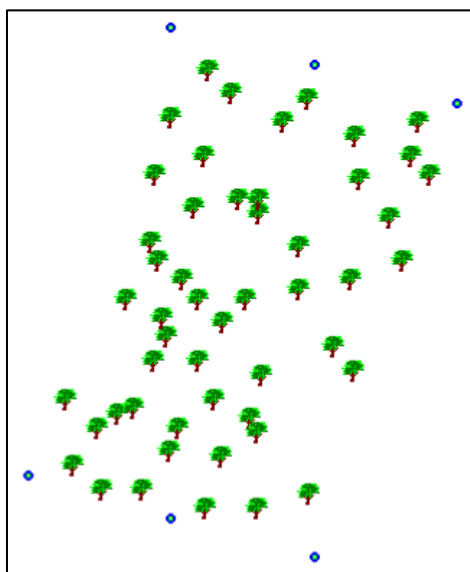


Figura 10 - Árvores georreferenciadas na parcela 2

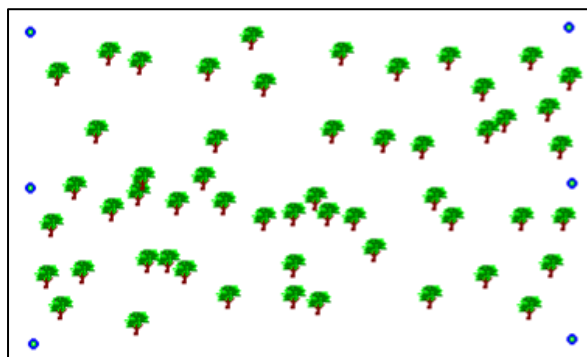


Figura 11 - Árvores georreferenciadas na parcela 3

Para algumas árvores de cada parcela foi mensurada a ACopa, isto devido à impossibilidade de se mensurar a totalidade das copas arbóreas, por ser esta uma medida de difícil obtenção em campo. Tentando superar dificuldades impostas, principalmente pela altura das copas e pela fusão de galhos entre elas, foram selecionadas as copas mais espaçadas entre si, permitindo assim sua medição e para isto foi utilizado 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 45⁰, iniciando do Norte, definindo a área da copa como sendo a sua projeção num plano horizontal embaixo da árvore e calculada como um círculo de raio igual a média dos oito raios. Foram mensuradas 10 árvores para cada parcela (Tabela 1), extraindo-se oito raios de cada uma em oito direções, iniciando-se pelo Norte. A partir do raio médio de cada árvore, foi calculada sua área utilizando a fórmula da área do círculo dada na equação (1)

$$A = \pi r^2 \quad (1)$$

Tabela 1 – Dados para ACopa mensuradas em campo

Parcelas	Árvores	Rumo / Raios / m								Média	ACopa/m ²
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
1	1	2,1	1,8	2,7	3,2	4,7	3,9	3,4	4,1	3,23	32,75
	2	2,3	2,7	3,3	5,2	2,7	4,2	1,9	2,2	3,06	29,40
	3	1,7	3,3	2,6	2,1	2,5	2,3	2,2	2,1	2,22	15,47
	4	1,9	2,3	3,7	2,5	2,2	2,3	2,1	1,9	2,36	17,48
	5	1,1	1,7	1,2	1,4	1,6	1,9	1,5	1,8	1,52	7,25
	6	3,1	2,7	2,1	1,9	2,9	2,2	1,4	1,6	2,23	15,61
	7	1,2	2,5	3,3	2,9	2,3	2,8	1,1	1,2	1,91	11,45
	8	1,7	2,4	4,1	3,6	1,8	2,2	2	2,2	2,50	19,62
	9	1,1	2,3	2,9	2,9	1,5	1,8	1,5	1,1	1,88	11,09
	10	1,5	2	2,1	2,3	1,4	1,9	1,5	1,8	1,81	10,28
2	1	1,7	4,1	2,3	1,6	3,8	3,5	2,6	2,1	2,71	23,06
	2	2,7	3,3	3,1	2,2	4	3,1	3,9	3,2	3,18	31,75
	3	3,3	2,3	1,9	2	1,7	2,2	1,9	2,5	2,22	15,47
	4	3,2	2,4	2,2	1,3	2	3,8	2,7	2,1	2,46	19,00
	5	3,6	3,8	2,5	1,9	3,3	2,9	2,7	1,8	2,81	24,79
	6	2,6	1,9	1,9	2,4	2,1	2	2,1	2,1	2,13	14,24
	7	4,1	3,9	2,4	2	2,1	3,7	3,1	1,8	2,88	26,04
	8	1,9	3,8	3,1	2,7	4,2	2	2,5	1,8	2,75	23,74
	9	2,5	2,7	1,2	1,6	3,1	2,6	1,9	1,7	2,16	14,64
	10	2,2	2,6	2	1,9	2,6	2,3	1,3	2	2,11	13,97
3	1	4,5	3,7	3,4	4,1	5,1	3,2	4,4	3,3	3,96	49,24
	2	3,1	3,2	3,6	4	4,9	4,1	4,3	3,7	3,86	46,78
	3	2,1	2,3	1,8	1,6	1,3	1,5	2,6	2,2	1,92	11,57
	4	1,8	3,2	3,5	2,1	2,9	2,6	2,2	1,5	2,47	19,15
	5	1,7	1,2	2,1	1,9	2,5	2,9	2,8	1,8	2,11	13,97
	6	2	2,2	2	2,5	2,8	1,9	1,7	1,9	2,12	14,11
	7	2,3	2,5	1,9	3,1	3,5	2,6	2,4	2	2,53	20,09
	8	1,2	1,3	1	2	2,4	2,7	1,9	1,8	1,78	9,94
	9	2,1	3,3	3	1,8	2	2,2	1,8	1,7	2,23	15,61
	10	2,4	2,7	3,1	2	2,4	2,1	2	2,2	2,36	17,48

3.2.2 Dados LIDAR

Os dados LIDAR utilizados nesta pesquisa foram cedidos pela Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (PRODABEL) e fazem parte de um

levantamento a LASER contratado pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (PMBH) e executado pela Empresa Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A. O levantamento realizado com o sistema ALS foi planejado para abranger toda a área do município de Belo Horizonte, mais uma faixa adicional de 200 metros pertencente aos municípios circunvizinhos, totalizando uma área aproximada de 360 Km². O voo para aquisição da nuvem de pontos com a tecnologia LIDAR foi realizado com base nos parâmetros apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de aquisição dos dados LIDAR

Ângulo de abertura (FOV)	20°
Altura de voo	2388,1 metros
Largura da faixa	1688,1 metros
Superposição lateral (entre faixas)	36,4 %
Número de faixas	76
Direção do voo	variada
Densidade de pontos (média)	1,5 / m ²

A aquisição e tratamentos iniciais dos dados obtidos com a tecnologia LIDAR foram realizados pela empresa executora Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A e consistiram de duas etapas: (1) Pré- processamento dos dados brutos e (2) Processamento dos dados LIDAR.

3.2.2.1 Pré-processamento dos dados brutos

Na fase 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.

3.2.2.2 Processamento dos dados LIDAR

A segunda etapa da fase de processamento (2) 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 ao 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.

3.2.3 Geração dos modelos digitais

A nuvem de pontos georreferenciados criada pela tecnologia LIDAR forma o MDS e a partir da filtragem desta nuvem de pontos, como descrito no item anterior é possível a criação do MDT. Este dois modelos são produzidos em formato vetorial de pontos e dispostos de maneira irregular. A criação de modelos digitais consiste na transformação destes modelos de formato vetorial para raster e na disposição dos pontos regularmente. Com esta finalidade os arquivos vetoriais foram importados para o *software ENVI 4.4*, que possui um módulo para processamento e visualização de dados LIDAR chamado *LIDAR Toolkit*. O procedimento inicial para a geração dos modelos é a interpolação dos valores de altura contidos no MDS e MDT com o propósito de se criar uma matriz bidimensional ou grade de formato regular, na qual o valor de cada célula da grade ou pixel formados por um par de coordenada (x,y) descrevem a altura do terreno neste ponto. Foram testados os métodos de interpolação pelo vizinho mais próximo, bilinear e por convolução cúbica, buscando um método que melhor se adéque aos propósitos do

trabalho. Levando-se em conta que o objetivo é trabalhar com árvores individuais, a resolução do pixel na grade de todos os modelos foi fixado em 0,20 cm, valor este superior ao recomendado para estudos desta natureza (Hyypä, 2001).

No processo de interpolação foram consideradas as máximas elevações contidas no MDS das parcelas demarcadas, sendo esta informação correspondente ao topo do dossel, não incluindo os pulsos LASER que penetraram nas copas atingindo o solo ou o interior das árvores, sendo este modelo um MDC. Seguindo a mesma lógica, o mesmo processo foi realizado para o MDT, porém utilizando as mínimas elevações, minimizando a interferência de pequenos obstáculos junto ao solo na modelagem do terreno. A partir das grades regulares do MDT e MDC, outra etapa do processamento consiste na obtenção de uma grade com as alturas das árvores nas parcelas estudadas, ou seja, a criação do MDAA, obtido a partir da subtração do MDC pelo MDT.

3.3 Segmentação das árvores

Após a obtenção do MDAA referente a cada parcela, foram feitas sobre este modelo as aplicações e rotinas dos algoritmos para a segmentação de cada árvore, utilizando um método automático, por meio de técnicas de processamento digital de imagens. Para realização dos procedimentos foi utilizado o *software* SPRING. Inicialmente, foi realizada uma filtragem por convolução com máscara 3 x 3, utilizando um filtro passa-baixa, de média ponderada (Figura 12).

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} / 16$$

Figura 12 - Filtro passa-baixa

Após o realce das imagens foi aplicado um procedimento de segmentação por crescimento de regiões nos MDAA suavizados tendo em vista a separação ou divisão da copa de cada árvore em unidades homogêneas. O algoritmo de crescimento de regiões aplicado efetua o processamento com base nos limiares de similaridade e área. O parâmetro de similaridade visa a partição da imagem em regiões similares de acordo com critérios pré-definidos, neste caso os níveis de cinza do MDAA que representam a altura do dossel, correspondendo assim ao valor da distância euclidiana mínima entre as médias das regiões e a partir do momento que 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, sendo que inicialmente um pixel pertencente à região a ser segmentada será fornecido, este pixel será chamado de *pixel* semente e a partir deste se iniciará o processo de agrupamento, conforme ilustrado na Figura 13.

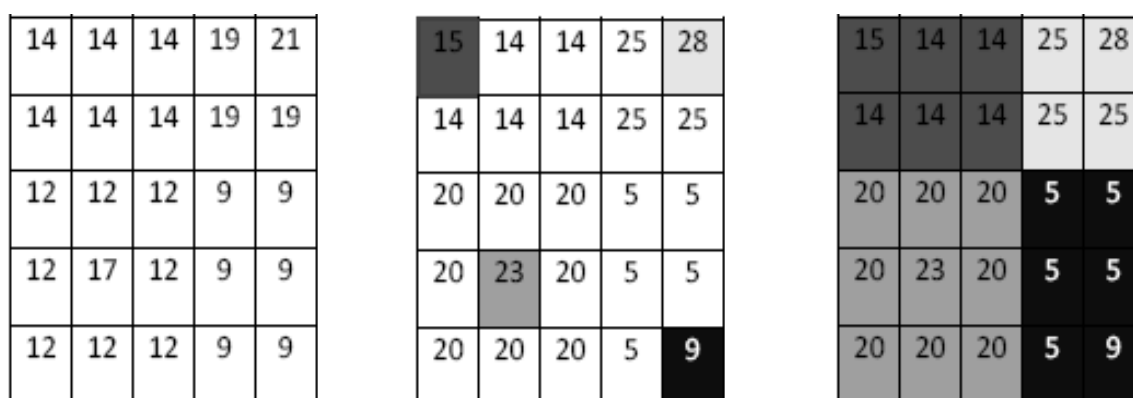


Figura 13 - Segmentação por crescimento de regiões

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 individualmente. A definição dos limiares de similaridade e área se deram de forma sistemática. 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 de limiares conforme apresentado na Figura 14.

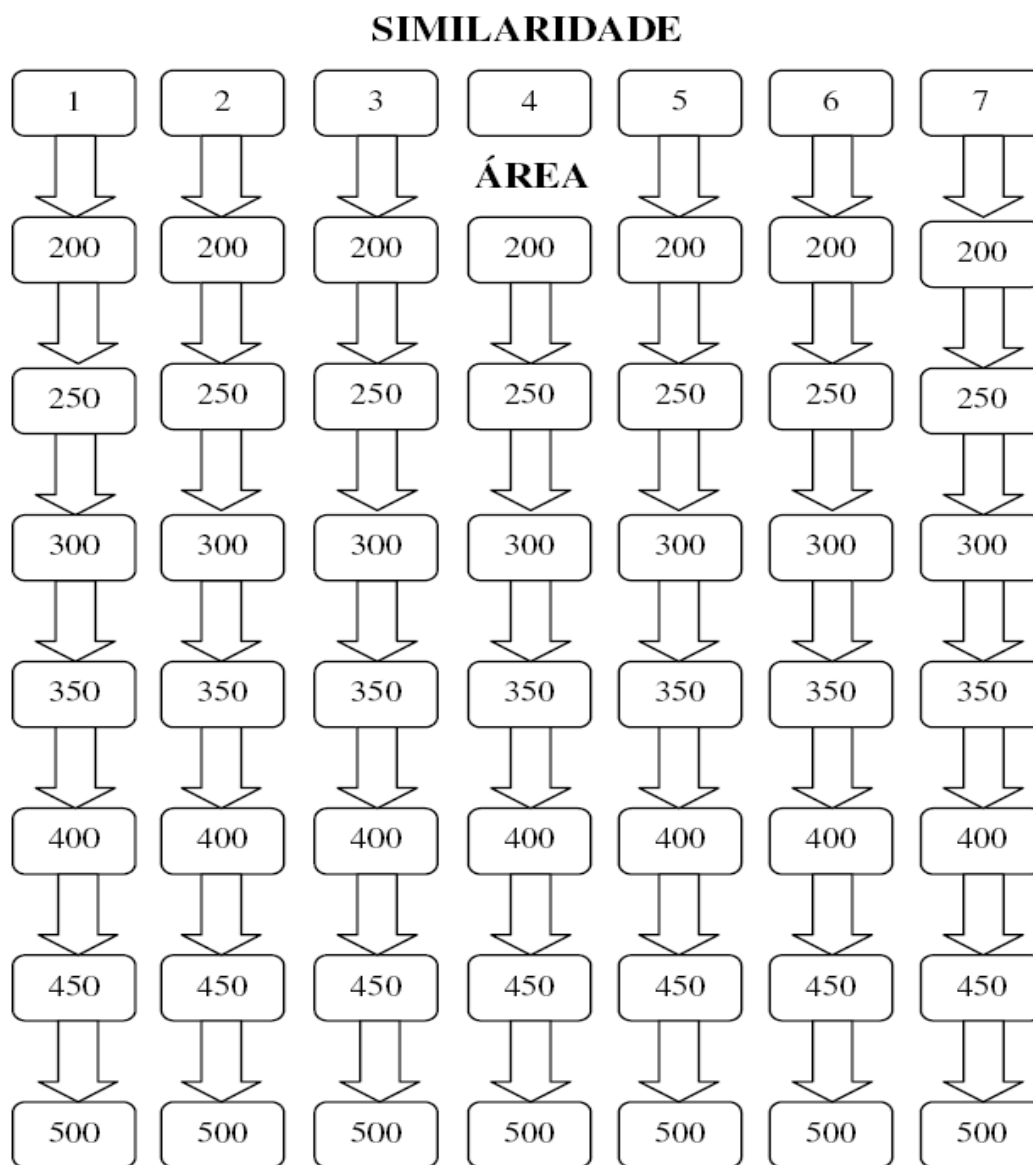


Figura 14 - Combinação de limiares de similaridade e área

As 49 combinações de limiares testadas foram avaliadas por meio de fotointerpretação, elaboradas confrontando fotos aéreas das parcelas com os resultados da segmentação de cada par de combinações de limiar no MDAA.

3.4 Extração da ACopa do LIDAR

Após a segmentação do MDAA referente a cada parcela, os segmentos gerados foram exportados em forma de polígonos para o *software* ArcGis, conforme o exemplo da parcela 1, ilustrado na Figura 15, para que assim fosse extraída a ACopa das árvores, utilizando ferramenta para cálculo de área disponível no programa.

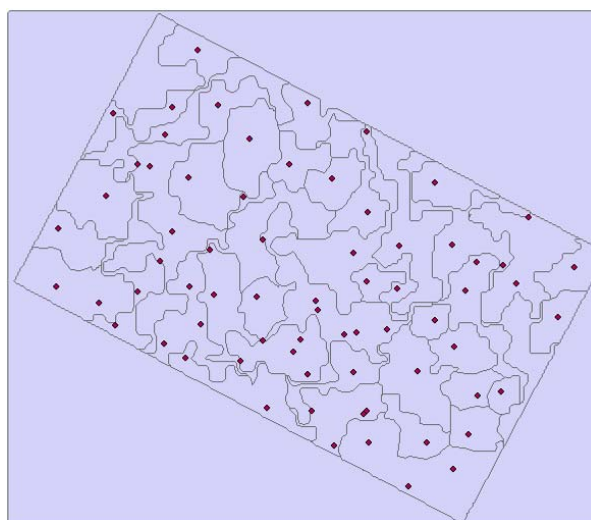


Figura 15 - Polígonos formados pela segmentação

Foi feito o cálculo de área apenas das árvores que puderam ser mensuradas em campo, para que pudesse ser formado um banco de dados com os valores de ACopa extraídos a partir da segmentação (Tabela 3) e respectivamente fosse efetuada a análise quantitativa da segmentação.

Tabela 3 - ACopa extraídas por meio da tecnologia LIDAR

Parcelas	Árvores	ACopa/m²
1	1	41,68
	2	40,53
	3	21,59
	4	22,62
	5	11,07
	6	19,00
	7	23,12
	8	28,87
	9	20,12
	10	20,50
2	1	30,75
	2	43,68
	3	24,34
	4	25,06
	5	28,15
	6	23,39
	7	34,65
	8	33,90
	9	25,09
	10	20,46
3	1	54,06
	2	56,00
	3	17,15
	4	21,84
	5	16,65
	6	22,46
	7	29,78
	8	13,87
	9	23,64
	10	24,21

3.5 Análise 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 e as geradas pelo procedimento de segmentação processado no MDAA das parcelas, buscando determinar se existe relação e qual 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 próximos de +1 ou - 1, mais forte é a relação entre as variáveis. A análise de regressão por sua vez é uma extensão da análise de correlação, mas 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 irá muda, se x mudar, ou seja, se x se alterar em um determinado valor, poderemos ter uma estimativa de quanto y irá se alterar, estabelecendo relações entre variáveis dependentes e independentes. Neste estudo foi verificado a existência de dependência entre as variáveis ACopa_CAMPO e ACopa_LIDAR, para isto foi realizada uma regressão linear simples, utilizando ACopa_CAMPO como variável independente e ACopa_LIDAR como variável dependente.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Modelos digitais

A primeira etapa no processo de individualização das árvores foi a criação do MDT, MDC e MDAA para cada parcela analisada, conforme ilustrado nas Figuras 16, 17 e 18. Para criação dos modelos digitais os pontos georreferenciados extraídos por meio da tecnologia LIDAR foram interpolados pelo método da convolução cúbica, este método teve melhor resultado na distinção do formato das copas das árvores, isto devido a complexidade dos seus cálculos para instituir o valor do *pixel*, envolvendo os 16 *pixels* vizinhos, assim se sobressai sua característica de apresentar um melhor aspecto visual, mantendo as formas mais próximas do real, incorrendo em menos erros de interpolação.

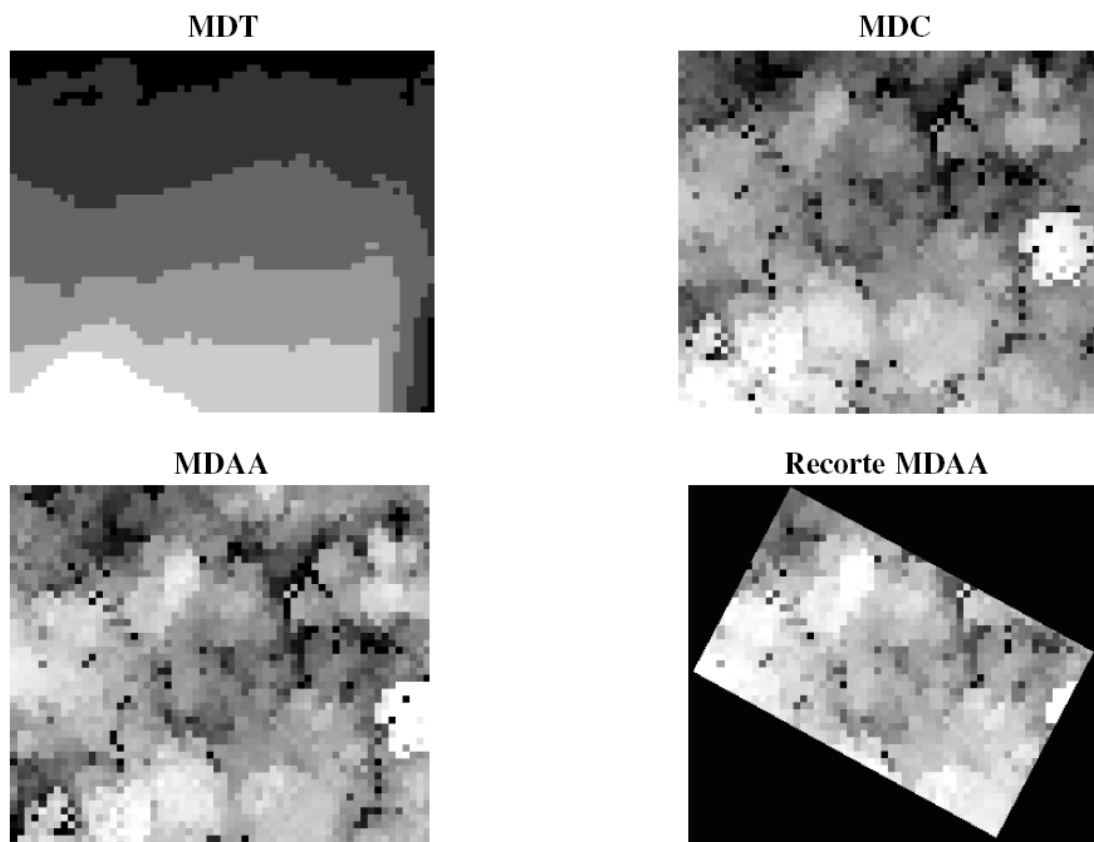


Figura 16 - MDT, MDC e MDAA referentes a parcela 1

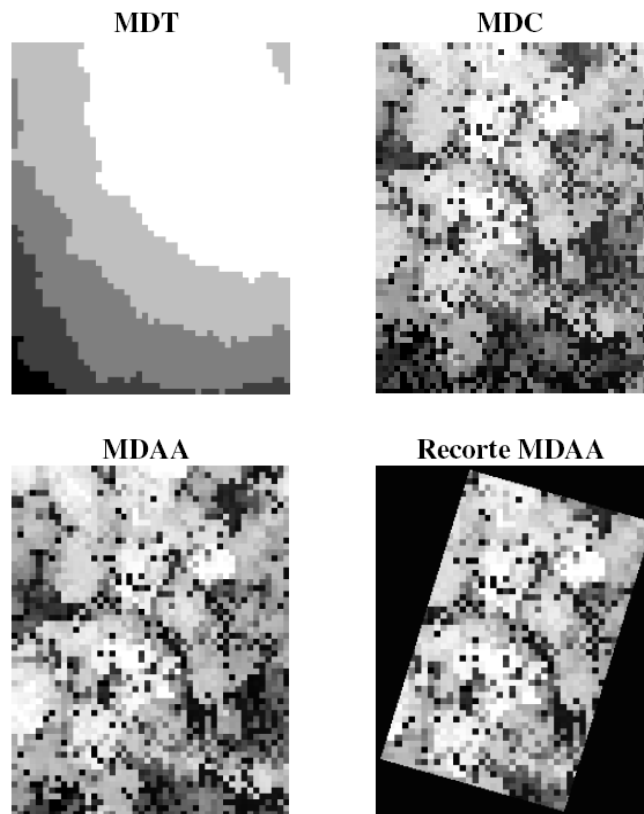


Figura 17 - MDT, MDC e MDAA referentes a parcela 2

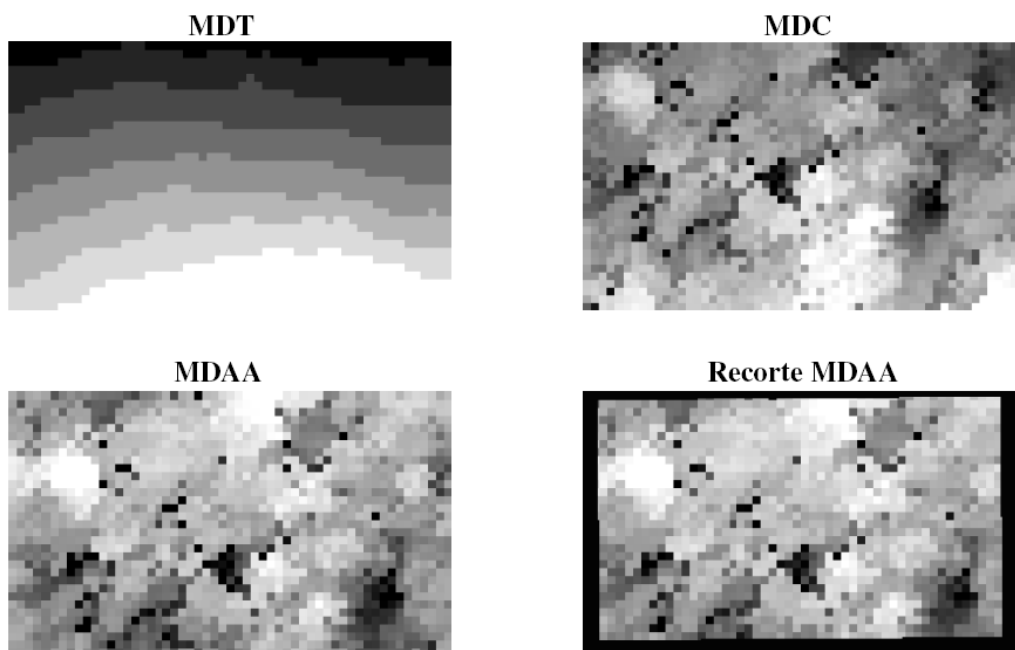


Figura 18 - MDT, MDC e MDAA referentes a parcela 3

A escala de cinza dos modelos esta distribuída em função da variação de altura. No MDAA a escala de cinza permite a visualização da copa dos dosséis, sendo que os níveis mais altos, ou seja, os mais claros correspondem às alturas maiores no dossel florestal e quanto menor as alturas, mais escura a região. Como a grade do MDAA contém o valor de altura nos *pixels* é possível a visualização das parcelas em 3 dimensões, tal qual ilustrado na Figura19.

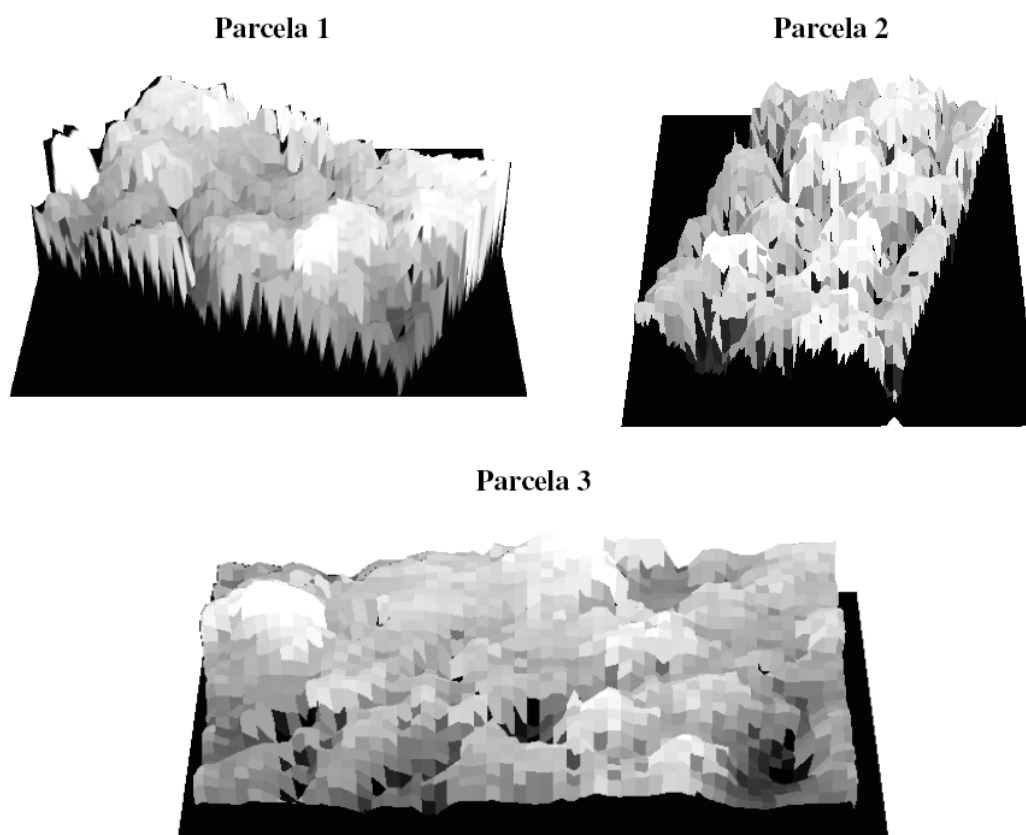


Figura 19 - Visualização 3D do MDAA

4.2 Realce das imagens

A aplicação de um filtro de suavização sobre o MDAA (Figura 20), realçou a imagem, fundindo os componentes de copa de cada árvore de forma a otimizar o processo de segmentação.

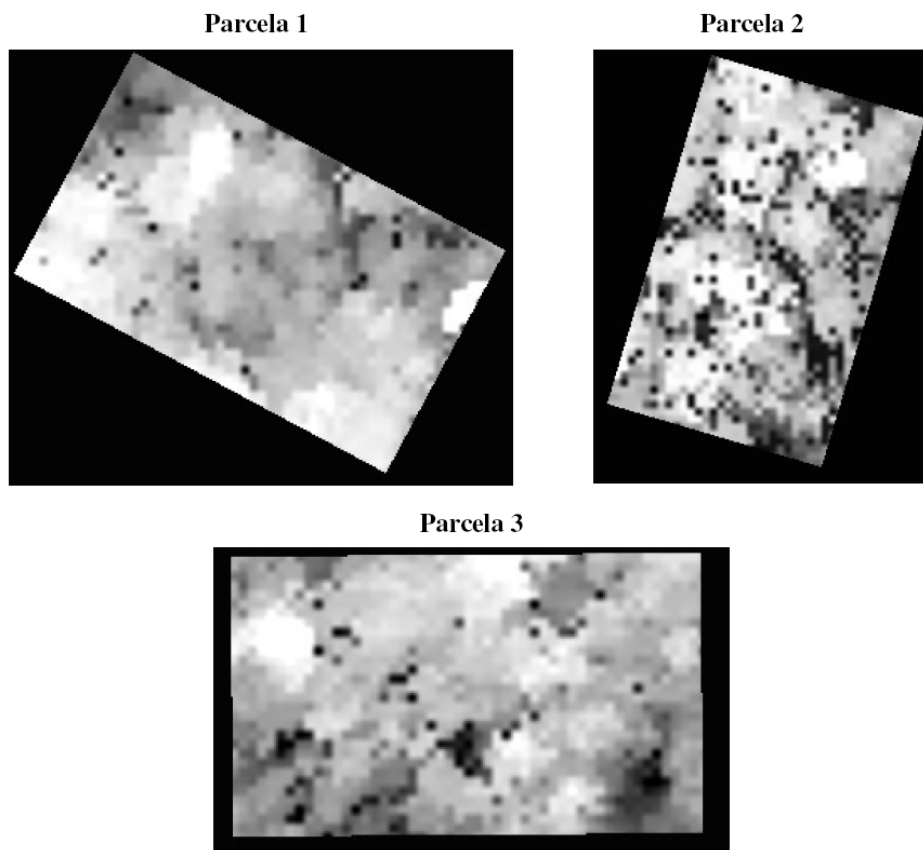


Figura 20 - Filtro de suavização

4.3 Segmentação da copa das árvores

Os limiares que proporcionaram uma segmentação mais aproximada da referência obtida pela fotointerpretação foram os valores de 5 para similaridade e 450 para área na parcela 1 (Figura 21), para a parcela 2 os melhores valores de limiares foram de 7 para similaridade e 400 para área (Figura 22) e, finalmente, para a parcela 3 os valores foram de 7 para similaridade e 500 para área (Figura 23).

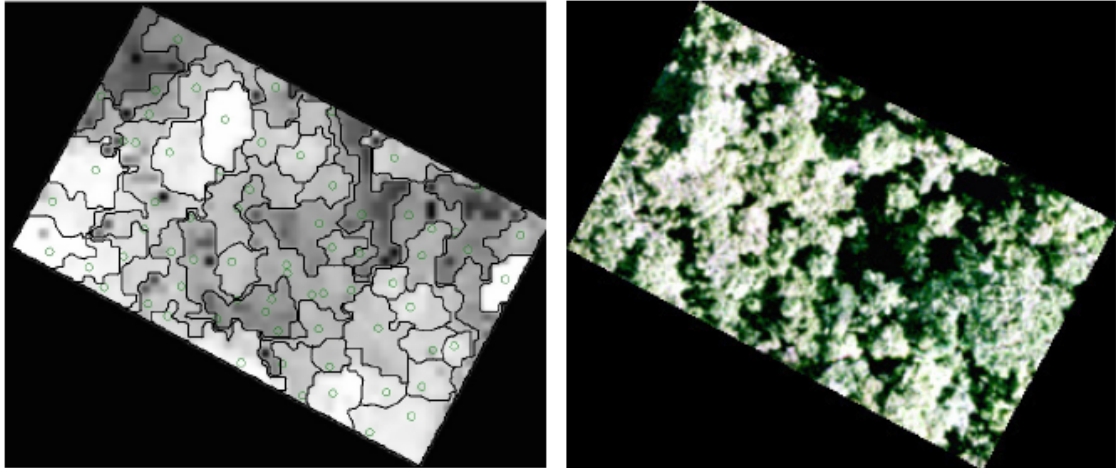


Figura 21 - Segmentação e referência da parcela 1

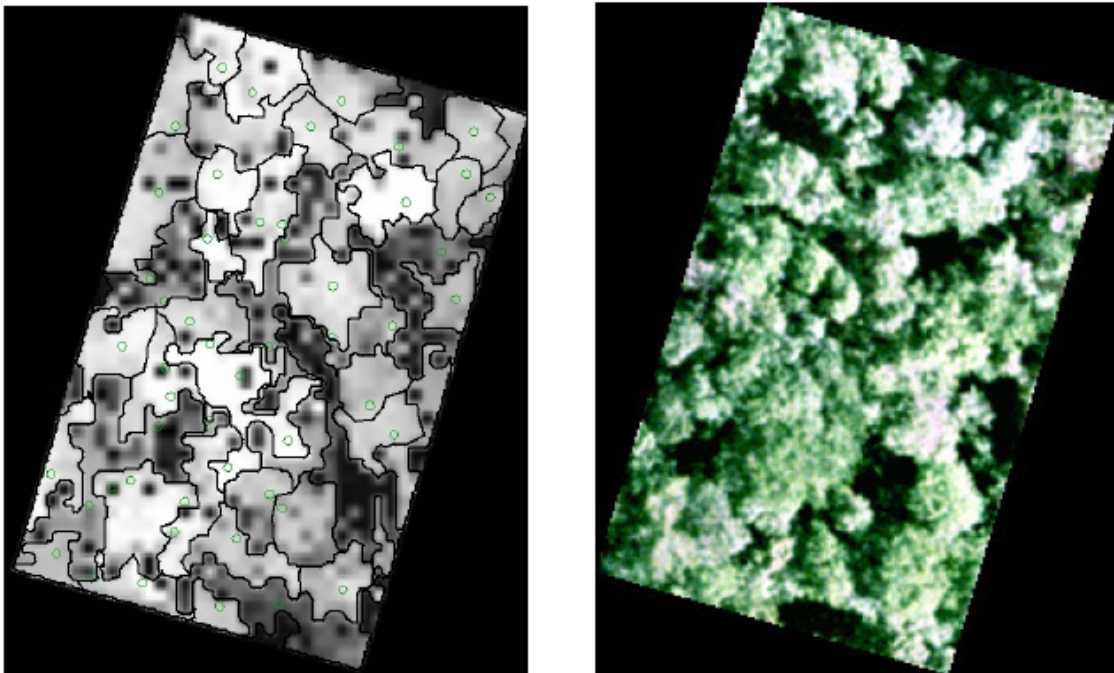


Figura 22 - Segmentação e referência da parcela 2

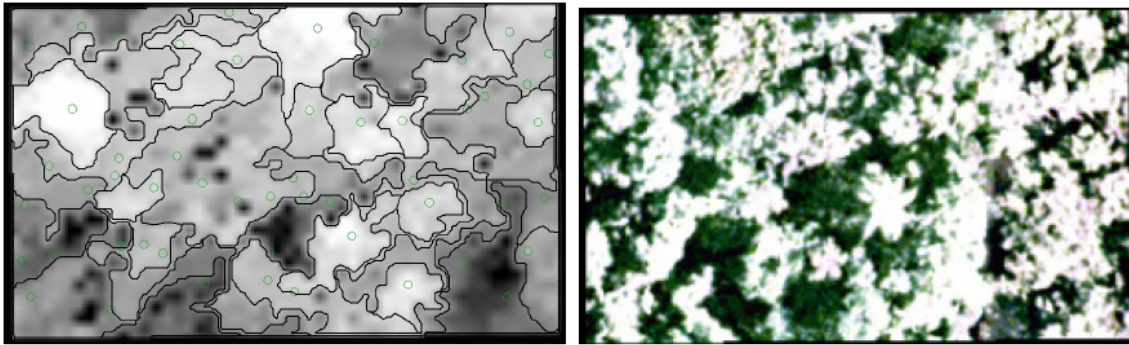


Figura 23 - Segmentação e referência da parcela 3

4.4 Análise estatística da segmentação

Observou-se uma correlação positiva entre as variáveis nas 3 parcelas analisadas. O relacionamento entre a ACopa_LIDAR e ACopa_CAMPO nas 3 parcelas foram positivos e fortes, conforme observado pelos valores de coeficiente de correlação linear de Pearson (R) apresentados na Tabela 4. Os resultados das 3 parcelas tiveram um nível de confiança associado de 0,01, indicando ser improvável que o resultado tenha ocorrido por erro na amostra, considerando a hipótese nula como verdadeira.

Tabela 4 - Coeficientes de correlação

Parcelas	Correlação de Pearson (R)
1	0,95
2	0,94
3	0,99

Para a análise de regressão linear simples, o limite de confiança estabelecido foi de 95%. De acordo com a análise da variância explicada, observando-se o coeficiente de determinação (R^2) na Parcela 1, temos que 91% da variância na medida de

ACopa_LIDAR pode ser explicada pela variância na medida de ACopa_CAMPO e neste mesmo sentido tem-se que 87% e 97% da variância na medida de ACopa_LIDAR das Parcelas 2 e 3 respectivamente, podem ser explicadas pela variância na medida de ACopa_CAMPO.

O erro padrão, que denomina o 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 (Tabela 5) nos da uma medida de quão correta foi a estimativa. O valor estima a variância de ACopa_LIDAR, para cada valor de ACopa_CAMPO.

Tabela 5 - Erro padrão

Parcelas	Erro Padrão/m
1	3,06
2	2,60
3	2,71

Ao conduzir a análise de regressão linear, foram obtidas as retas de melhor aderência e equação de regressão (2) para cada uma das 3 parcelas analisadas, mostrando o quanto a variável dependente ACopa_LIDAR varia em relação a variável independente ACopa_CAMPO.

A reta de melhor aderência traçado no gráfico de dispersão referente a parcela 1, conforme ilustrado na (Figura 24), fornece a melhor previsão possível de quanto a ACopa_LIDAR se altera em relação a variável ACopa_CAMPO. A partir da equação de regressão (3) 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. Os limites de confiança foram

estreitos, demonstrando que temos 95% de confiança de que a inclinação da população se encontra entre 0,82 e 1,39.

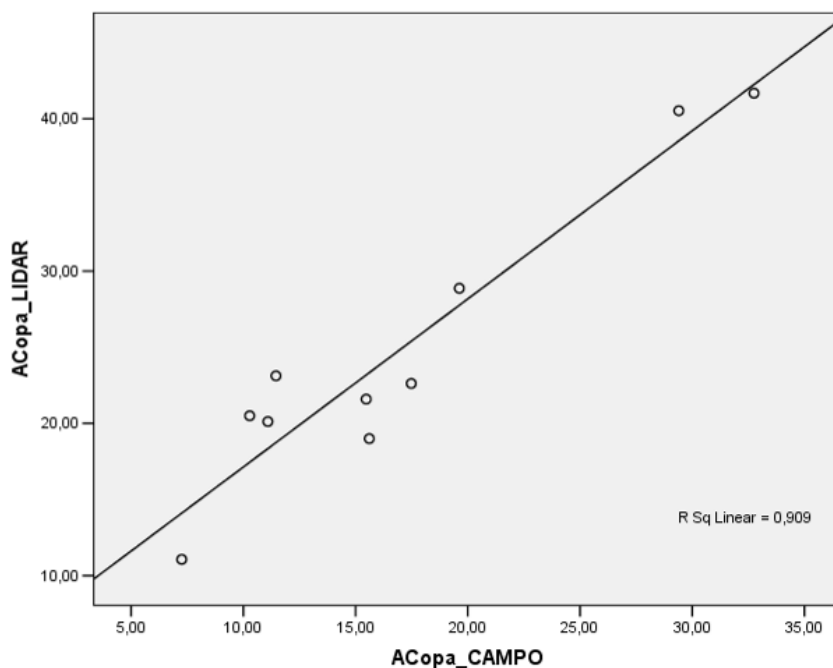


Figura 24 - Reta de regressão da parcela 1

$$ACopa_LIDAR = 1,10 * ACopa_CAMPO + 6,11 \quad (2)$$

Para a parcela 2, a reta de melhor aderência traçada no gráfico de dispersão esta ilustrada na (Figura 25). A partir da equação de regressão (4) 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. Os limites de confiança foram estreitos, demonstrando que temos 95% de confiança de que a inclinação da população se encontra entre 0,73 e 1,39.

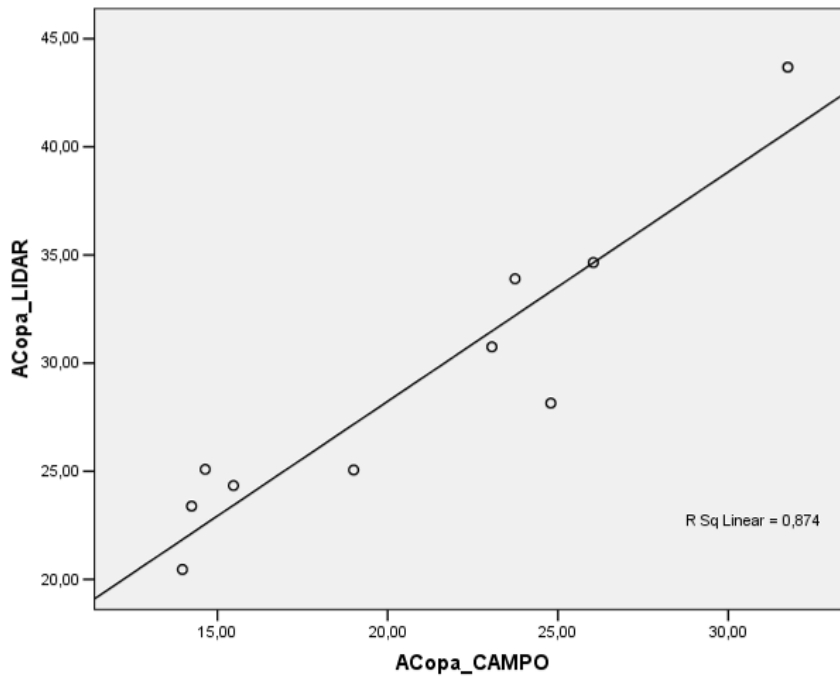


Figura 25 - Retas de regressão da parcela 2

$$ACopa_LIDAR = 1,06 * ACopa_CAMPO + 7,03 \quad (3)$$

Para a parcela 3, a reta de melhor aderência traçada no gráfico de dispersão esta ilustrada na (Figura 26). A partir da equação de regressão (5) 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. Os limites de confiança foram estreitos, demonstrando que temos 95% de confiança de que a inclinação da população se encontra entre 0,89 e 1,19.

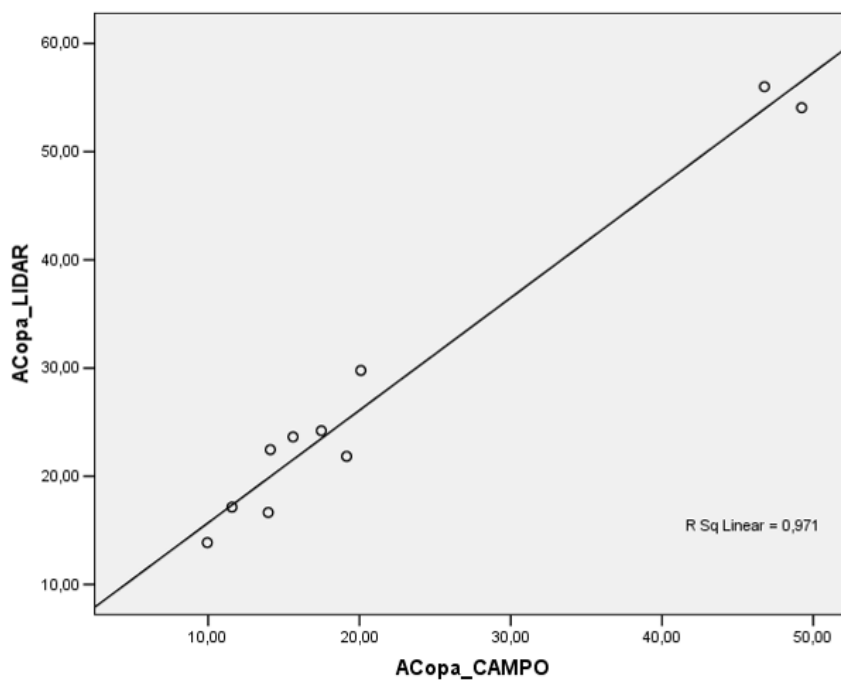


Figura 26 - Retas de regressão da parcela 3

$$ACopa_LIDAR = 1,04 * ACopa_CAMPO + 5,31 \quad (4)$$

Para se testar o pressuposto de normalidade da distribuição foi utilizado um gráfico de probabilidade normal (Normal P-P). Este 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 27, assume-se que os dados apresentam distribuição normal.

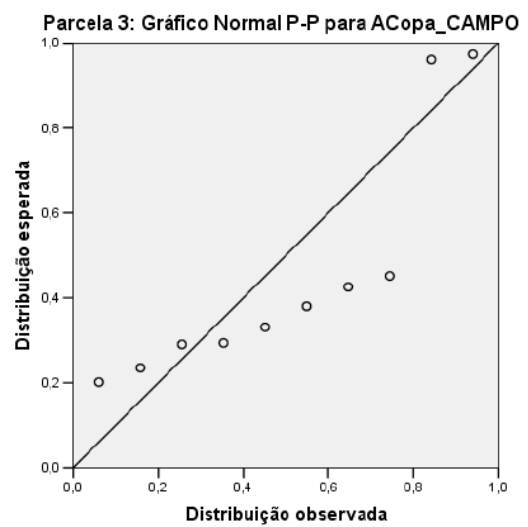
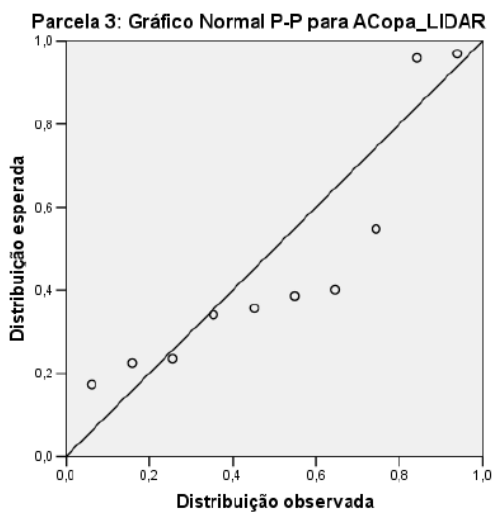
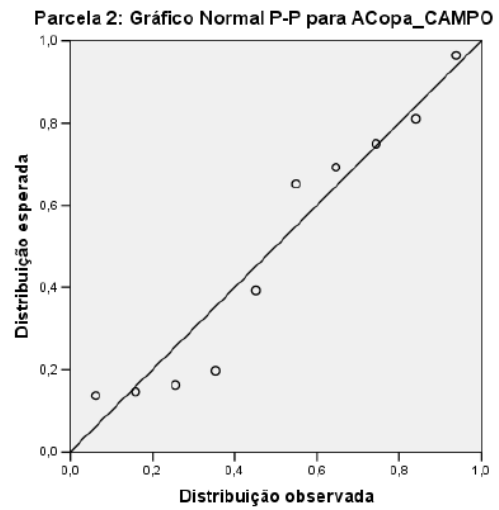
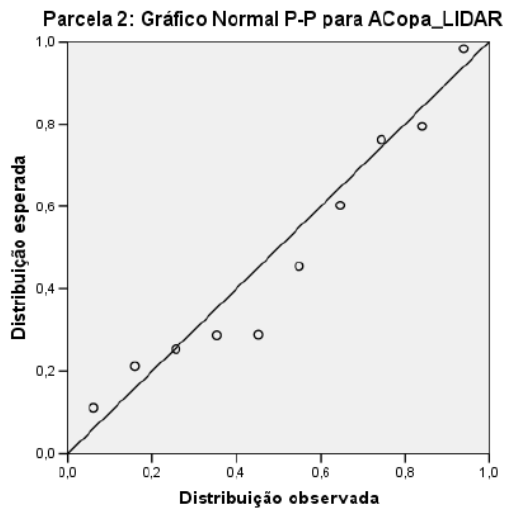
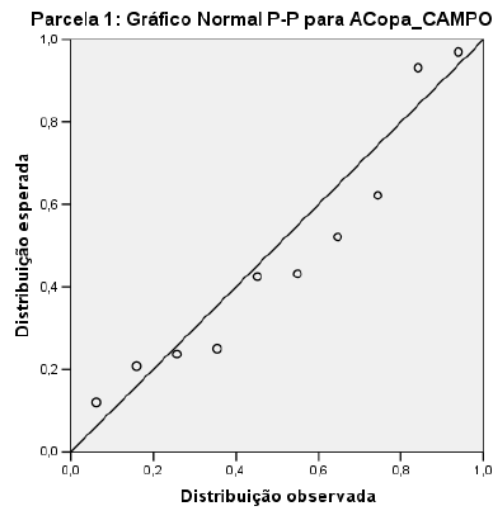
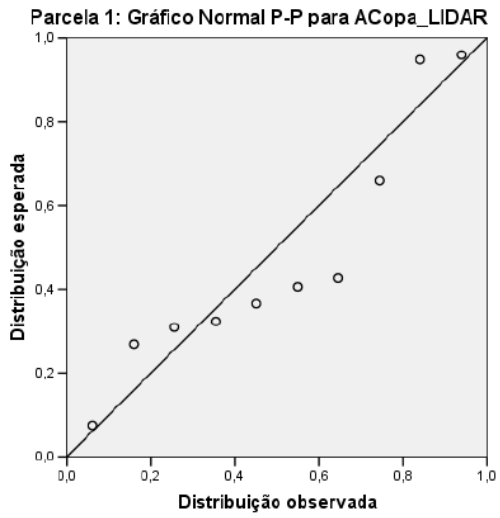


Figura 27 - Gráfico Normal P-P das parcelas analisadas

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi a de verificar a capacidade de medição de área de copa de árvores num ambiente florestal nativo a partir de dados provenientes de um sistema ALS, baseado na tecnologia LIDAR, utilizando um método de segmentação de imagens. A possibilidade de interpolação da nuvem de pontos gerada com a tecnologia LIDAR e subsequente criação de uma grade regular de *pixels* enriquecem as formas de processamento e aplicação deste tipo de dado de sensoriamento remoto, principalmente pela sua característica de prover informação de altura, que, particularmente, potencializa o estudo da vegetação. O método de interpolação dos pontos por convolução cúbica se mostrou uma etapa crucial e de grande importância para os bons resultados alcançados, pois teve a propriedade de conservar as formas mais próximas do real, sendo que os outros métodos avaliados não tiveram boas respostas no que diz respeito à conservação das formas das copas arbóreas.

O critério de análise de limiares de similaridade e área baseado na chave de fotointerpretação se mostrou uma boa alternativa para uma avaliação inicial dos segmentos formados no MDAA, influenciando diretamente nos bons resultados alcançados posteriormente na análise quantitativa da segmentação. O conhecimento de campo também se mostrou importante nesta fase de interpretação. Esta forma de avaliação indica também boas perspectivas na integração de dados LIDAR com informações provenientes de fotos aéreas, apesar de não terem sido feitos testes substanciais neste sentido.

Os resultados apresentados no item 4.5 demonstram que é possível a medição de área da copa de árvores individuais com boa precisão, comprovado pelos altos coeficientes de correlação e de determinação entre as variáveis ACopa_LIDAR e ACopa_CAMPO, mostrando alta correspondência entre as medidas de campo e as extraídas por meio da tecnologia LIDAR, indicando assim a boa capacidade de segmentação das copas das árvores pelo método testado. Foi observado também que as medidas de área de copa

extraídas a partir dos dados LIDAR nesta investigação tiveram a tendência superestimar o tamanho da copa das árvores, fato comprovado pela análise de regressão. Os resíduos de regressão mostraram-se bem distribuídos e sem tendências não-paramétricas.

Outro aspecto que merece destaque e que influencia nos resultados é o filtro aplicado para a suavização do MDAA, que dependendo do grau de suavização, pode fundir árvores ou dividir uma única árvore em diversas árvores, comprometendo a individualização das mesmas pelo algoritmo. O filtro utilizado neste estudo se mostrou eficiente para a resolução e tamanho das imagens trabalhadas, porém em situações onde ocorram parâmetros diferentes, devem ser testados diferentes filtros, buscando os melhores resultados.

Os resultados se mostraram promissores, no entanto, devem ser realizados novos estudos utilizando um conjunto maior de amostras. Deve-se incentivar também a utilização de diferentes metodologias de mensuração de copa em campo, pois esta é uma tarefa difícil de realizar e métodos acurados podem melhorar as análises de dependência entre dados medidos em campo e os extraídos por LIDAR. Observando que são poucos os métodos de avaliação quantitativa de processos de segmentação, a utilização de diferentes técnicas estatísticas pode incrementar estudos desta natureza.

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 difícil mensuração em campo é uma variável pouco incluída nestes modelos. Neste contexto a mensuração indireta por meio da tecnologia LIDAR demonstrou um bom 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.

BRANDALIZE, M. C. B. **A Qualidade Cartográfica dos Resultados do Laserscanner Aerotransportado**. Tese de doutorado. UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2004.

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.

CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. C. P. SPRING: integrating remote sensing and GIS with object-oriented data modeling. **Computer and Graphics**, v.15, n.6, p. 13-22, 1996.

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.

DIAS, G. **Educação Ambiental: Princípios e práticas**. 9ª Ed. São Paulo: Gaia, 2004, 551p.

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)

FLIGHTSIM. Figura ilustrando a atitude da Aeronave. Disponível em: www.flightsim.com/feature/atwcdk5/image010.jpg. Acesso em 13 jun. 2010.

GONZALEZ, R. F.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais.** São Paulo: EdgardBlucher, 2000, 509p.

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. Agriculturae Sueciae, Silvestria, 278.Umeå, Suécia, 2003.

HYYPPÄ, 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. **Filtragem e classificação de pontos laser scanner utilizando o software Terrascan**. In: Geodésia Online. Anais, Florianópolis, 2004.

MAGNUSSEN, S.; EGGERMONT, P.; LARICCIA, 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.

MISSISSIPPI STATE UNIVERSITY. **Figura ilustrando a detecção de copas por LIDAR.** Disponível em: <http://www.cfr.msstate.edu/forestry>. Acesso em 13 jun. 2010.

MISSISSIPPI STATE UNIVERSITY. **Figura ilustrando os pulsos LASER que refletem na copa de uma árvore.** Disponível em: <http://www.cfr.msstate.edu/forestry>. Acesso em 13 jun. 2010.

MOIGNE, J. L.; TILTON, J. C. Refining image segmentation by integration of edge and region data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n.3, 1995.

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.

PEKKARINEN, A. A method for the segmentation of very high spatial resolution images of forested landscapes. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 14, p. 2817-2836, 2002.

PERSOON, 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.

SILVA, J.A.A.; PAULA NETO, F. **Princípios básicos de dendrometria**, Viçosa: Ed. UFV, 1979, 276p.

SITHOLE, G.; VOSELMAN, 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.

TORRES, J. M. C. HEMERLY, E. M. **Caracterização de sensor inercial aplicação em barco autônomo**. VIII Encontro de iniciação científica e pós-graduação do ITA, São José dos Campos, SP, p. 157-163, 2002.

USGS. **Imagem do Sistema ALS baseado na tecnologia LIDAR**. Disponível em: <http://gulfsci.usgs.gov/tampabay/data/1mapping/lidar>. Acesso em 13 jun. 2010.

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.

WEHR A.; LOHR, U. Airborne Laser Scanning – An Introduction and Overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n.4, p. 68-82. 1999.

ZHANG, Y. J. A survey on evaluation methods for image segmentation. **Pattern Recognition**, Kidlington, v.29, n.8, p. 1335-1346, 1996.

Zucker, S. W. Region growing: childhood and adolescence. **Computer Graphics and Image Processing**. v. 15, 382-399 p.1976.