

ALAN SCHREINER PADILHA

**EMPREGO DE DADOS *LASER SCANNER* TERRESTRE E DE SENSORES
EMBARCADOS EM VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA A
EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Benedito Schimalski

**LAGES, SC
2017**

Schreiner Padilha, Alan
Emprego de dados *LASER scanner* terrestre e de sensores embarcados em veículos aéreos não tripulados para a extração de variáveis dendrométricas / Alan Schreiner Padilha. - Lages, 2017.

109 p.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Benedito Schimalski

Bibliografia: p.103

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2017.

1. nuvem de pontos. 2. varreduras múltiplas. 3. ortoimagem. 4. *Eucalyptus spp.* 5. *Pinus spp.* I. Benedito Schimalski, Marcos. II. Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Emprego de dados *LASER scanner* terrestre e de sensores embarcados em veículos aéreos não tripulados para a extração de variáveis dendrométricas.

Ficha catalográfica elaborada pelo autor, com
auxílio do programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC

ALAN SCHREINER PADILHA

**EMPREGO DE DADOS *LASER SCANNER* TERRESTRE E DE SENSORES
EMBARCADOS EM VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA A
EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS**

Dissertação referente ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias, pertencente à Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Florestal tendo como concentração a área de produção florestal.

Banca Examinadora:

Orientador: _____
Prof. Dr. Marcos Benedito Schimalski
Centro de Ciência Agroveterinárias - CAV/UDESC

Membro: _____
Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita
Universidade Federal do Paraná - UFPR

Membro: _____
Prof. Dr. Thiago Floriani Stepka
Centro de Ciência Agroveterinárias - CAV/UDESC

Suplente: _____
Prof. Dr. Veraldo Liesenberg
Centro de Ciência Agroveterinárias - CAV/UDESC

Lages, 22 de fevereiro de 2017.

À família e amigos dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

...A minha família, em especial à minha mãe Gilda Maria Schreiner Padilha e à minha esposa Luana Aparecida Levandoski, pelo amor, incentivo e por sempre entenderem todo meu período de ausência em decorrência dos estudos.

Aos meus orientadores, Prof. Marcos Benedito Schimalski e Prof. Veraldo Liesenberg, por todo apoio e confiança depositada em mim.

Aos professores Edson Aparecido Mitishita e Thiago Floriani Stepka, pela participação na banca examinadora.

E ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do CAV/UDESC pela oportunidade deste mestrado.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a extração de variáveis dendrométricas tais como a altura total (h), diâmetro a altura do peito (DAP) e diâmetro em diferentes alturas do tronco a partir de dados derivados de TLS, sensores embarcados em VANT bem como a sua integração. A área de estudo consiste em um plantio misto, com espécies dos gêneros *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*, e área aproximada de 4.200 m². Os dados TLS foram coletados à campo, empregando o método de varreduras múltiplas. O recobrimento foi realizado com VANT a uma máxima de 120 metros. Todos os dados foram referenciados ao Sistema Geodésico Brasileiro mediante a coleta de observações para o campo. Para a validação dos resultados foram coletados dados utilizando técnicas e equipamentos tradicionais. O pré-processamento e processamento dos dados foram realizados empregando os aplicativos computacionais Scene, CloudCompare e Photoscan/Agisoft. Para a extração das variáveis dendrométrica empregaram-se os aplicativos Python e DetecTree. A detecção das árvores a partir de dados TLS obteve um acerto de 98,98%. Por outro lado, a detecção das árvores individual de árvores, usando somente a ortoimagem não obteve bons resultados. Quando comparada a verdade de campo, os diâmetros obtidos a 1,30 m (DAP) e a 3,3 metros de altura, apresentaram igualdade estatística ao nível de significância de 5%. No entanto, a metodologia usada para extração da altura total neste estudo, não apresentou igualdade estatística ao nível de significância de 5%.

Palavras chave: nuvem de pontos, varreduras múltiplas, ortoimagem, *Eucalyptus spp.*, *Pinus spp.*

ABSTRACT

The objective of this work is to extract different dendrometric variables such as total forest height (h), stem diameter at the breast height (DBH), volume (V) and stem diameter at regular height intervals (Hx) directly from cloud points data derived from both terrestrial laser scanning (TLS) measurements alone, from a sensor coupled to Unmanned Aircraft Vehicle System (UAVS) alone. The data integration of cloud points derived from both TLS and UAVS measurements was also experimented. The study area is a planted forest stand with species of both *Pinus spp.* and *Eucalyptus spp.*. The forest stand has an area of approximately 4,200 m². TLS data were collected in the field using the multiple scanning method. The UAVS flight considering an height flight up to 400 feet. All data were the referenced to the Brazilian Geodetic System. The results were validated using the data obtained through traditional topographical and forest dendrometric techniques. Cloud point datasets were processed using the softwares Faro Scene, CloudCompare and Photoscan / Agisoft. Afterwards, the dendrometric variables were extracted using both Python and DetecTree softwares. The method of individual tree detection from TLS data alone obtained 98,98% of accuracy. Whereas, the tree detection using only the UAVS data performed worse. The stem diameters obtained at 1.30m (DBH) and at 3.3 m were statistically similar, at the significance level of 5%. However, the methodology used for total height extraction didn't present statistical similarity at the significance level of 5%.

Keywords: cloud of points, multiple scans, orthophoto, *Eucalyptus spp.*, *Pinus spp.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aplicações do TLS nas diferentes áreas do conhecimento.....	32
Figura 2 - Divisão do <i>LASER scanner</i> segundo seus princípios de medição.	33
Figura 3 - Princípio da triangulação.....	33
Figura 4 - Princípio da varredura baseada na diferença de fase.	34
Figura 5 - Princípio da varredura baseado no intervalo de tempo.	35
Figura 6 - Tipos de retornos do <i>LASER</i>	36
Figura 7 - Varredura TLS. (A) Varredura simples na primeira estação. (B) Varredura simples na segunda estação. (A e B) Varreduras múltiplas, pontos referenciados em um mesmo sistema de coordenadas.	37
Figura 8 - Projeto Acauã.....	41
Figura 9 - Projeto ARARA.....	42
Figura 10 - Conceito de Operação de um VANT.	44
Figura 11 - Contagem da copa das árvores em parcelas marcadas em fotografias.	46
Figura 12 - Modelo digital da superfície do terreno utilizando o programa LPS.	47
Figura 13 - Quantificação de áreas de solo. a) Canais NIR-G-R; b) NDVI; c) NDVI com pseudo cores no modelo HSV.....	48
Figura 14 - Nuvens de pontos ALS.....	49
Figura 15 - Nuvens de pontos SfM.	49
Figura 16 - Localização da área de estudo.....	50
Figura 17 - Equipamento TLS utilizado.....	51
Figura 18 - Alvos utilizados no levantamento de dados. a) Alvo esférico; b) alvo plano.	52
Figura 19 - Modelo do receptor GNSS usado para o georreferenciamento.....	53
Figura 20 - Método de posicionamento relativo.....	53
Figura 21 - Distribuição de pontos e alvos na área.	54
Figura 22 - Etapas do pré-processamento e processamento no aplicativo Scene. ...	56
Figura 23 - Nuvem de pontos monocromática carregada no aplicativo CloudCompare com presença de <i>outliers</i>	57
Figura 24 - Nuvem de pontos com remoção de outliers e pontos duplicados utilizando o aplicativo CloudCompare.	58
Figura 25 - a) Seleção da área para o recorte das seções transversais; b) Seções transversais obtidas a partir do recorte.	59

Figura 26 - Nuvem de pontos dos novos arquivos criados. a) Recorte 1; b) Recorte 2; c) Recorte 3; d) Recorte 4.	60
Figura 27 - Modelo de VANT utilizado.	61
Figura 28 - Ortoimagem com a disposição dos pontos de apoio.	63
Figura 29 - Etapas do processamento dos dados VANT no aplicativo Photoscan/Agisoft.	64
Figura 30- Recorte da nuvem de pontos fotogramétrica gerada no aplicativo Photoscan/Agisoft.	65
Figura 31- Ortoimagem georreferenciada gerada no aplicativo Photoscan/Agisoft, com a indicação da área de estudo.	65
Figura 32 - Demarcação das árvores. a) Árvore selecionada do gênero <i>Eucalyptus spp.</i> ; b) Árvore selecionada do gênero <i>Pinus spp.</i>	67
Figura 33 - Croqui das árvores selecionadas à campo.	68
Figura 34 - Fluxograma das etapas realizadas para a detecção e cálculo das coordenadas das árvores.	70
Figura 35 - Fluxograma das etapas realizadas para a individualização das árvore.	71
Figura 36 - Fluxograma das etapas para extrair os diâmetros.	73
Figura 37- Fluxograma das etapas para a extração da altura total.	73
Figura 38 - Fluxograma das etapas de extração da altura total a partir da integração de dados TLS e dados obtidos por meio de sensores embarcados em um VANT.	75
Figura 39 - Fluxograma para a extração da altura total utilizando as coordenadas de Z baseadas na nuvem fotogramétrica.	76
Figura 40 - Nuvem de pontos 3D georreferenciada.	79
Figura 41 - Filtragem da nuvem de pontos fotogramétrica	80
Figura 42 - DTM gerado após a interpolação dos pontos.	81
Figura 43 - Envelope criado para a inividualização das árvores de interesse utilizando o aplicativo Python	82
Figura 44 - Exemplo das representações gráficas criadas no Python. a) Exemplo de seções transversais detectadas em 3D; b) Perfil das árvores em 2D; c) Gráfico em 3D do envelope sob diferentes perspectivas.	83
Figura 45 - Representação gráfica. a) total de seções transversais das árvores selecionadas com a localização espacial da árvore omitida. b) total de árvores detectadas e a localização espacial da árvore omitida.	84

Figura 46 - Sobreposição das seções transversais da nuvem de pontos TLS mensuradas à campo, representada por pontos verdes, e das coordenadas detectadas, representadas pelas estrelas vermelhas.....	85
Figura 47 - Quadro com a lista das coordenadas centrais ($X_c; Y_c$) em metros obtidas utilizando o Python.	86
Figura 48 - Amostras das representações gráficas em 3D seções transversais detectadas.....	88
Figura 49 - Pontos referentes as árvores detectadas a partir da ortoimagem, e pontos com a área de envelope utilizado como parâmetro.....	89
Figura 50 - Inclinação das árvores. Exemplos de árvores obtidas a partir da nuvem de pontos TLS.	90
Figura 51 - Causas dos erros de superestimativas dos diâmetros.	93
Figura 52 - Coeficiente de determinação e gráfico de resíduos.	96
Figura 53 - Exemplo de envelopes contendo pontos de árvores vizinhas.	98
Figura 54 - Integração das nuvens de pontos obtidas com VANT e TLS.	100
Figura 55 - Coeficiente de determinação e gráfico de resíduos.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Categorias de VANT's.....	45
Tabela 2-	Especificações técnicas do equipamento Faro <i>LASER scanner</i> Focus 3D 120.	51
Tabela 3 -	Resumo dos arquivos criados e usados como fonte de dados para a extração das variáveis dendrométricas a partir de dados TLS.....	61
Tabela 4 -	Especificações do veículo eBee.....	62
Tabela 5 -	Especificações de operação do veículo eBee.....	62
Tabela 6 -	Resumo dos arquivos criados e usados como fonte de dados para a extração das variáveis dendrométricas a partir de sensores embarcados em VANT.....	66
Tabela 7 -	Índices de acurácia para a detecção das árvores a partir dos dados TLS.	87
Tabela 8 -	Índices de acurácia para a detecção das árvores a partir da ortoimagem.	90
Tabela 9 -	Estatística descritivas para os métodos de extração do di	92
Tabela 10 -	Teste de normalidade de Shapiro-Wilk.	94
Tabela 11-	Teste de F ao nível de significância de 5%.	95
Tabela 12 -	Estatística descritiva para os método de extração da altura total.	97
Tabela 13 -	Teste de normalidade de Shapiro-Wilk para os métodos de extração da altura total.....	98
Tabela 14 -	Teste de F ao nível de significância de 5% aplicado às metodologias para a extração da altura total.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALS - *Airborne Laser Scanner*
ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações
CCD - *Charge Coupled Device*
CenPra - Centro de Pesquisas Renato Archer
DAP - Diâmetro à altura do peito
DECEA - Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DSM - *Digital Surface Model*
DTM - *Digital Terrain Model*
G - Área basal
GIS - *Geographic Information System*
GNSS - *Global Navigation Satellite System*
GPS - *Global Position System*
IDW (*Inverse Distance Weighting*)
IMU - *Inertial Measurement Unit*
LASER - *Light Amplification by Stimulated of Radiation*
LIDAR - *Light Detection and Ranging*
MASER - *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
MED - Medidor Eletrônico de Distâncias
NOTAM - *Notice to Airmen*
OACI - Organização da Aviação Civil Internacional
RPA - *Remotely-Piloted Aircraft*
RPAS - *Remotely-Piloted Aircraft System*
SAR - *Synthetic Aperture Radar*
SARPAS - Solicitação de Autorização de Acesso ao Espaço Aéreo por RPAS
SfM - *Structure from Motion*
SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico das Américas
SISVANT - Sistema de Veículo Aéreo Não Tripulado
SOR - *Statistical Outlier Remove*
TLS - *Terrestrial LASER Scanning*
UAS - *Unmanned Aerial System*
UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*
UTM - Universal Transversa de Mercator
VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	28
1.2	HIPÓTESES	29
1.3	OBJETIVO GERAL.....	29
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	31
2.1	VARREDURA <i>LASER</i> - ESTADO DA ARTE	31
2.1.1	Varredura <i>LASER</i> terrestre	32
2.1.1.1	<i>Aplicações do TLS em ciências florestais.....</i>	<i>36</i>
2.2	VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS	39
2.2.1	O Sistema de Veículo Aéreo Não Tripulado - SISVANT	43
2.2.1.1	<i>Aplicações dos VANT em ciências florestais.....</i>	<i>45</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1	ÁREA DE ESTUDO	50
3.2	FONTE DE DADOS.....	51
3.2.1	Dados TLS.....	51
3.2.1.1	<i>Levantamento dos dados TLS à campo</i>	<i>51</i>
3.2.1.2	<i>Levantamento dos dados para o georreferenciamento da nuvem de pontos</i>	<i>53</i>
3.2.1.3	<i>Pré-processamento e processamento dos dados TLS.....</i>	<i>55</i>
3.2.2	Dados dos sensores embarcados em um VANT	61
3.2.2.1	<i>Recobrimento aéreo</i>	<i>61</i>
3.2.2.2	<i>Levantamento dos pontos de apoio.....</i>	<i>62</i>
3.2.2.3	<i>Processamento dos dados obtido a partir de sensores embarcado em um VANT.....</i>	<i>64</i>
3.2.3	Dados obtidos utilizando técnicas tradicionais.....	66
3.2.3.1	<i>Demarcação e seleção das árvores</i>	<i>66</i>
3.2.3.2	<i>Coleta das variáveis dendrométricas empregando técnicas convencionais.....</i>	<i>68</i>
3.3	EXTRAÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS.....	69
3.3.1	Extração das variáveis dendrométricas a partir de dados TLS.....	69
3.3.1.1	<i>Determinação do número de árvores com suas respectivas coordenadas ..</i>	<i>69</i>
3.3.1.2	<i>Determinação do DAP e diâmetros a diferentes alturas.....</i>	<i>70</i>

3.3.1.3	<i>Determinação da altura total.....</i>	73
3.3.2	Extração das variáveis dendrométricas a partir de sensores embarcados em um VANT	74
3.3.2.1	<i>Determinação do número de árvores e suas coordenadas</i>	74
3.3.2.2	<i>Determinação da altura total.....</i>	74
3.4	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS ÁRVORES INDIVIDUAIS	76
3.5	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	76
3.5.1	Avaliação das metodologias usadas para a detecção das árvores	77
3.5.2	Avaliação das metodologias aplicadas para a extração dos diâmetros e alturas.....	77
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1	PROCESSAMENTO DOS DADOS	79
4.1.1	Registro e georreferenciamento da nuvem de pontos TLS	79
4.1.2	Filtragem da nuvem de pontos fotogramétrica empregando o aplicativo CloudCompare e DTM gerado no aplicativo 3DForest	80
4.1.3	Envelope gerado empregando o aplicativo Python.....	81
4.1.4	Representação gráfica dos dados utilizando o aplicativo Python	82
4.2	AVALIAÇÃO DO MÉTODO PARA DETECÇÃO DAS ÁRVORES A PARTIR DOS DADOS TLS.....	83
4.3	DETECÇÃO DAS ÁRVORES A PARTIR DA ORTOIMAGEM.....	89
4.4	AVALIAÇÃO DO MÉTODO PARA A EXTRAÇÃO DOS DIÂMETROS.....	91
4.5	AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS PARA A EXTRAÇÃO DA ALTURA TOTAL ..	96
5	CONCLUSÕES	101
6	RECOMENDAÇÕES	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

1 INTRODUÇÃO

O objetivo da Biometria Florestal é estudar e desenvolver métodos e equipamentos, com a finalidade de determinar quantitativamente e qualitativamente, o volume de madeira e a capacidade produtiva de uma floresta (FINGER, 1992).

Tradicionalmente são utilizados para os levantamentos dendrométricos, equipamentos operacionalmente simples e de custo relativamente baixo. A confiabilidade, qualidade e precisão obtidas nas medidas realizadas, fica atrelada ao tipo de equipamento e na experiência e dedicação do operador.

Novas metodologias aplicadas para a obtenção de informações biométricas a respeito de um maciço florestal, são cada vez mais investigadas por estudantes e pesquisadores. Empregando instrumentos e técnicas não convencionais, o intuito é aumentar a precisão e a confiabilidade dos dados coletados à campo.

Neste contexto inovador, as crescentes aplicações de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado; do inglês *UAV - Unmanned Aerial Vehicle*), no setor florestal são gradativamente mais comuns. E de maneira semelhante, o TLS (*Terrestrial LASER scanning* ou Varredura *LASER* Terrestre) que faz uso da tecnologia *LIDAR (Light detection and ranging)*.

A tecnologia *LIDAR* tem apresentado um grande potencial em diversas áreas, com características otimizadas quando confrontadas com métodos tradicionais para a coleta de dados. A plataforma TLS apresenta grande potencial na área florestal, e suas informações poderão ser usadas para diferentes finalidades na gestão florestal (LINGNAU et al., 2007).

Porém, o uso do TLS ainda se apresenta como um desafio, devido a complexidade da estrutura da floresta (DASSOT; CONSTANT; FOURNIER, 2011). É sabido que a presença de sub-bosque e galhos, afetarão a coleta dos dados.

Além dos dados sobre o tronco das árvores, elementos como a altura total, diâmetros à diferentes alturas e área da copa, são altamente relevantes para se determinar diversas variáveis relacionadas à produção e ao manejo florestal. No entanto, estas são difíceis de serem obtidas à campo, principalmente em condições de alta densidade de árvores, ou em florestas mal manejadas.

A extração de informações métricas da superfície terrestre, tem sido pesquisada densamente nos últimos anos, porém, a utilização de VANT na Fotogrametria está em desenvolvimento, e quase tudo que se conhece é resultado de

publicações de estudos realizados nos principais centros de pesquisa (MITISHITA et al., 2014).

A Fotogrametria fornece informações sobre a distribuição vertical dos objetos no solo, por meio de processos estereoscópicos. Com o rápido desenvolvimento dos VANT, e de programas computacionais para o processamento dos dados, fez com que a Fotogrametria se tornasse mais rápida e simples, se comparadas às tecnologias empregadas até então (NI et al., 2015).

Utilizando operações tradicionais de estereoscopia, com geometrias bem definidas, e capturando diversas imagens de ângulos diferentes à campo, é gerado uma nuvem de pontos 3D (WALLACE et al., 2016). Uma nuvem de pontos, representa a interseção de diferentes visadas/perspectivas sobre objetos encontrados sobre a superfície.

Da nuvem de pontos, é possível extrair informações sobre a estrutura das copas das árvores, complementando desta forma os dados obtidos com a plataforma TLS.

Dentro deste contexto, o corrente estudo foi desenvolvido com a finalidade de avaliar os resultados obtidos individualmente e em conjunto, utilizando as tecnologias TLS e VANT, para a extração das variáveis dendrométricas: diâmetro à altura do peito (DAP), diâmetros a diferentes alturas (d_i), número de árvores (N) e altura total (h).

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A tecnologia *LASER scanner* terrestre permite a automação dos procedimentos de coleta, e o processamento dos dados dendrométricos, evitando possíveis erros humanos (BUCK et al., 2012). Variáveis como o DAP, área basal (G), diâmetro a diferentes alturas (d_i), número de árvores (N) e qualidade do fuste, são obtidos com acurácia e rapidez. No entanto, sua aplicação é limitada a pequenas áreas, e parâmetros na região das copas são de difícil obtenção devido aos obstáculos existentes (LINGNAU et al., 2009; LINGNAU et al., 2010; GATZIOLIS et al., 2010; SILVA, 2011a; MARTINS NETO et al., 2012; BUCK, 2012).

A utilização dos VANT vem ganhando espaço devido a sua agilidade para o levantamento de dados, e rapidez no processamento. Também se destacam pela sua resolução espacial e temporal (BRAZ et al., 2015). Esta tecnologia tem-se

apresentado promissora para a obtenção de imagens dos plantios para serem utilizadas na gestão das florestas. Informações como a sobrevivência, uniformidade e área de copa em plantios, são possíveis de serem determinadas com precisão adequada (ARAÚJO; CHAVIER; DOMINGOS, 2006). Porém, a obtenção de informações sobre o tronco como o DAP, área basal e o diâmetro em diferentes alturas, são difíceis de serem determinados. E a integração dos dados pode minimizar as limitações apresentadas por ambas as tecnologias, viabilizando a obtenção de maior número de informações sobre a floresta.

Neste sentido, esta pesquisa de mestrado consiste na avaliação dos dados individuais e integrados, obtidos pela varredura *LASER* terrestre, e por sensores embarcados em um VANT, para a determinação de forma indireta dos parâmetros biométricos de uma floresta plantada.

1.2 HIPÓTESES

A integração dos dados *LASER scanner* terrestre, e de informações derivadas de sensores embarcados em VANT, pode resolver as limitações que cada uma das tecnologias apresentam numa determinada aplicação.

O emprego destas tecnologias, pode não apresentar diferença estatística significativa entre os parâmetros dendrométricos obtidos por métodos convencionais, e os adquiridos pelos sensores remotamente situados.

1.3 OBJETIVO GERAL

Integrar os dados obtidos com *LASER scanner* terrestre, com os dados obtidos por sensores embarcados em Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT).

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o pré-processamento e o processamento da nuvem de pontos gerada pela varredura do TLS;
- Realizar o processamento das informações obtidas a partir dos sensores embarcados em um VANT;

- Extrair as variáveis dendrométricas a partir dos dados individuais e integrados obtidos pelos sensores:
- Analisar as variáveis dendrométricas obtidas;
- Comparar os resultados obtidos, com os dados levantados por métodos tradicionais.
- Gerar as representações gráficas bidimensionais e tridimensionais dos dados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 VARREDURA *LASER* - ESTADO DA ARTE

O *LASER* (*Light Amplification by Stimulated of Radiation*) foi criado em 1960 por Theodore H. Maiman, tendo como precedente a publicação de um artigo de Albert Einstein no ano de 1917, em que ele sugeriu a emissão estimulada de radiação luminosa e incentivou a criação de amplificadores e osciladores. E também da invenção em 1954 do *MASER - Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (BRANDALIZE; PHILIPS, 2002; GONÇALES, 2007).

"O princípio de funcionamento do *LASER* está na emissão estimulada de ondas eletromagnéticas na região do visível, do infravermelho e do ultravioleta." (BRADALIZE; PHILIPS, 2002).

A coerência da luz emitida por um *LASER* é a sua característica mais relevante. Isto quer dizer que todos os raios de luz possuem o mesmo comprimento de onda ou cor, e que também estão todos alinhados ou em fase. Como a energia emitida não se dissipa quando os raios de luz aumentam, este efeito admite concentrá-lo em um ponto bem definido aumentando o seu alcance (BRANDALIZE; PHILIPS, 2002; CARROLL, 1978).

Outra propriedade importante das ondas de luz (*LASER*) é a sua velocidade de propagação. A velocidade finita e constante em que as ondas de luz se propagam em um determinado meio permite a mensuração de objetos (LEONARDO DA VINCI, 2008).

O *LASER scanner* terrestre utiliza esta tecnologia para obter distâncias com alta precisão. E a partir da associação de ângulos torna-se possível o cálculo de posições tridimensionais dos pontos imageados. Como resultado tem-se uma nuvem densa de pontos tridimensionais, a qual pode ser utilizada para a coleta rápida e acurada de dados altamente detalhados com uma ampla variedade de aplicações (SILVA, 2013).

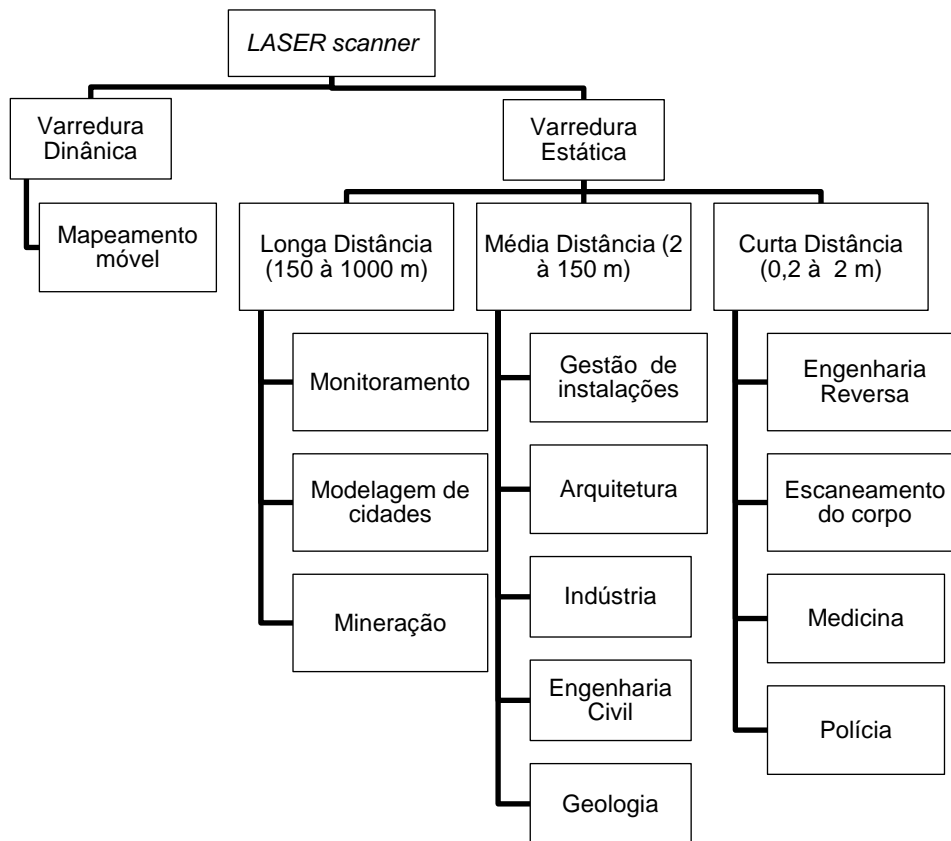
Devido as vantagens oferecidas pelo *LASER scanner* diversas áreas da ciência fazem uso desta tecnologia (LEONARDO DA VINCI, 2008). No estágio atual o *LASER scanner* pode ser separado em duas categorias: estático e dinâmico. Quando a aquisição de dados é realizada com o equipamento fixado em uma posição, este é

denominado de estático. E quando este é montado em uma plataforma móvel é denominado de dinâmico.

A vantagem da varredura estática está na alta densidade de pontos e na precisão milimétrica dos mesmos. Enquanto que na varredura dinâmica a grande vantagem está no tamanho da área levantada (por exemplo em um recobrimento aéreo), porém este método requer sistemas de posicionamentos complementares, tais como GPS (*Global Position System*) e IMU (*Inertial Measurement Unit*).

A Figura 1 mostra as aplicações do TLS de acordo com as categorias citadas.

Figura 1 - Aplicações do TLS nas diferentes áreas do conhecimento.



Fonte: Adaptado de LEONARDO DA VINCI, 2008.

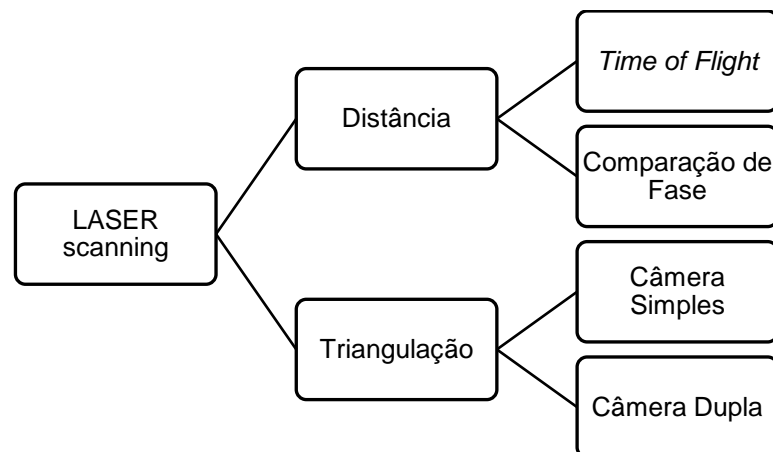
2.1.1 Varredura *LASER* terrestre

Os sistemas *LASER scanner* trabalham basicamente da mesma forma que um medidor eletrônico de distâncias (MED), ou seja, por meio de um transmissor um pulso é emitido e recebido após ser refletido por um objeto. Este retorna ao receptor sendo

possível determinar a distância. Porém, em um sistema *LASER scanner* além da distância também é necessário coletar dados sobre as direções para se obter as coordenadas tridimensionais dos pontos imageados.

De acordo com Kaspar et al. (2004), os equipamentos *LASER scanner* podem ser divididos segundo seus princípios de medição (Figura 2).

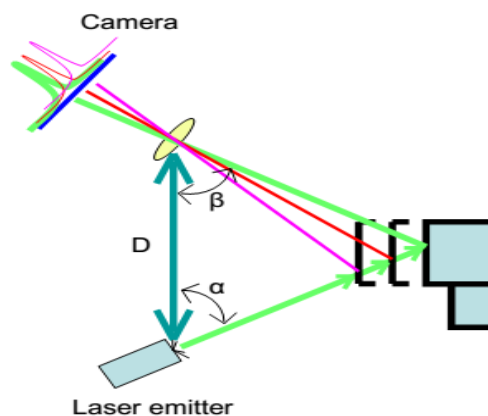
Figura 2 - Divisão do *LASER scanner* segundo seus princípios de medição.



Fonte: Adaptado de KASPAR et al., 2004.

Os equipamentos baseados no princípio da triangulação possuem uma fonte *LASER*, e um ou mais sensores CCD (*Charge Coupled Device*) de câmeras digitais que capturam a luz refletida pelos objetos. Como a geometria entre o sensor CCD e o emissor *LASER* são conhecidas, então é possível determinar as coordenadas tridimensionais (LEONARDO DA VINCI, 2008) (Figura 3).

Figura 3 - Princípio da triangulação.



Fonte: LEONARDO DA VINCI, 2008.

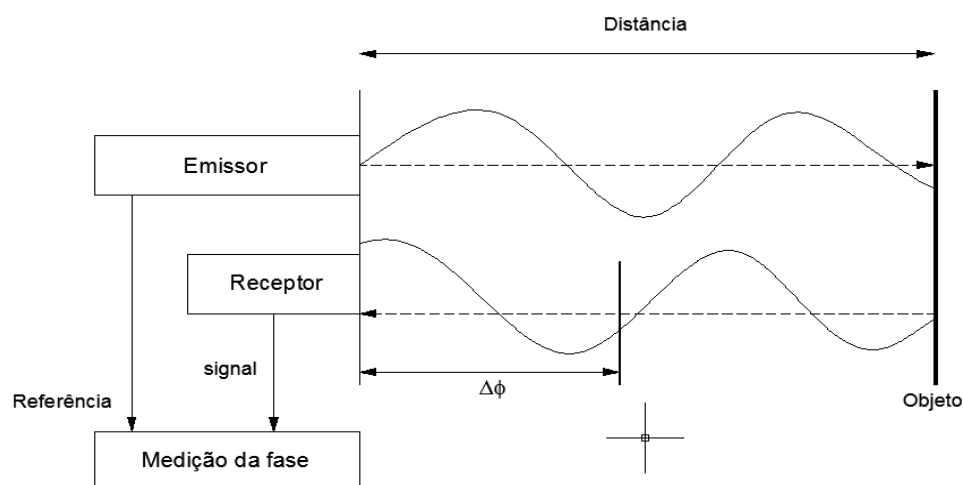
Analisando a Figura 3, tem-se que o lado (D) do triângulo, que é a distância entre o *LASER* emitido e a câmera CCD é conhecido, assim como o ângulo de emissão do feixe (α). O ângulo (β) é determinado observando a direção do feixe *LASER* no campo de visão da câmera CCD. A partir destas informações é possível determinar a posição tridimensional do objeto medido, através do tamanho e forma do triângulo (LEONARDO DA VINCI, 2008).

Um problema apresentado por este método é a identificação do ponto *LASER* refletido e registrado pelo sensor CCD, que pode ser limitado pela distância do objeto e pela iluminação do local (NASCIMENTO JÚNIOR; SCHULER; CAVALCANTE, 2006).

Este sistema é adequado para objetos pequenos, e a precisão das coordenadas 3D está no nível sub-milimétrico, dependendo da distância do objeto (WUTKE, 2006).

O *LASER scanner* baseado na diferença de fase estima as distâncias baseado na análise entre a diferença de fase emitida e recebida (Figura 4). Onde somente um retorno é gravado para cada direção. Este tipo de instrumento permite mensurar uma elevada quantidade de pontos com alta velocidade de aquisição (DASSOT; CONSTANT; FOURNIER, 2011). Porém, tem uma faixa restrita na qual os dados podem ser coletados (até 150 metros). Acima desta faixa os dados coletados resultam em distâncias equivocadas que se confundem com as distâncias corretas dos demais alvos (SILVA, 2011).

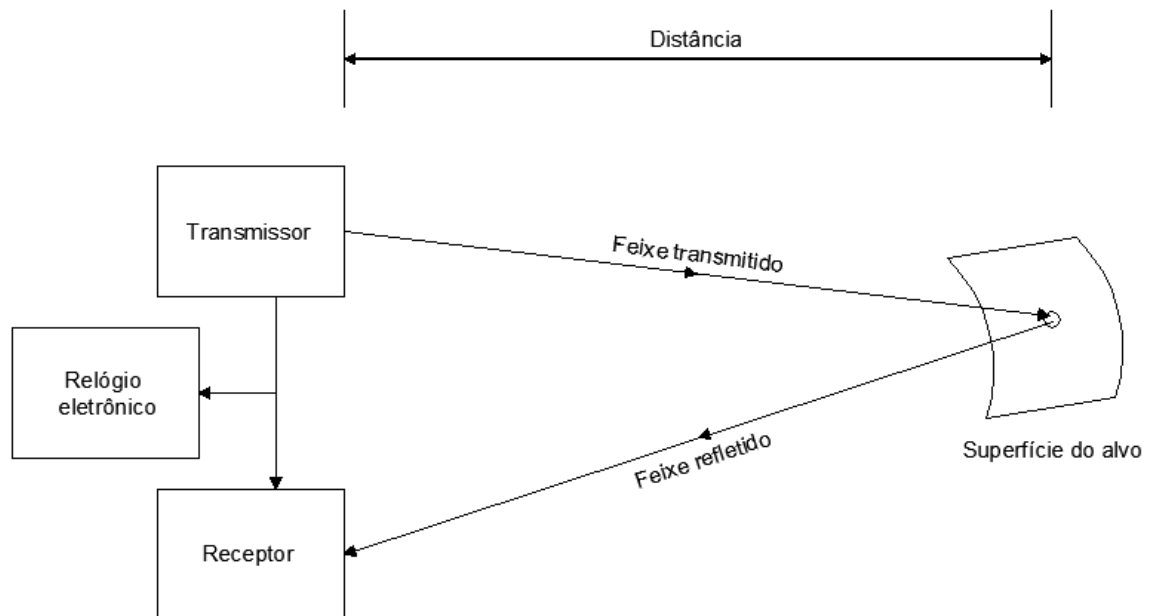
Figura 4 - Princípio da varredura baseada na diferença de fase.



Fonte: Adaptado de LEONARDO DA VINCI, 2008.

A tecnologia mais utilizada pelos sistemas TLS são aquelas baseadas no intervalo de tempo ou "*Time-of-flight*" (Figura 5).

Figura 5 - Princípio da varredura baseado no intervalo de tempo.



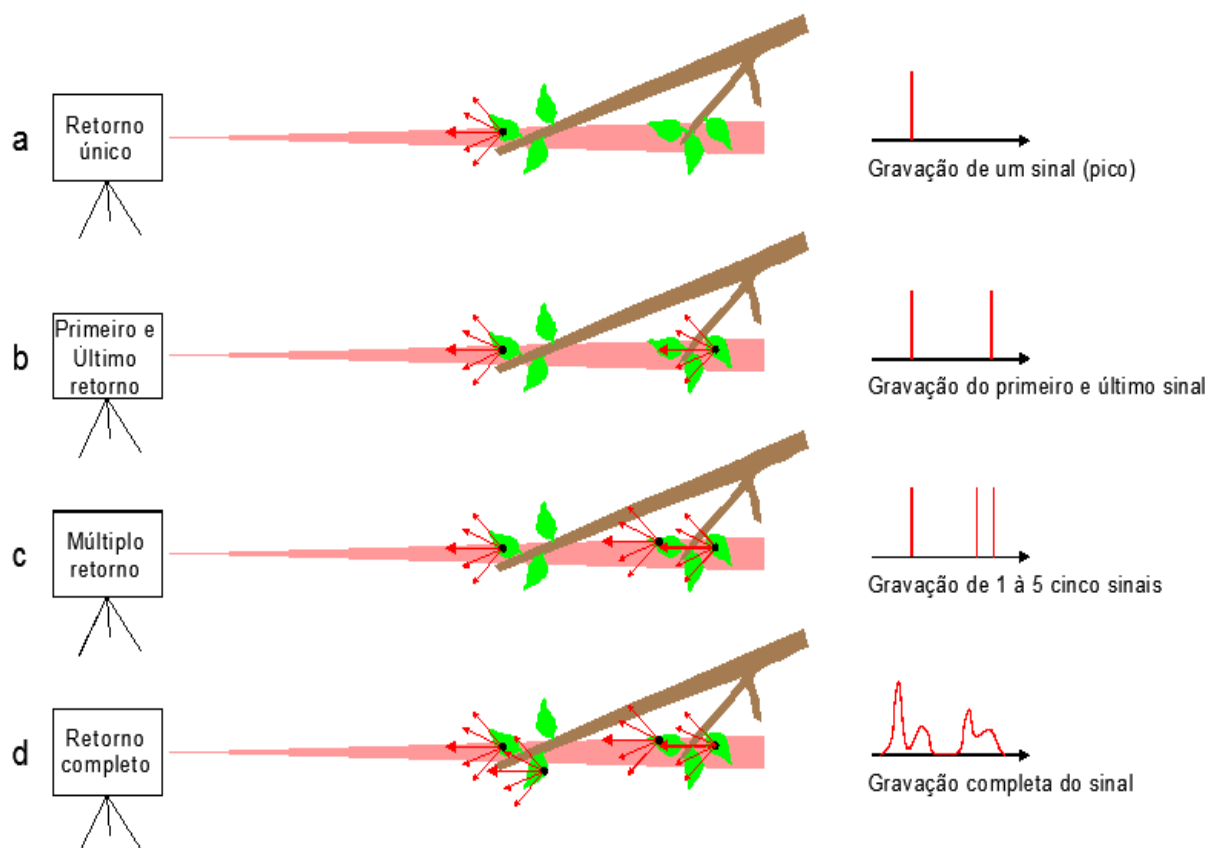
Fonte: Adaptado de LEONARDO da VINCI, 2008.

Segundo Wutke (2006), este sistema também denominado de LIDAR (*Light Detection and Ranging*), emite milhares de pulsos por segundo, calculando a distância por meio do retorno do pulso *laser*, o qual é refletido difusamente pelo alvo e parte deste retorna ao sistema.

Há quatro métodos distintos de registro de dados para o sistema de varredura baseada no intervalo de tempo. Cada método é diferenciado conforme o número de sinais de retornos computados para cada direção e na capacidade de detecção dos sensores (DASSOT; CONSTANT; FOURNIER, 2011).

A Figura 6 apresenta os tipos de retornos da varredura *LASER*, onde (a) representa o retorno de apenas um sinal, o qual remete ao tipo de varredura baseada na diferença de fase. Enquanto, que para a varredura baseada no intervalo de tempo todos os métodos de registros podem ser encontrados. Para os tipos de retornos (a), (b) e (c) somente os picos (definidos por seus limites) são considerados. E para o método *Full Waveform* (d) todos os sinais de retornos são capazes de serem registrados (DASSOT; CONSTANT; FOURNIER, 2011).

Figura 6 - Tipos de retornos do *LASER*.



Fonte: Adaptado de DASSOT; CONSTANT; FOURNIER, 2011.

2.1.1.1 Aplicações do TLS em ciências florestais

As primeiras aplicações do TLS ocorreram nas áreas de Engenharia, Arquitetura, Geologia e Mineração. A partir de 2003 inúmeros estudos destinados a caracterização florestal utilizando a tecnologia *LASER scanner* tem sido realizados (DASSOT; CONSTANT; FOURNIER, 2011).

Os primeiros estudos florestais utilizando a tecnologia TLS destinados à caracterização de parâmetros dendrométricos como o DAP, altura, área basal e volume, demonstraram um alto potencial devido a rapidez na coleta de dados, e a sua acurácia para mensuração, que se mostraram superiores as técnicas tradicionais (SIMONSE et al., 2003).

Os equipamentos TLS possibilitam a aquisição de dados tridimensionais acerca dos objetos, podendo fornecer informações de alta precisão sobre a geometria do

tronco de uma árvore, permitindo descrever sobre a tortuosidade, forma, galhos e danos ao longo do tronco (MAAS et al., 2008).

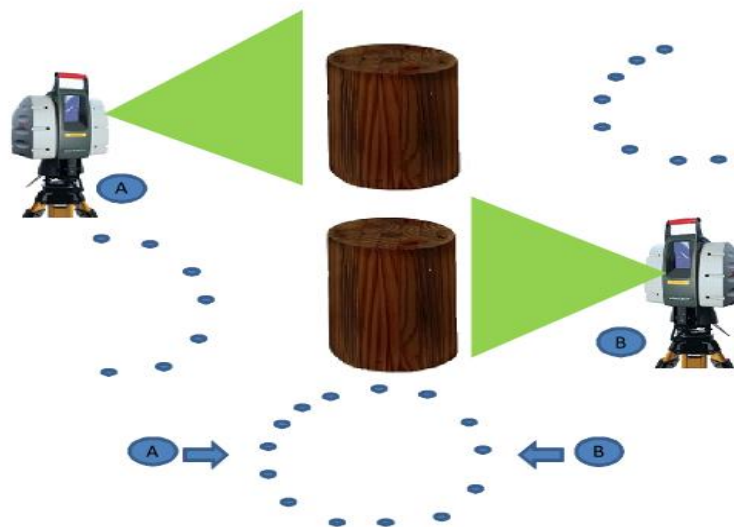
A aquisição de dados de uma floresta com a tecnologia TLS se dá de duas formas: varredura simples ou varreduras múltiplas. Quando o TLS é instalado somente em uma estação, os pulsos *LASER* irão abranger parcialmente o alvo, decorrendo assim em uma varredura simples. E, quando o TLS é instalado em mais de uma estação, possibilitando o recobrimento total do alvo, esta é denominada de varredura múltipla (SILVA, 2011; BUCK, 2012).

A principal característica da varredura simples quando aplicados em florestas, está no menor tempo para a aquisição de dados, e na isenção de alvos para efetuar o registro das nuvens de pontos. No entanto, a oclusão pode interferir na determinação das variáveis (LIANG, et al., 2016).

A varredura múltipla pode apresentar um alto detalhamento do objeto, porém é necessário a instalação de alvos artificiais para realizar o registro das nuvens de pontos. A instalação do equipamento em diferentes estações torna o processo de aquisição mais trabalhoso (BIERNET et al., 2006b).

A Figura 7 ilustra a nuvem de pontos gerada a partir de uma varredura simples (Figura 7A ou 7B), e a nuvem de pontos gerada utilizando varreduras múltiplas (Figura 7A e 7B), de uma seção do tronco de uma árvore.

Figura 7 - Varredura TLS. (A) Varredura simples na primeira estação. (B) Varredura simples na segunda estação. (A e B) Varreduras múltiplas, pontos referenciados em um mesmo sistema de coordenadas.



Fonte: SILVA, 2011.

O produto obtido com a varredura TLS é uma nuvem de pontos tridimensionais. Estes dados são comuns aos aplicativos proprietários desenvolvidos pelos fabricantes de TLS (LIANG et al., 2016). Ao se apropriar da nuvem de pontos para extrair os parâmetros dendrométricos, ressalta-se uma sequência de etapas como, a identificação das árvores, a distinção entre a base da árvore e a superfície do terreno, a extração das variáveis biométricas das árvores, e a filtragem e modelagem do fuste (BUCK, 2012).

Utilizando métodos de varredura simples e múltiplas, Thies e Spiecker (2004), encontraram para as variáveis altura total, DAP e altura da base da copa em comparação aos métodos tradicionais, resultados que indicaram um desvio padrão de 1,3%, quando comparados aos métodos convencionais.

No contexto apresentado, estudos avaliando variáveis dendrométricas como DAP e altura de um povoamento de *Pinus taeda* com 30 anos e com 200 árvores por hectare, localizado em uma área de terreno suave ondulado, utilizando *LASER scanner* terrestre para a comparação com mensurações tradicionais, indicou uma correspondência entre as estimativas, não havendo tendências de subestimativas ou de superestimativas (LINGNAU et al., 2009).

Autores como Hopinkson et al. (2004) com estudos em *Pinus resinosa* e *Acer saccharum*; e Watt, Donoghue e Dunford (2003) com plantios mistos de *Picea sitchensis* e *Pinus contorta*, descreveram encontrar superestimativas e subestimativas na obtenção de altura total, no qual associaram o erro a alta densidade das copas que impedem a aquisição de pontos *LASER* em partes mais altas das árvores.

Na obtenção de dados de diâmetros à diferentes alturas, os métodos testados com TLS por Lingnau et al. (2009), Lingnau et al. (2010) e Martins Neto et al. (2013), obtiveram bons resultados até a altura da copa, acima desta foram encontrados obstáculos que dificultaram a medição de diâmetros na parte superior das árvores.

Dados que se encontram no campo de visão do equipamento, e que não fazem parte do objeto a ser analisado, precisam ser eliminados para a aplicação da modelagem tridimensional (LITKEY et al., 2008; LIANG et al., 2008). Dessa maneira, o isolamento da árvore é indispensável à construção do modelo do tronco, o que torna os métodos de filtrações importantes para a extração de variáveis dendrométricas (BUCK et al., 2014).

A filtragem pode ser semiautomática, na qual é realizada visualmente a eliminação de pontos que não pertencem ao tronco, utilizando ferramentas de edição. Porém, por ser um método manual, este método está sujeito a erros do intérprete. Outra alternativa de filtragem automática, neste caso algoritmos implementados computacionalmente realizam a eliminação dos pontos que não fazem parte do tronco (BUCK et al., 2014).

Biernert et al. (2006b), descreveram um filtro para o isolamento da árvore em uma nuvem de pontos. Este método gera um cilindro circular reto de altura e raio pré-definido a partir de um ponto na base da árvore. Esta superfície gerada determina o limite para que os pontos fora deste raio sejam excluídos. Litkey et al. (2008), utilizaram o ajuste linear aos pontos da varredura *LASER* a fim de eliminar pontos com maior desvio, onde os pontos distantes duas vezes o desvio-padrão da distância, eram excluídos.

Aschoff e Spiecker (2004), analisaram algoritmos para a detecção automática de árvores, o qual permite que camadas horizontais de diferentes alturas possam ser geradas a partir do Modelo Digital do Terreno (DTM - *Digital Terrain Model*). Estas quando representadas a 1,30m do solo, possibilitam que as árvores sejam encontradas, pois esta é a altura em que se mede o DAP.

Biernert et al. (2006) trataram a altura total de uma árvore, determinando a diferença entre a cota mais alta e a cota mais baixa encontrada na nuvem de pontos.

Lingnau et al. (2009) utilizaram para gerar o diâmetro a diferentes alturas, os pontos obtidos da varredura *LASER* da árvore selecionada, separando em seções de 10 cm de altura cada. Em cada seção calcularam-se o X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} , correspondentes aos mínimos e máximos das abscissas e ordenadas. Os dois pontos correspondentes a maior distância entre X_{min} a X_{max} , ou Y_{min} a Y_{max} foram tomados inicialmente como os prováveis pontos pertencentes ao diâmetro da seção.

2.2 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

Os *UAS's* (*Unmanned Aerial System*) também são conhecidos por outros nomes e acrônimos como: "VANT", "*aerial robot*", "*drone*". Sendo mais populares os termos "*drone*" e "VANT" (ICAO, 2011).

De acordo com Boanova Filho (2014), a nomenclatura oficial no Brasil é "RPA", que é a abreviatura de "*Remotely-Piloted Aircraft*", traduzido como "Aeronave

Remotamente Pilotada". Esta nomenclatura foi adotada pela ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) e também pelo DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo), ambas seguindo a orientação da OACI (Organização da Aviação Civil Internacional). Ainda há mais duas definições que são utilizadas no Brasil, o "RPAS", do termo em inglês "*Remotely-Piloted Aircraft System*", em português traduzido para "Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada", e também a nomenclatura "SISVANT" (Sistema de Veículo Aéreo Não Tripulado), já que estes equipamentos compõem um sistema que compreende além da aeronave, uma estação de Pilotagem Remota, sensores, entre outros equipamentos (BOANOVA FILHO, 2014).

O RPA concerne a um tipo de VANT, onde há um piloto remoto responsável por operar a aeronave. Segundo Boanova Filho (2014), os VANT incluem aviões, helicópteros e dirigíveis controláveis nos três eixos e excluem os aeromodelos e balões tradicionais. As aeronaves não tripuladas totalmente autônomas também são consideradas como VANT, porém não são RPA. Os VANT ainda divergem dos aeromodelos devido a sua finalidade (esporte e lazer).

Seguramente os balões foram as primeiras plataformas utilizadas para a observação aérea. As fotografias feitas de Paris em 1858 a bordo de um balão movido à ar quente foi o principal indício deste fato (COLOMINA; MOLINA, 2014). Logo após, por ação do desenvolvimento tecnológico das câmeras, outros meios como pipas e foguetes também passaram a ser empregados. Possivelmente um dos meios mais interessantes foi a utilização de pequenas câmeras anexadas à pombos, como proposto por Neubronner em 1903. Desta forma os balões podem ser considerados a primeira forma de Sensoriamento Remoto aéreo baseado em veículos pilotados remotamente, assim como muitos consideram correto definir os pombos como uma plataforma não tripulada ou uma aeronave pilotada remotamente (COLOMINA; MOLINA, 2014).

Os VANT, tiveram início no ano de 1916 com a criação do "*Aerial Target*" dos irmãos Wright. Para fins militares, a Marinha Real utilizou *drones* para a prática de tiros em 1933. Assim como em 1973, onde *drones* foram usados no Vietnã do Norte, e também por Israel contra alvos egípcios no Sinai durante a Guerra de Outubro (PRZYBILLA; WESTER-EBBINGHAUS, 1979; WESTER-EBBINGHAUS, 1980).

Outra valiosa contribuição para o advento UAV, além da simplificação das câmeras, foi a evolução dos circuitos integrados e do rádio controlador. Przybilla e

Wester-Ebbinghaus realizaram no ano de 1979 um teste com um UAV de asa fixa e com 3 metros de comprimento, transportando uma câmera óptica (PRZYBILLA; WESTER-EBBINGHAUS, 1979). No ano de 1980 a mesma equipe realizou um segundo teste utilizando um modelo com hélices, o qual transportava uma câmera de Rolleiflex de médio formato (WESTER-EBBINGHAUS, 1980).

Segundo Jorge, Inamasu e Carmo (2011), os primeiros relatos da utilização de VANT no Brasil ocorreram na década de 1980, quando foi desenvolvido para fins militares o projeto Acauã (Figura 8) pelo Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA).

Figura 8 - Projeto Acauã.



Fonte: JORGE; INAMASU; CARMO, 2011.

Também nesta mesma década foi criado o projeto Helix, que nos anos seguintes foi desativado por falta de incentivo do governo e também pela falta de mercado para este produto. Em 1996 o CenPra (Centro de Pesquisas Renato Archer) iniciou o projeto Aurora para a capacitar a equipe de desenvolvimento de VANT (MEDEIROS, 2007). A partir de 2000 surgiu o projeto ARARA (Aeronave de Reconhecimento Assistida por Rádio e Autônoma) (Figura 9), focado principalmente na agricultura, com o objetivo de substituir aeronaves convencionais para a obtenção de fotografias aéreas (JORGE; INAMASU; CARMO, 2011).

Figura 9 - Projeto ARARA.



Fonte: JORGE; INAMASU; CARMO, 2011.

De modo geral, a aplicação da tecnologia VANT é direcionada para áreas da inteligência militar e segurança pública, mas ainda podem ser citadas outras finalidades como alvo móvel para treinamentos militares, transporte de suprimentos e armamentos, veículo de combate, entre outros (LONGHITANO, 2010).

Segundo Gurtner et al. (2009) o uso civil da tecnologia VANT evolui mais lentamente devido a fatores como ao montante dos recursos investidos serem menores que do setor militar, falta de aplicações sistemáticas, divulgação, capacitação de operadores, segurança, e falta de regulamentação de uso no espaço aéreo.

No Brasil as orientações para a utilização de RPAS é regulamentada pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), Ministério da Justiça e o Comando da Aeronáutica, por meio do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), ao qual compete autorizar o acesso ao espaço aéreo (DECEA, 2017).

Por meio do sistema de Solicitação de Autorização de Acesso ao Espaço Aéreo por RPAS (SARPAS), pode-se obter permissão para realizar um voo num prazo de até 45 minutos, dependendo de condições como: distância entre a operação com o RPAS e aeródromos, altura de voo, se haverá contato visual e peso do equipamento. Este prazo pode chegar até 18 dias, e requerer a emissão de NOTAM (*Notice to Airmen*), informando a comunidade aeronáutica sobre a operação (DECEA, 2017).

Orientações criadas pelo DECEA para o uso de DRONES/RPAS no Brasil (DECEA, 2017):

- Não sobrevoar área de segurança como quartéis, presídios, delegacias e infraestruturas críticas (termelétricas, estações de distribuição de energia, entre outras);
- O uso de RPAS para recreação deverá ser realizada em locais próprios para o aeromodelismo;
- Realizar os procedimentos previstos no *check-list* do fabricante antes, durante e após o voo;
- Voar a pelo menos 30 metros de distância de edificações. A não ser em casos de anuência do proprietário;
- Conhecer as limitações operacionais da aeronave;
- Planejar voos de até 100 pés de altura (aproximadamente 30 metros), acima disto, é necessário da emissão de NOTAM.
- Realizar voos durante o dia;
- Não sobrevoar pessoas sem autorização;
- Para voos de até 30 metros, manter 5,4 km de distância de aeroportos e heliportos. E para voos entre 30 a 120 metros, manter aproximadamente 9 km de distância destes locais;
- Manter o RPAS em seu campo de visão.

2.2.1 O Sistema de Veículo Aéreo Não Tripulado - SISVANT

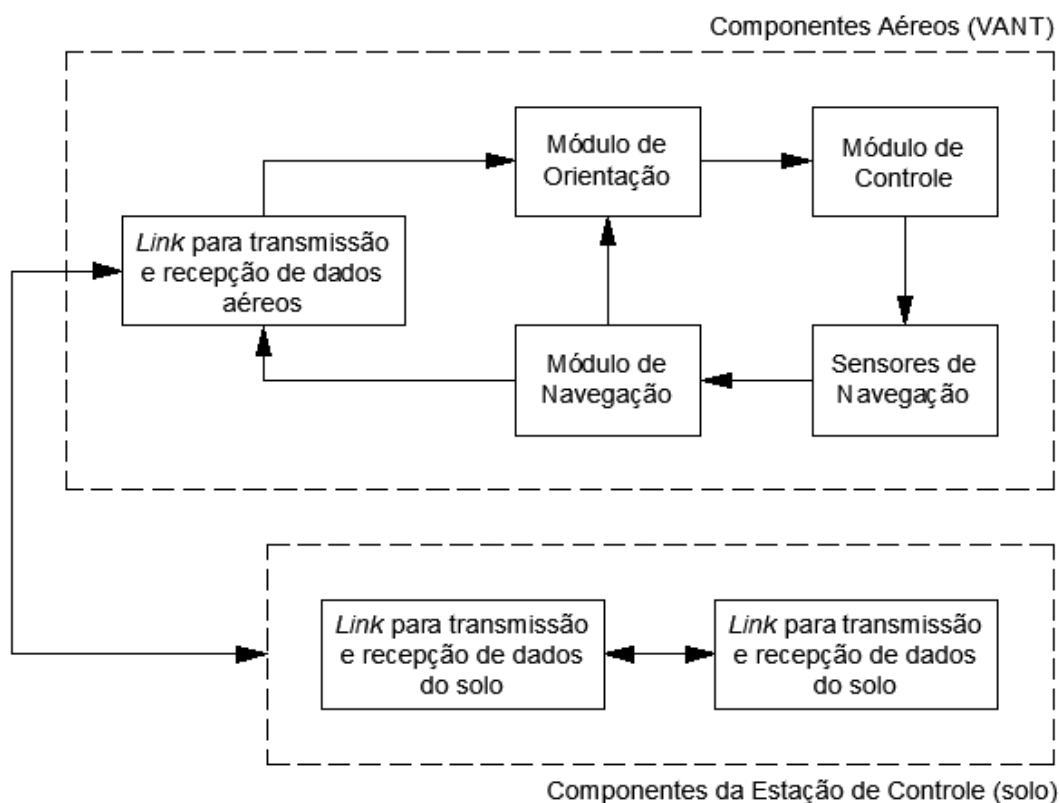
O SISVANT é composto por um conjunto de tecnologias que juntas se complementam, e que para cada uma delas existe um sistema em particular.

Considerando um nível mais alto da tecnologia SISVANT, há de modo geral, três componentes que são comumente identificadas: o veículo aéreo não tripulado (*unmanned aerial vehicle*), a estação de controle (*ground control station*), e um sistema de comunicação para transmitir e receber informações (*communication data link*) (COLOMINA; MOLINA, 2014). E, analisando um nível mais abaixo, existem outros componentes que também fazem parte do sistema, e são considerados

essenciais, como: piloto automático, sensores de navegação, sensores de imagem, servos mecânicos e sistema *wireless* (COLOMINA; MOLINA, 2014).

A Figura 10 mostra o conceito de operação de Veículo Aéreo Não Tripulado.

Figura 10 - Conceito de Operação de um VANT.



Fonte: Adaptado de ELKAİM et al., 2015.

Além da grande diversidade de plataformas, os equipamentos que complementam a tecnologia VANT variam muito. Muitas aeronaves podem ter plataforma mais reforçada, fazer uso da energia solar, sistemas de comunicação por satélites, processamento de dados em tempo real, navegação por GPS (*Global Positional System*), sistemas contra colisão, entre outros (LONGHITANO, 2010).

Devido à grande variedade de equipamentos que fazem parte do tecnologia VANT, surgiu uma série de classificações que variam de acordo com as características da plataforma aérea (tamanho, peso, autonomia, aerodinâmica, entre outras) e também do sistema de operação (COLOMINA; MOLINA, 2014).

A Tabela 1 apresenta uma das classificações mais usadas, definida pela *UVS International*. Esta tabela considera variáveis como o peso, alcance, altura de voo e

autonomia em horas. De acordo com esta classificação os VANT's se dividem em *Micro*, *Mini*, *Close Range* (Curto Alcance), *Medium Range* (Médio Alcance) e *High Altitude Long Endurece - HALE* (Alta Altitude e Longa Autonomia) (LONGHITANO, 2010).

Tabela 1 - Categorias de VANT's.

Categoria	Peso(kg)	Alcance(km)	Altitude(m)	Autonomia(horas)
Micro	<5	<10	250	1
Mini	<25/30/150	<10	150/250/300	<2
Curto alcance	25-150	10-30	3000	2-4
Médio alcance	50-250	30-70	3000	3-6
Alta altitude e Longa Autonomia	>250	>70	>3000	>6

Fonte: Adaptado de EISEINBEISS, 2004.

Quando se faz o uso da tecnologia VANT para o Sensoriamento Remoto da superfície terrestre, fica claro que os sensores que estão embarcados nas plataformas se tornam o elemento chave de todo o sistema (LONGHITANO, 2010).

De acordo com Longhitano (2010), inicialmente os sensores eram simples câmeras fotográficas de filmes monocromáticas e posteriormente coloridas. Mais tarde, filmadoras portáteis e câmeras fotográficas digitais foram adotadas.

Com o desenvolvimento e a adaptação de sensores para a utilização em VANTs, a geração de imagens nas faixas do espectro eletromagnético do visível e do infravermelho se tornaram comuns. E também, mais recentemente existem VANTs que transportam sensores *LASER*, hiperspectrais e SAR (*Synthetic Aperture Radar*) (LONGHITANO, 2010).

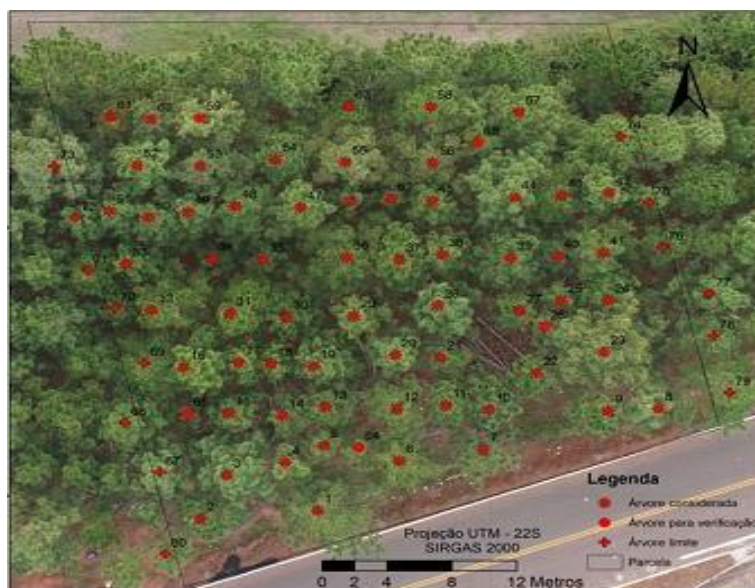
2.2.1.1 Aplicações dos VANT em ciências florestais

Um dos principais produtos obtidos por um VANT, consta de um mosaico de imagens do local sobrevoado. Este é constituído por um bloco de imagens unidas sistematicamente por um ajuste de sobreposição das margens vizinhas. No qual teremos ao final uma imagem contínua da área levantada (GALVÃO; ROSALEN, 2013).

Martello et al. (2015) utilizaram imagens obtidas com um VANT, e realizaram o processo de classificação supervisionada, para delimitar e indicar talhões de *Eucalyptus sp.* que apresentaram menor presença de árvores, fornecendo dados sobre os diferentes materiais genéticos em uso, com características distintas como suscetibilidade aos estresses hídricos e térmicos.

Favarin et al. (2013) realizaram a contagem das copas das árvores presentes em parcelas marcadas nas fotografias (Figura 11). Assim como a medição das copas a partir da vetorização destas fotografias, utilizando um aplicativo de Sistemas de Informações Geográficas (GIS), ArcGIS® 9.2.

Figura 11 - Contagem da copa das árvores em parcelas marcadas em fotografias.



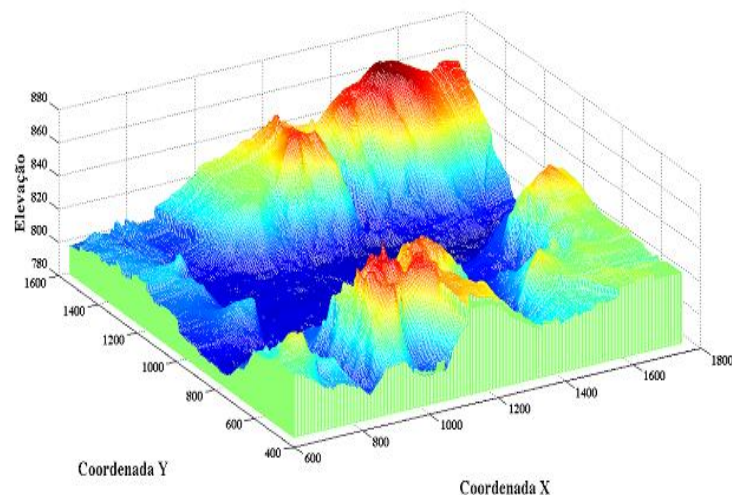
Fonte: FAVARIN et al., 2013.

Araujo et al. (2006) determinaram a mortalidade de árvores durante os primeiros 20 dias após o plantio, e também o tamanho da copa depois de 6 meses. Para tal efetuaram o pré-processamento, aplicando a remoção manual de áreas sem plantio, realce da componente verde das imagens e remoção da sombra por classificação de cor. Na etapa de processamento, foi realizado a segmentação da imagem das copas das plantas, utilizando a segmentação por faixa de cor (*threshold*) na componente verde das imagens, associada a uma filtragem das regiões segmentadas por forma e área. Sendo os pontos centrais das plantas então calculados como o centro das componentes conexas resultantes da segmentação,

para a determinação da mortalidade. Para a área de copa além destes passos também é aplicada uma técnica de delimitação de áreas de contribuição (*watersheds*) sobre os pontos centrais das plantas para a separação de copas adjacentes. O resultado é utilizado para a medição das copas com base na contagem de pixels das áreas segmentadas.

Mitishita et al. (2014) apresentaram a metodologia, empregando para a obtenção do Modelo Digital de Superfície (DSM) (Figura 12) aplicando correlação digital de pixels no aplicativo LPS. Para a obtenção do Modelo Digital do Terreno (DTM), foi realizada a filtragem dos pontos não pertencentes ao terreno, com base na visão estereoscópica dos modelos e procedimento manual. Com base nos pontos de controle levantados na região obteve-se a exatidão do DTM igual a 1,6 metros.

Figura 12 - Modelo digital da superfície do terreno utilizando o programa LPS.



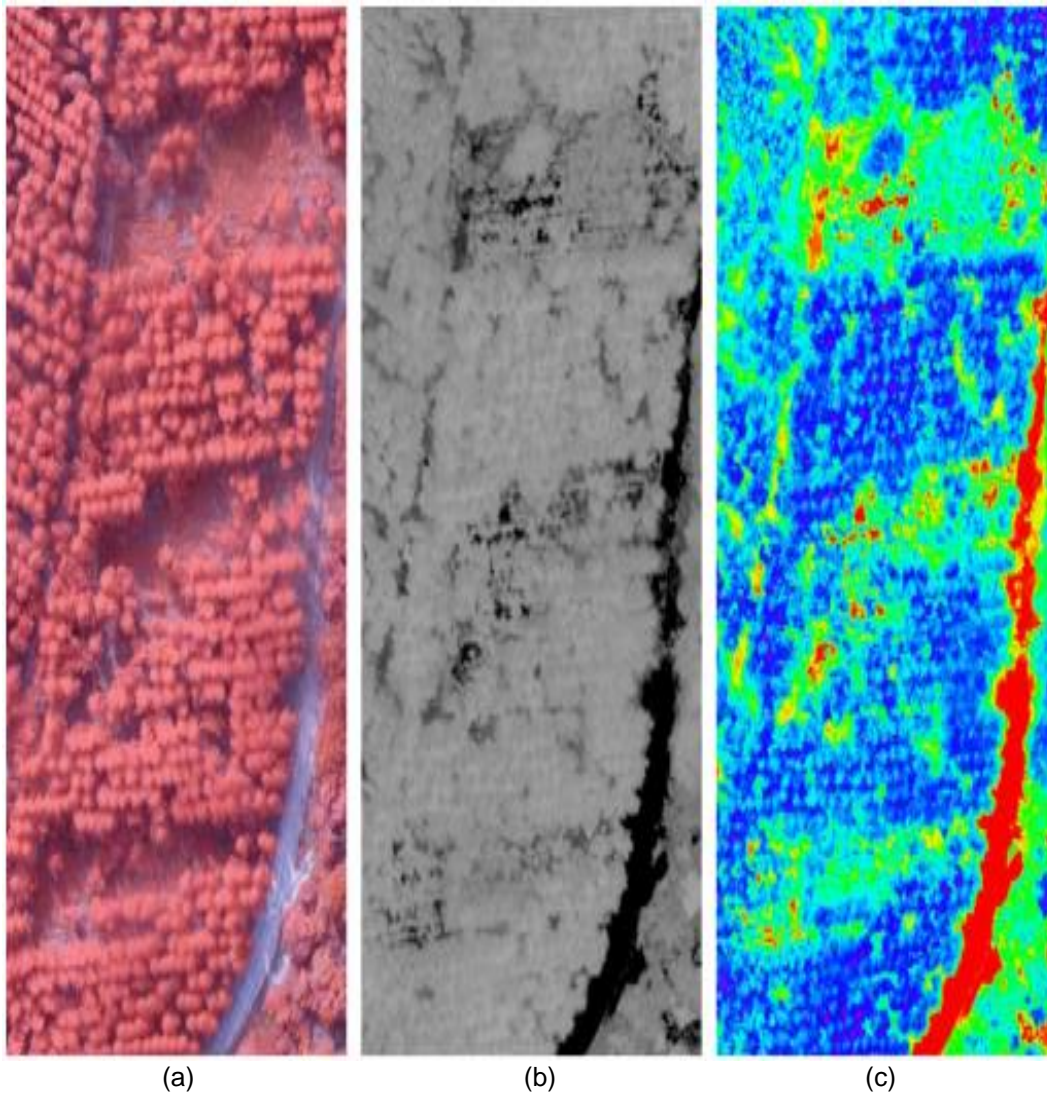
Fonte: MITISHITA et al, 2014.

Ni et al. (2015) compararam os dados obtidos com ALS (*Airborne Laser Scanner*) com os obtidos a partir de um VANT, da estrutura espacial de uma floresta no interior da China, composta por espécies como *Larix gmelini* e *Bethula platyphylla*, as quais são dominantes neste local. E como resultado obteve uma correlação de 87%.

Chaves et al. (2015) utilizaram um VANT para a quantificação de área plantada e não plantada, em um reflorestamento de eucalipto no município de Lençóis Paulista. Com resolução de 4 cm em composições coloridas com os canais NIR-G-R (Figura 13a), e também para os cálculos NDVI de forma tradicional (Figura 13b) e NDVI com

pseudo cores no modelo HSV (Figura 13c). Com resultado obteve boas estimativas sobre o tamanho da área de solo, porém apresentou um certo erro em relação a classificação de áreas de baixa e alta biomassa.

Figura 13 - Quantificação de áreas de solo. a) Canais NIR-G-R; b) NDVI; c) NDVI com pseudo cores no modelo HSV.

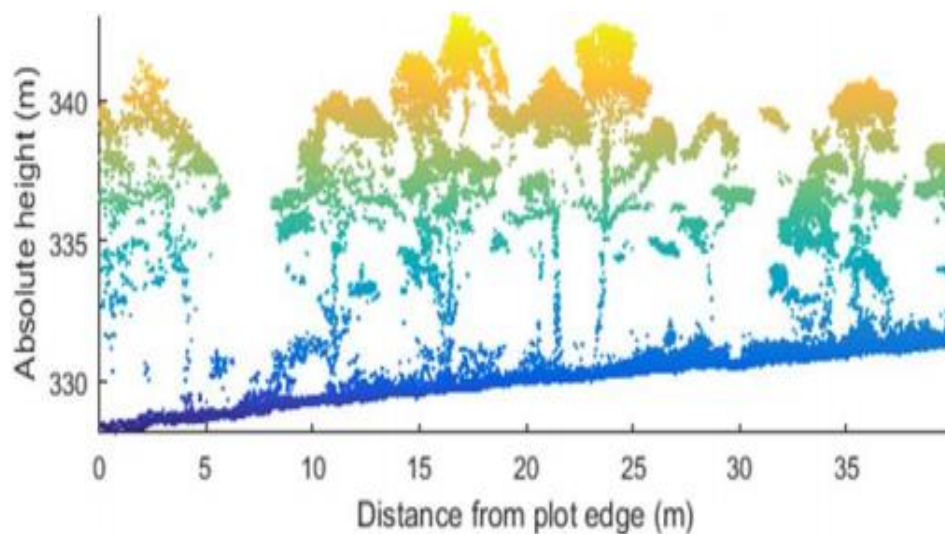


Fonte: CHAVES et al., 2015.

Zarco-Tejada et al. (2014) encontraram uma correlação de 83% e erro de 35 cm, na determinação da altura das árvores usando um VANT com sensor de alta resolução espacial de imagem embarcado, em uma área de 148 hectares plantadas com *Olea europaea* em Alcolea, Cordoba, Sul da Espanha.

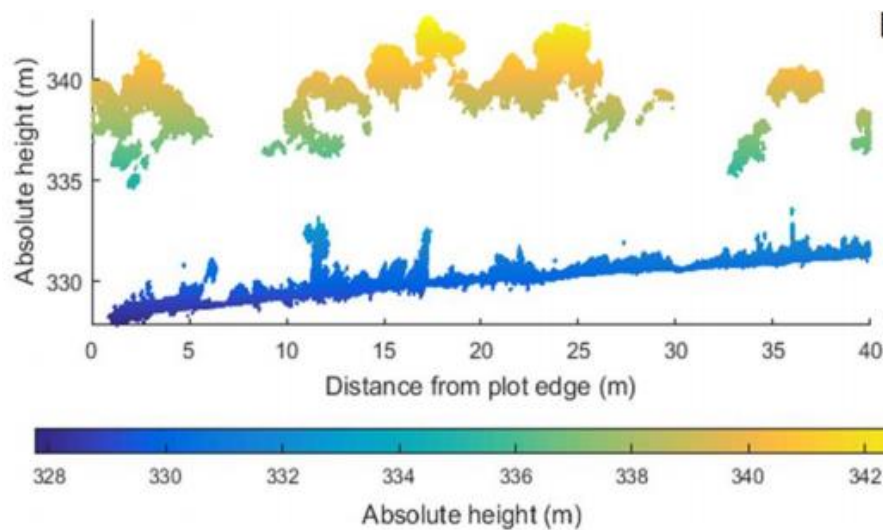
Wallace et al. (2016) compararam as nuvens de pontos do *Airbone Laser Scanning* (Figura 14) e SfM (*Structure from Motion*) (Figura 15) para avaliação da estrutura de uma floresta. Estas duas técnicas UAV apresentaram bons resultados na representação da floresta, sendo que para altura das árvores o erro foi de 0,92 m para ALS e 1,30 m para SfM. Contudo, o ALS foi capaz de penetrar melhor a copa das árvores oferecendo uma estimativa mais completa da distribuição vertical da vegetação.

Figura 14 - Nuvens de pontos ALS.



Fonte WALLACE et al., 2016.

Figura 15 - Nuvens de pontos SfM.



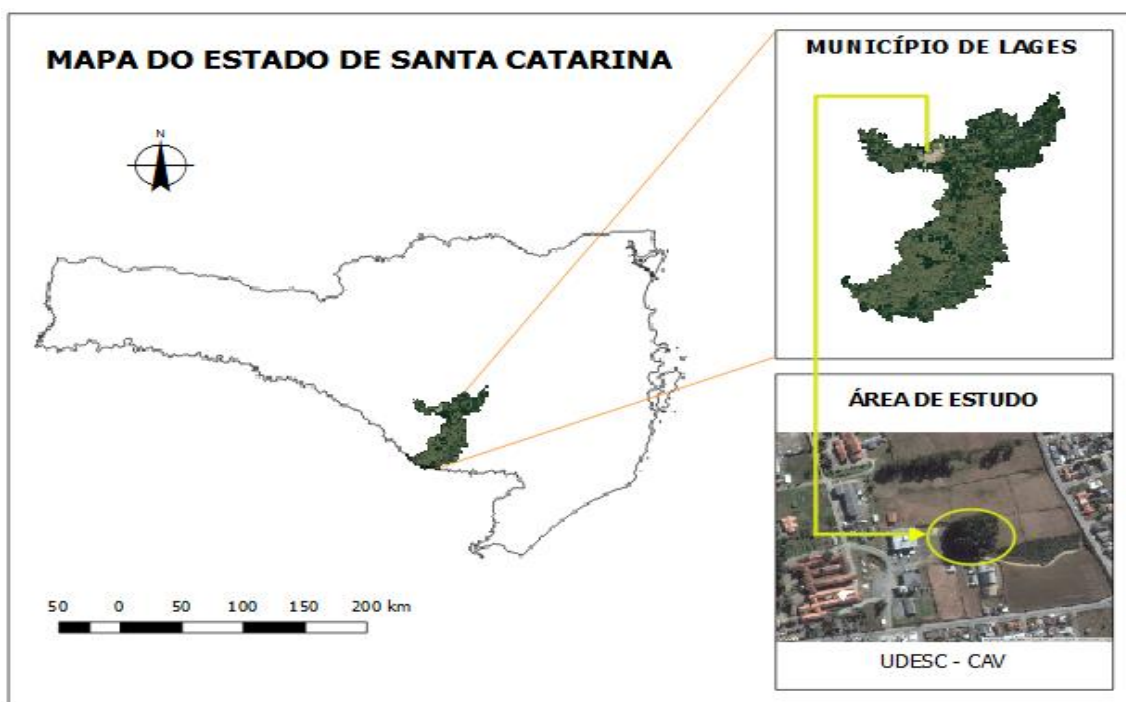
Fonte WALLACE et al., 2016.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi realizado em um bosque com coordenada central 27°47'30,70"S e 50°18'05,39" W, localizado no Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV) da Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), município de Lages (Figura 16). A escolha deste local foi devido a facilidade de acesso e por não haver restrições quanto ao uso das informações obtidas.

Figura 16 - Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

O bosque possui um plantio misto com espécies do gênero *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*, sem tratos silviculturais, e área aproximada de 4.200,00 m², contendo 179 árvores.

Conforme a classificação climática de Köppen o clima da região é o temperado Cfb (temperado, úmido, sem estação seca, com verão fresco), com temperatura média de 15,7° C, e precipitação anual de 1.556 mm (WREGE et al., 2011).

3.2 FONTE DE DADOS

3.2.1 Dados TLS

3.2.1.1 Levantamento dos dados TLS à campo

Os dados TLS foram coletados empregando-se o equipamento TLS da marca e modelo Faro *LASER scanner* Focus 3D 120 (Figura 17). As suas especificações técnicas são mostradas na Tabela 2.

Figura 17 - Equipamento TLS utilizado.



Fonte: FARO, 2011.

Tabela 2- Especificações técnicas do equipamento Faro *LASER scanner* Focus 3D 120.

Características técnicas	
Velocidade de medição	Até 976.000 pontos/segundo
Precisão	± 2 mm
Peso	5,2 kg
Tamanho	240 x 200 x 100 mm
Faixa de foco	0,6 - 120 m
Resolução geométrica da câmera	70 megapixel (colorido)
Campo de visão horizontal	300° à 360°

Fonte: Adaptado de FARO, 2011.

Para a aquisição dos dados com o TLS, foi aplicado o método de varreduras múltiplas, objetivando a aquisição do maior número de informações sobre as árvores de interesse. Dados advindos de levantamentos realizados a partir do método varreduras múltiplas podem representar o fuste completo (THIES; SPIECKER, 2004).

O levantamento à campo foi realizado em datas distintas devido ao tempo necessário para executar a coleta. O primeiro levantamento foi efetuado no dia 19 de maio de 2016, e para a coleta de dados o equipamento foi instalado em 20 estações distintas distribuídas em parte da área do bosque. O segundo levantamento foi realizado no dia 29 de maio de 2016, onde o equipamento foi instalado em 8 estações diferentes, com a finalidade de coletar dados no restante da área. Além do TLS, também foram utilizados alvos planos e esféricos (Figura 18), os quais serviram de referência para o registro e georreferenciamento da nuvem de pontos gerada.

Figura 18 - Alvos utilizados no levantamento de dados. a) Alvo esférico; b) alvo plano.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Em função do volume elevado de dados e visando facilitar o processamento de dados, optou-se por utilizar somente os dados obtidos no segundo dia de coleta.

3.2.1.2 Levantamento dos dados para o georreferenciamento da nuvem de pontos

Devido a integração dos dados obtidos a partir de diferentes sensores, fez-se então o georreferenciamento dos alvos. Para tal foi utilizado um par de receptores de sinais GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de dupla frequência, modelo GS15, fabricado pela *Leica Geosystems* (Figura 19).

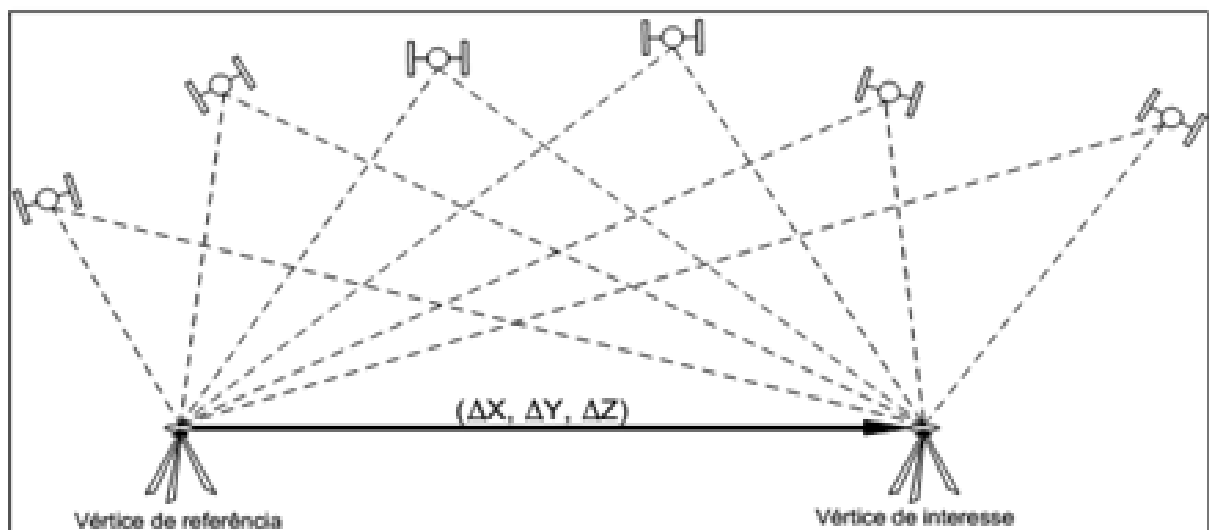
Figura 19 - Modelo do receptor GNSS usado para o georreferenciamento.



Fonte: LEICA GEOSYSTEMS, 2016.

Com o GNSS foram coletadas observáveis analógicas e digitais, visando o cálculo das coordenadas de três pontos de apoio. Para tanto, empregou-se o método relativo (Figura 20), ou seja, as coordenadas dos pontos de interesse são definidas a contar de um ou mais pontos com coordenadas conhecidas, e neste caso é indispensável que dois ou mais receptores de sinais GNSS colem dados ao mesmo tempo, no qual um dos receptores ocupa um ponto de referência (MONICO, 2008).

Figura 20 - Método de posicionamento relativo.



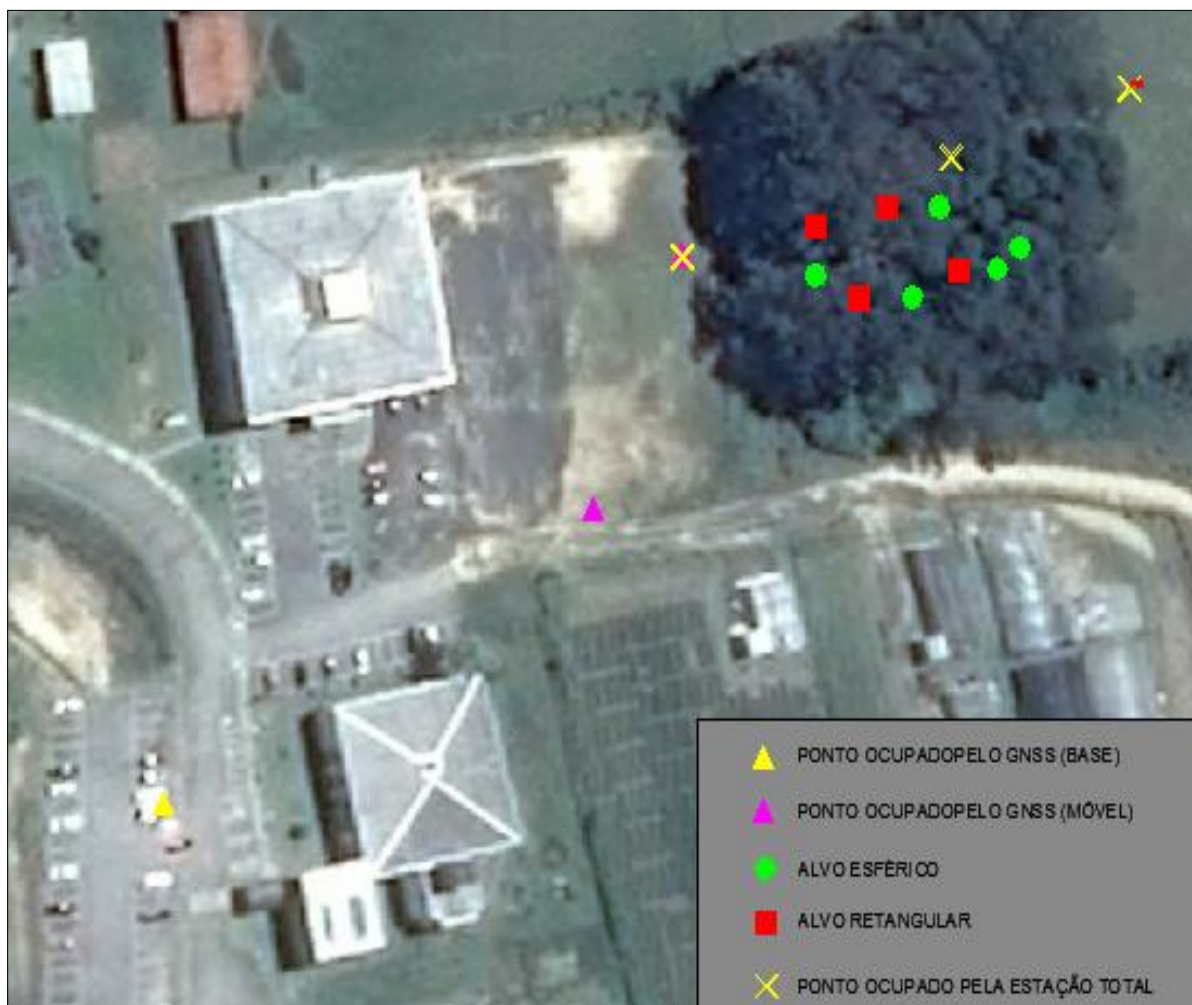
Fonte: INCRA, 2013.

Os pontos de apoio foram posicionados em locais abertos próximos ao bosque, com o intuito de evitar o multicaminhamento.

O multicaminhamento é o recebimento de sinal pelo receptor, oriundo de vários caminhos distintos. O sinal transmitido pelo satélite é refletido por superfícies refletoras sendo coletados pelo receptor, assim como os sinais transmitidos diretamente dos satélites. Este efeito irá introduzir erros nas observáveis GNSS (MONICO, 2008).

A partir destes pontos, utilizando uma estação total e aplicando métodos de levantamentos topográficos, fez-se a mensuração de mais dois pontos de apoio e consequentemente a irradiação dos alvos. A Figura 21 ilustra a distribuição dos pontos e alvos utilizados.

Figura 21 - Distribuição de pontos e alvos na área.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Os dados coletados com o receptor GNSS foram processados utilizando o aplicativo LEICA GEOFFICE. O levantamento topográfico georreferenciado foi calculado no aplicativo Posição, empregando o sistema de referência SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico das Américas) e projeção cartográfica UTM (Universal Transversa de Mercator), e fuso 22 S.

3.2.1.3 Pré-processamento e processamento dos dados TLS

Para realizar o pré-processamento e o processamento dos dados TLS, foram utilizados os aplicativo Scene, o qual acompanha o equipamento, e cuja licença é proprietária. Este aplicativo possui ferramentas abrangentes para o processamento e manipulação de nuvens de pontos 3D, obtidas a partir de *LASER scanner* de alta resolução como o FARO Focus3D (SCENE, 2017). Também foi utilizado o aplicativo *opensource* CloudCompare, o qual é capaz de processar nuvens de pontos 3D obtidos a partir de levantamentos feitos com equipamentos *LASER scanners*, e manipular malhas triangulares e imagens (CLOUDCOMPARE, 2017).

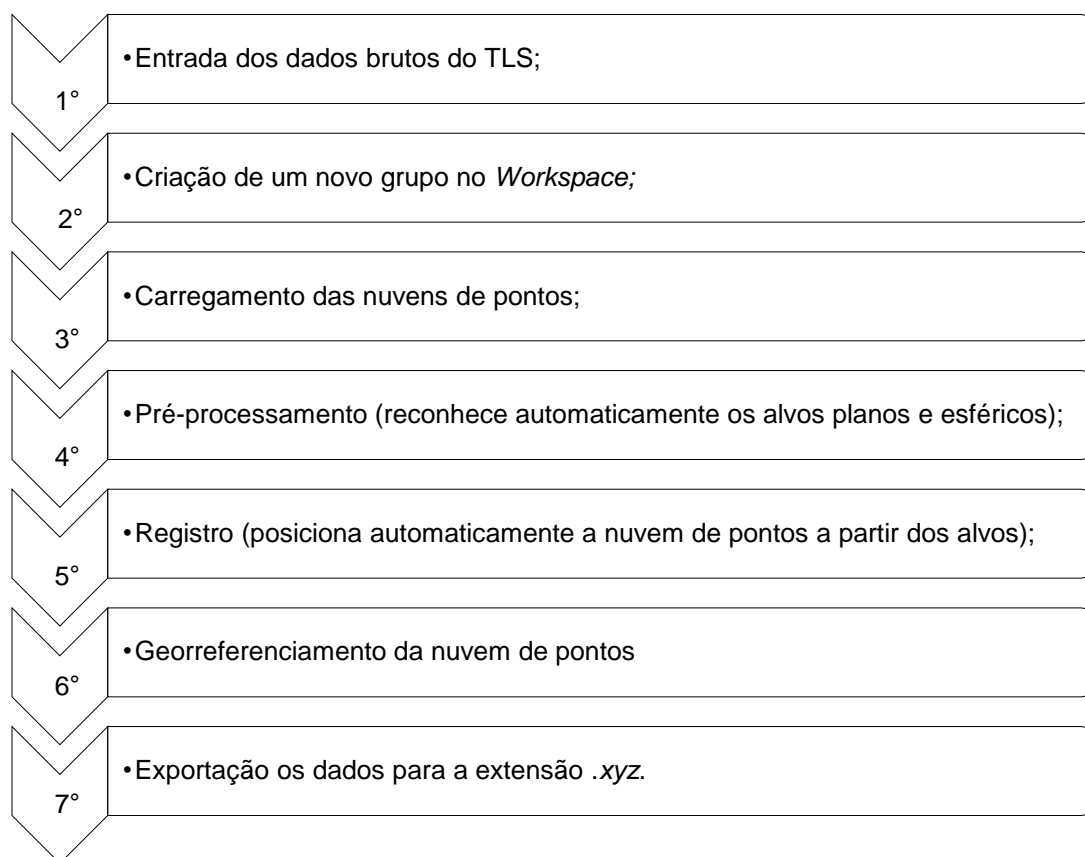
O pré-processamento geralmente inclui o registro (ou alinhamento) das cenas, e também tratamentos para a otimização da nuvem de pontos, como a filtragem e reamostragens (ZHIQIANG et al., 2009). O registro equivale em posicionar as várias nuvens com suas coordenadas locais, em apenas um arquivo de mesmo referencial, a partir de alvos, posicionamento do TLS, e associações de duas ou mais nuvens de pontos (GENECHTEN, 2008).

O processamento da nuvem de pontos considera as operações de segmentação, edição, modelagem e a exportação dos dados em vários formatos (GROETELAARS; AMORIM, 2011).

Para realizar o georreferenciamento da nuvem de pontos, foi criado um arquivo no aplicativo Excel contendo as descrições dos alvos com suas respectivas coordenadas. É importante que as descrições dos alvos retangulares e esféricos sejam iguais as que são apresentadas no aplicativo Scene após o registro das cenas.

A Figura 22 apresenta as etapas realizadas no aplicativo Scene para efetuar o registro, a transformação das coordenadas locais em coordenadas UTM, e a exportação da nuvem de pontos para a extensão .xyz.

Figura 22 - Etapas do pré-processamento e processamento no aplicativo Scene.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

As próximas etapas foram realizadas no aplicativo *opensource* CloudCompare. Optou-se por utilizar este aplicativo, pois não necessita de licenças, o que facilitaria a replicação futura deste estudo.

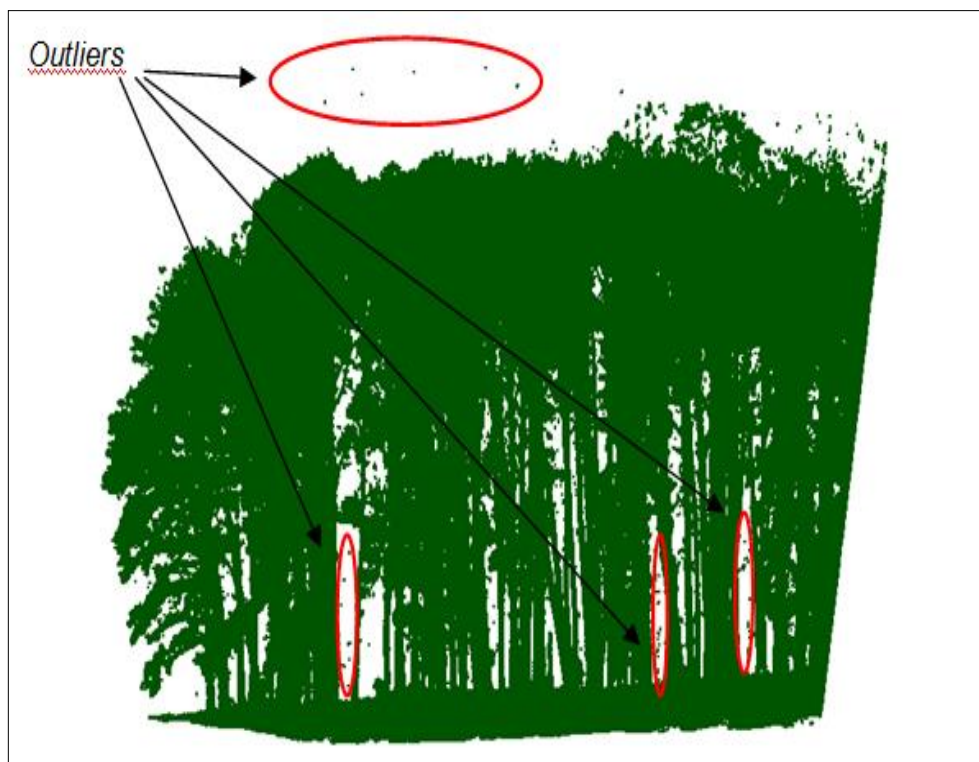
Após o registro das nuvens de pontos é usual realizar procedimentos como a filtragem, para diminuir significativamente o número de pontos e consequentemente o tamanho do arquivo (GROETELAARS; AMORIM, 2011).

O arquivo exportado com a extensão .xyz referente a nuvem de pontos georreferenciada possui 10.942.570 KB (kilobyte), equivalente a 184.675.591 pontos.

A primeira ação realizada ao abrir o arquivo no aplicativo CloudCompare foi a remoção das informações que não eram pertinentes ao trabalho, ou seja, apenas as coordenadas dos pontos foram carregadas, gerando uma nuvem de pontos monocromática, na qual também é possível visualizar a presença de *outliers* (Figura 23).

Outliers são valores discrepantes presentes no conjunto de dados coletados (TRIOLA, 1998). Referem-se a ruídos gerados no instante da coleta de dados.

Figura 23 - Nuvem de pontos monocromática carregada no aplicativo CloudCompare com presença de *outliers*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Para remover os *outliers*, empregou-se a função *SOR* (*Statistical Outlier Remove*), que remove pontos que divergem do padrão observado, a partir de um número de pontos definido pelo usuário, para se estimar a média, e um valor para o limiar de multiplicação do desvio padrão.

Após testar valores distintos, e realizar uma verificação visual dos dados, foi definido o número de 10 pontos para se estimar a distância média entre os pontos da nuvem, e valor 1 para o limiar de multiplicação do desvio padrão.

Com a intenção de otimizar o desempenho do aplicativo utilizado para a extração das variáveis dendrométricas sem comprometer os dados observados, foi aplicado a função *Remove duplicate points* (Remoção de pontos duplicados) associada a função *Others* (Outros). Para executar este comando é preciso estabelecer um valor para a distância mínima entre os pontos. Depois de vários testes,

foi definido o valor de 0,022, isto quer dizer que não haverá mais de um ponto a cada 2,2 centímetros.

A Figura 24 mostra a nuvem de pontos 3D gerada após a remoção dos *outliers* e de pontos duplicados conforme descrito nos parágrafos anteriores.

Figura 24 - Nuvem de pontos com remoção de outliers e pontos duplicados utilizando o aplicativo CloudCompare.

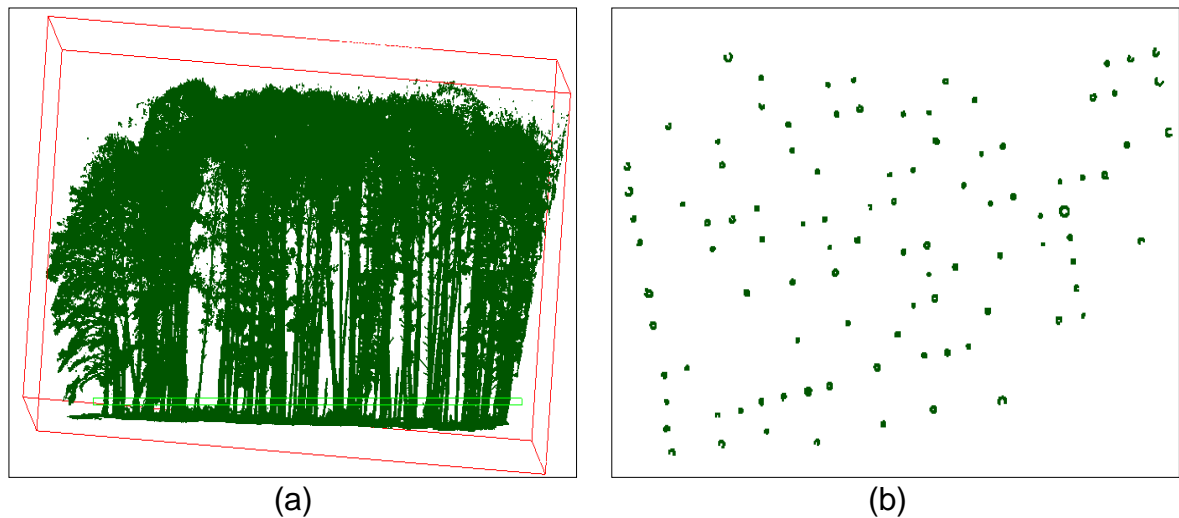


Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A nuvem de pontos processada foi exportada para o formato *txt*, contendo 399.654 KB, o que corresponde à 14.615.905 pontos.

Para a aplicação da nuvem de pontos gerada na identificação e cálculo das coordenadas das árvores, foi realizado um recorte transversal de aproximadamente 30 cm de espessura. Esta seção foi criada a aproximadamente 1,30 metros do solo, altura na qual é mensurado o DAP em campo (Figura 25).

Figura 25 - a) Seleção da área para o recorte das seções transversais; b) Seções transversais obtidas a partir do recorte.



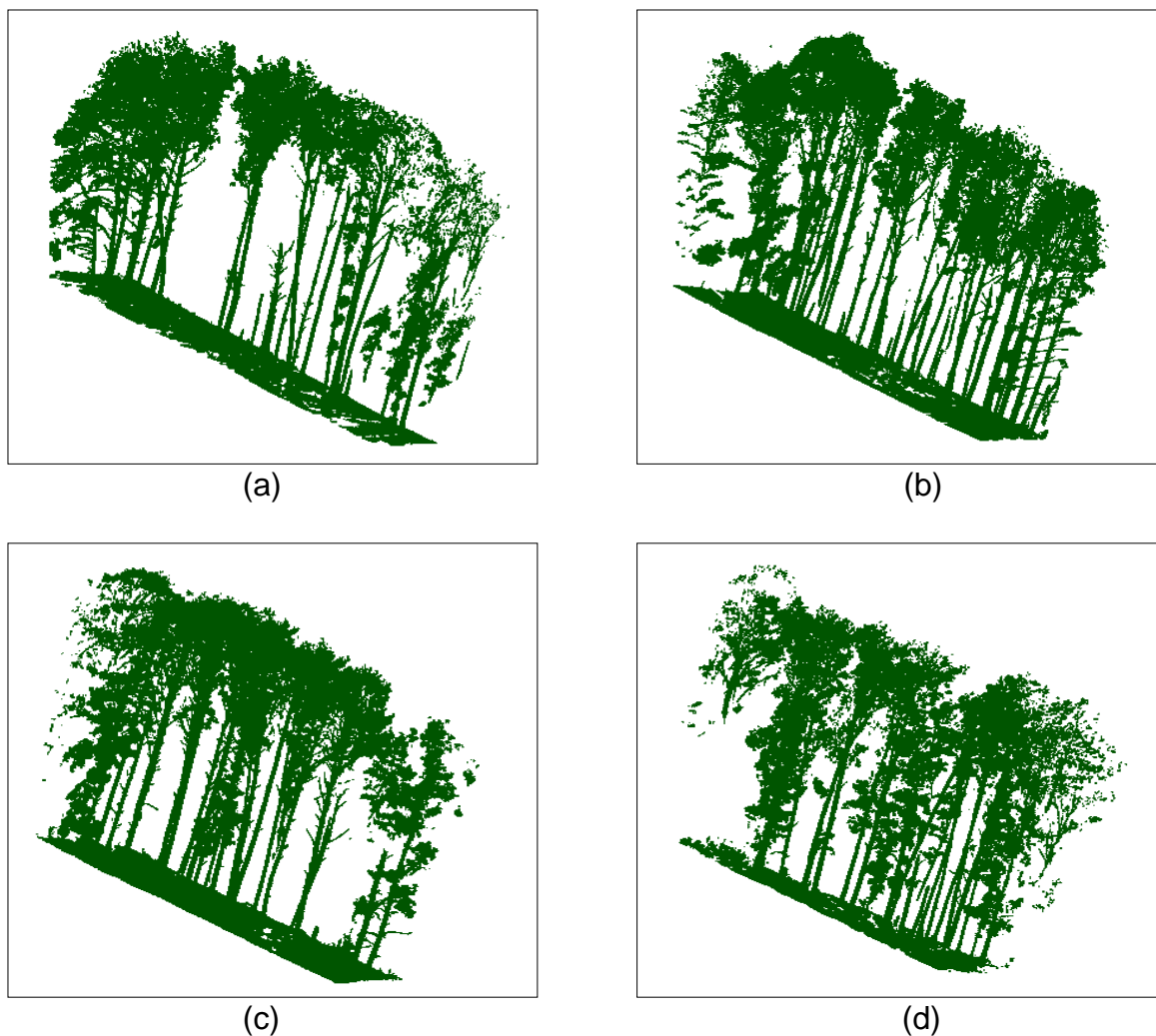
Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Os agrupamentos de pontos podem ser determinados a partir de uma seção transversal compreendida entre 1 e 2 metros acima do solo (BROLLY; KIRALY, 2010).

Para a extração dos troncos das árvores, desenvolveu-se uma rotina computacional no programa Python. Devido a restrição do Python em trabalhar com arquivos de aproximadamente 100.000 KB, a nuvem de pontos foi recortada em quatro partes, criando arquivos menores para serem utilizadas na extração dos diâmetros e alturas.

Os arquivos criados (Figura 26) foram: a) Recorte 1 com 78.677 KB e 2.787.308 pontos; b) Recorte 2 com 102.960 KB e 3.765.363 pontos; c) Recorte 3 com 99.827 KB e 3.650.804 pontos; d) Recorte 4 com 83.744 KB e 3.062.624 pontos.

Figura 26 - Nuvem de pontos dos novos arquivos criados. a) Recorte 1; b) Recorte 2; c) Recorte 3; d) Recorte 4.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Após realizar as etapas de pré-processamento, e processamento dos dados descritas, foi gerado ao final, cinco arquivos com a extensão .txt contendo as coordenadas georreferenciadas dos pontos levantados, os quais foram usados como fonte de dados para a extração das variáveis dendrométricas a partir de dados TLS (Tabela 3).

Tabela 3 - Resumo dos arquivos criados e usados como fonte de dados para a extração das variáveis dendrométricas a partir de dados TLS.

Nome do arquivo	Descrição	Tamanho (KB)
secoes.txt	Recorte transversal da nuvem de pontos para a obtenção das seções dos troncos (Figura 25b)	1.338
1.txt	Recorte da nuvem de pontos completa (Figura 26a)	78.677
2.txt	Recorte da nuvem de pontos completa (Figura 26b)	102.960
3.txt	Recorte da nuvem de pontos completa (Figura 26c)	99.827
4.txt	Recorte da nuvem de pontos completa (Figura 26d)	83.744

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

3.2.2 Dados dos sensores embarcados em um VANT

3.2.2.1 Recobrimento aéreo

O recobrimento aéreo com o VANT foi realizado no dia 20 de abril de 2016 pela empresa NEWGEO. Foram tomadas 121 imagens, empregando o veículo eBee produzido pela Sensefly (Figura 27).

Figura 27 - Modelo de VANT utilizado.



Fonte: SENSEFLY, 2016.

A Tabela 4 apresenta as especificações técnicas do veículo eBee, e a Tabela 5 apresenta as especificações de operação do veículo eBee.

Tabela 4 - Especificações do veículo eBee.

Hardware	
Peso (incluindo a câmera)	Aprox. 0,69 kg
Envergadura da asa	96 cm
Material	Espuma Epp, estrutura de carbono e partes compostas
Propulsão	Motor DC sem escovas e com hélice de propulsão elétrica, 160W
Bateria	11,1 V, 2150 mAh
Câmera (fornecida)	Sony WX (18.2 MP)
Câmera (opcional)	S110 RGB, thermoMAP
Dimensões da caixa de transporte	55 x 45 x 25 cm

Fonte: SENSEFLY, 2016.

Tabela 5 - Especificações de operação do veículo eBee.

Operação	Característica
Tempo máximo de voo	50 minutos
Velocidade de cruzeiro	40 - 90 km/h
Alcance da frequência de rádio	Até 3 km
Cobertura máxima (voo único)	12 km ² (a 974m)
Resistência ao vento	Até 45 km/h
Resolução geométrica (GSD)	Até 1,5 cm (0,6 pol) por pixel
Precisão horizontal/vertical absoluta (com GCPs)	Até 3 cm / 5cm
Operação com vários drones	Sim
Planejamento automático de voo 3D	Sim
Precisão de aterrisagem linear	Aprox. 5m
Precisão relativa de ortomosaico / modelo 3D	1 - 3 GSD
Precisão horizontal/vertical absoluta (com GCP)	Até 3 cm / 5cm
Precisão horizontal absoluta (sem GCP)	1 - 5 m

Fonte: SENSEFLY, 2016.

3.2.2.2 Levantamento dos pontos de apoio

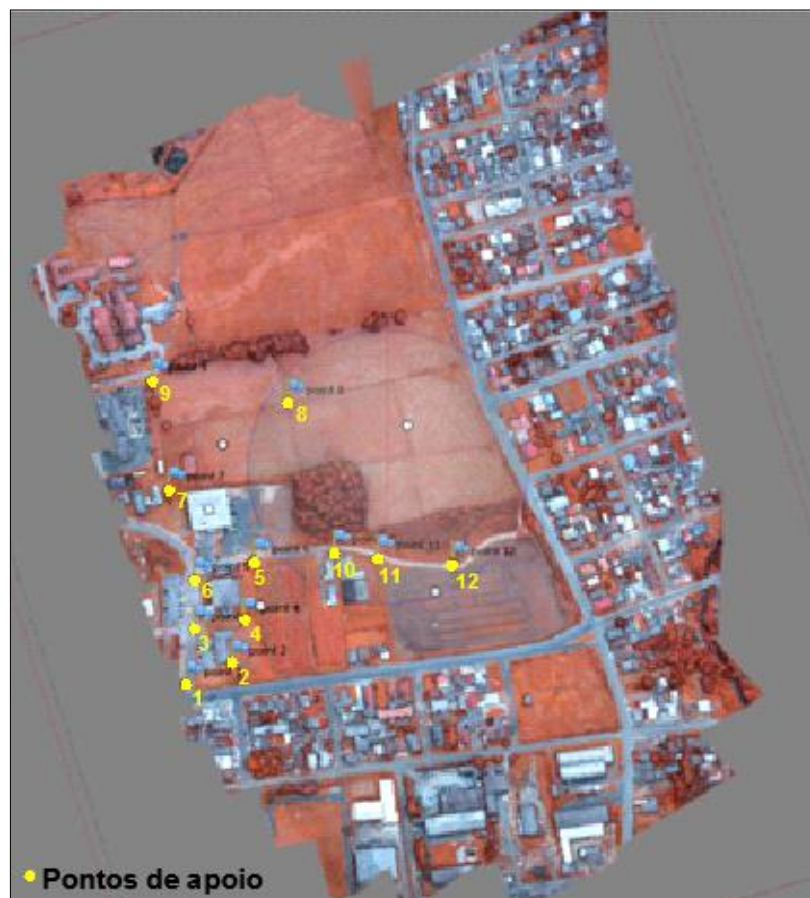
Para realizar o georreferenciamento dos dados VANT, foram utilizadas coordenadas de 12 pontos de apoio levantados à campo. Empregou-se o posicionamento GNSS relativo *stop and go* para a determinação das coordenadas. As

características deste levantamento foram: tempo de ocupação de 120 segundos e taxa de gravação de 0,1 segundos. Utilizou-se como estação de referência o sinal geodésico (M5) implantado no CAV e devidamente referenciado ao arcabouço geodésico brasileiro. Neste sinal geodésico instalou-se a base GNSS que coletou observações durante todo o intervalo de coleta de dados do receptor móvel. O sistema de referência utilizado foi o SIRGAS 2000 com projeção cartográfica UTM, e fuso 22 S.

De acordo com Monico (2008), o posicionamento relativo semicinemático ou *stop and go*, é similar ao estático-rápido. A diferença entre os dois métodos é que no segundo, o tempo de permanência em cada estação é maior.

Na Figura 28 é apresentada a ortoimagem da área com a disposição dos pontos de apoio.

Figura 28 - Ortoimagem com a disposição dos pontos de apoio.



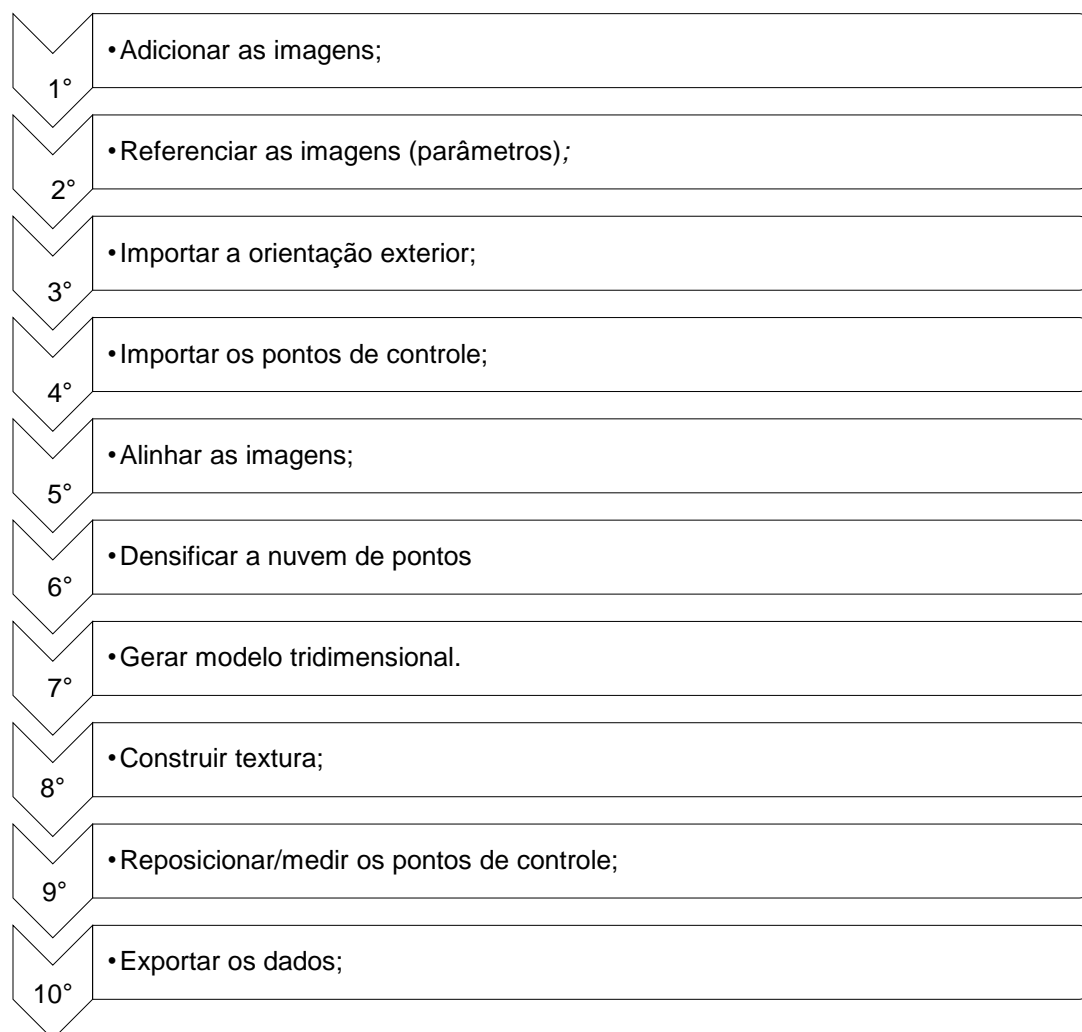
Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

3.2.2.3 *Processamento dos dados obtido a partir de sensores embarcado em um VANT*

Para o processamento dos dados foi empregado o aplicativo Photoscan/Agisoft. Este aplicativo permite gerar nuvens de pontos georreferenciadas, poligonais texturizados, modelos digitais de elevação e ortomosaicos, tendo como base um grupo de imagens sobrepostas, com suas respectivas informações de referência (AGISOFT, 2017).

A Figura 30 mostra as etapas realizadas para o processamento dos dados VANT, utilizando o aplicativo Photoscan/Agisoft.

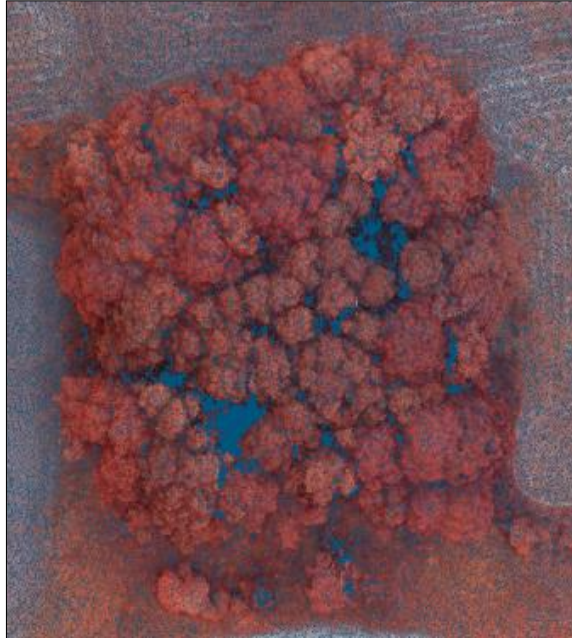
Figura 29 - Etapas do processamento dos dados VANT no aplicativo Photoscan/Agisoft.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A Figura 30 e 31 ilustram respectivamente, um recorte da nuvem de pontos fotogramétrica, e a ortoimagem gerada.

Figura 30- Recorte da nuvem de pontos fotogramétrica gerada no aplicativo Photoscan/Agisoft.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Figura 31- Ortoimagem georreferenciada gerada no aplicativo Photoscan/Agisoft, com a indicação da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A nuvem de pontos recortada foi filtrada no aplicativo CloudCompare, selecionando-se somente os pontos pertencentes ao terreno. Após fez-se a interpolação destes pontos, aplicando o método IDW (*Inverse Distance Weighting*).

Para realizar a interpolação do modelo digital do terreno (DTM) empregou-se o aplicativo *3D forest*. Este aplicativo é *opensource*, e geralmente é usado para a extração de parâmetros de árvores a partir de dados TLS (TROCHTA et al., 2017). O método de interpolação aplicado foi IDW. Esta técnica trabalha com o pressuposto de que as observações são menos parecidas conforme estas se distanciam entre si (SMITH; GOODCHILD; LONGLEY, 2015).

Após a conclusão do processamento dos dados obtidos pelo VANT, foram gerados três arquivos que serviram como fonte de dados para a extração das variáveis dendrométricas a partir de sensores embarcados em um VANT (Tabela 6).

Tabela 6 - Resumo dos arquivos criados e usados como fonte de dados para a extração das variáveis dendrométricas a partir de sensores embarcados em VANT.

Nome do arquivo	Descrição	Tamanho (KB)
nuvem.txt	Recorte da nuvem de pontos fotogramétricos para a área de estudo	16.685
ortoimagem.tif	Ortoimagem	17.023
idw.txt	DTM para o local de estudo	10.657

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

3.2.3 Dados obtidos utilizando técnicas tradicionais

Para verificar a aderência dos resultados extraídos pelas metodologias anteriormente apresentadas, foram mensurados dados a campo, aplicando técnicas convencionais de mensuração florestal. Obtendo-se assim a verdade de campo.

3.2.3.1 Demarcação e seleção das árvores

Foram demarcadas 66 árvores na área total do bosque, buscando selecionar visualmente as menos inclinadas e tortuosas. Estas árvores tiveram seu DAP assinalado com um fitilho, e acima deste receberam uma numeração com tinta azul e branca em faces opostas (Figura 32).

Figura 32 - Demarcação das árvores. a) Árvore selecionada do gênero *Eucalyptus* spp.; b) Árvore selecionada do gênero *Pinus* spp.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Também foi elaborado um croqui à campo locando as árvores demarcadas (Figura 33), que serviu para auxiliar na identificação das mesmas após o processamento dos dados TLS e de sensores embarcados em um VANT.

Figura 33 - Croqui das árvores selecionadas à campo.

a	a	a		1		2	a		a	3	4	5	a	a	6	7	a	8	a	9	a	10
				17													a	a	a	a	11	
a	a	a	a							16			15				13	12		a	a	a
a		a						a	18									23	a	a	a	a
	m	a			q	29			a		19	20									a	a
a		a						a	a						21			22			a	
a		a				a							a	28		27				24		a
		30						a			a	a				a			26			a
				31		32	a	a		a										a	a	25
39		38					a					37	36								a	a
			a					a				a									a	
40		a		a		41		42	43								35	a	34		33	
		50		a	q	49			a		a								45		a	
		a			a					48	a						a				a	
a			51					52				47				46				a		
					a		a		a		53							a	a	a		a
							57		56							a	a	a	a	a		a
a		51			q	a																
		q	59	60	61	a	a											a			a	
a							a										55	a			a	
a							a			62									a	54		a
a				66				a		a	a							63	a			a
											a							a			64	
								65		a	a						a	a		a	a	

a - árvores vivas; m - árvores mortas; q - árvores quebradas; os números representam as árvores que foram demarcadas.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

3.2.3.2 Coleta das variáveis dendrométricas empregando técnicas convencionais

O levantamento de dados dendrométricos utilizando métodos e equipamentos convencionais, foi realizado concomitante a mensuração com o TLS. Foram medidas todas as árvores vivas e demarcadas apresentadas na Figura 33.

O DAP foi obtido utilizando suta e fita métrica. Para determinar os diâmetros a diferentes alturas, foi empregado o dendrômetro Criterion, e para determinar a altura total foi utilizado o TruPulse.

3.3 EXTRAÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS

Para a extração das variáveis dendrométricas a partir das nuvens de pontos geradas foi utilizado o aplicativo *opensource* Python.

O Python é uma linguagem de programação que possui uma estrutura de dados de alto nível, e uma análise de programação orientada à objetos eficientes, e pode ser utilizado em praticamente qualquer sistema operacional (ALVES, 2013). Nele desenvolveu-se rotinas computacionais, capaz de processar e extrair as variáveis de interesse a partir dos dados TLS.

O aplicativo DetecTree foi utilizado para detectar o número de árvores e determinar as suas coordenadas a partir da ortoimagem da área de estudo. Originalmente o aplicativo DetecTree foi desenvolvido para trabalhar com imagens oriundas de dados coletados utilizando a varredura *LASER*. Porém ele também ser utilizado para processar outros tipos de imagens (DETECTREE, 2017).

3.3.1 Extração das variáveis dendrométricas a partir de dados TLS

3.3.1.1 Determinação do número de árvores com suas respectivas coordenadas

O objetivo principal da detecção de árvores em uma nuvem de pontos, é determinar a localização espacial das árvores que serão submetidas à extração das variáveis dendrométricas. Para isto é necessário que os algoritmos utilizados sejam flexíveis, e ofereçam resultados condizentes com a realidade (BUCK et al., 2016).

O arquivo de dados do recorte transversal da nuvem de pontos, foi empregado para a detecção e identificação das árvores, com suas respectivas coordenadas georreferenciadas.

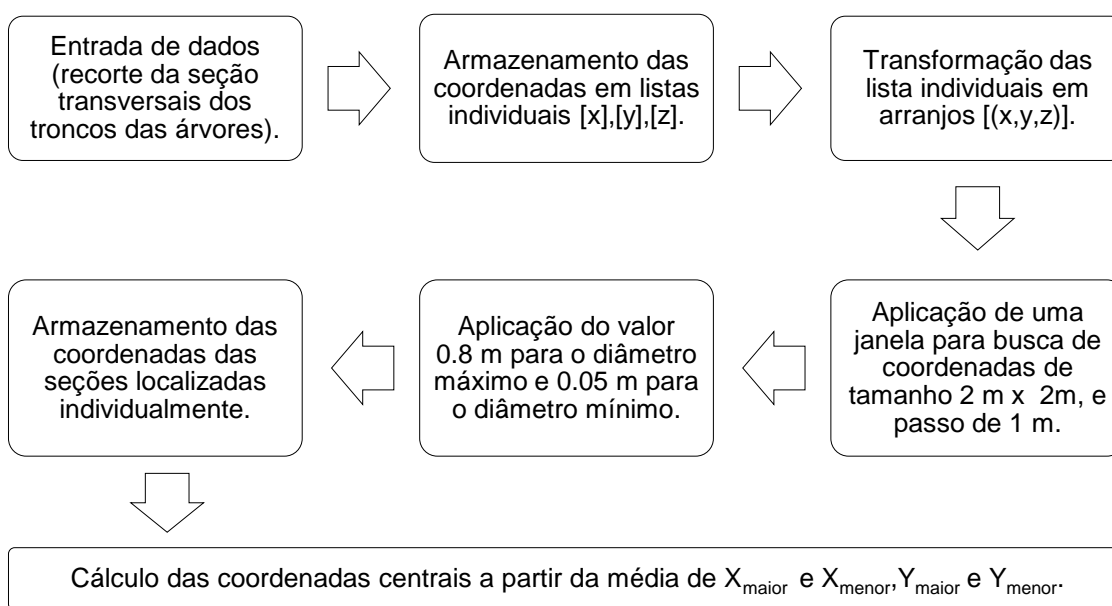
O algoritmo elaborado faz a detecção das árvores utilizando uma janela de busca e passo (avanço) estabelecidos pelo usuário. Para evitar que o algoritmo detecte erroneamente as árvores, o usuário também pode estabelecer para estas um diâmetro máximo e mínimo, que é determinado pela diferença entre X_{maior} e X_{menor} , e Y_{maior} e Y_{menor} . Se os pontos contidos no interior desta janela, não atenderem aos requisitos, eles não serão considerados. As coordenadas centrais (X_c e Y_c) das árvores são determinadas calculando a média de X_{maior} e X_{menor} , e de Y_{maior} e Y_{menor} , dos pontos contidos dentro da janela de busca.

Os parâmetros utilizados no algoritmo foram baseados no espaçamento observado entre as árvores, e nos dados coletados do bosque a partir de técnicas convencionais. O valor escolhido para a janela de busca foi de 2 x 2 metros, passo de 1 metro, diâmetro máximo de 0,8 metros e diâmetro mínimo de 0,05 metros.

Para a detecção automática a partir de uma janela de busca, Pesck (2015) aplicou o tamanho de 1,50 por 1,50 metro, o qual estava diretamente relacionado com espaçamento do plantio, de 2,2 x 3,6 metros, ou seja o tamanho da janela é inferior a distância entre as árvores.

A Figura 34 apresenta as etapas realizadas pelo algoritmo para a detecção e cálculo das coordenadas das árvores.

Figura 34- Fluxograma das etapas realizadas para a detecção e cálculo das coordenadas das árvores.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

3.3.1.2 Determinação do DAP e diâmetros a diferentes alturas

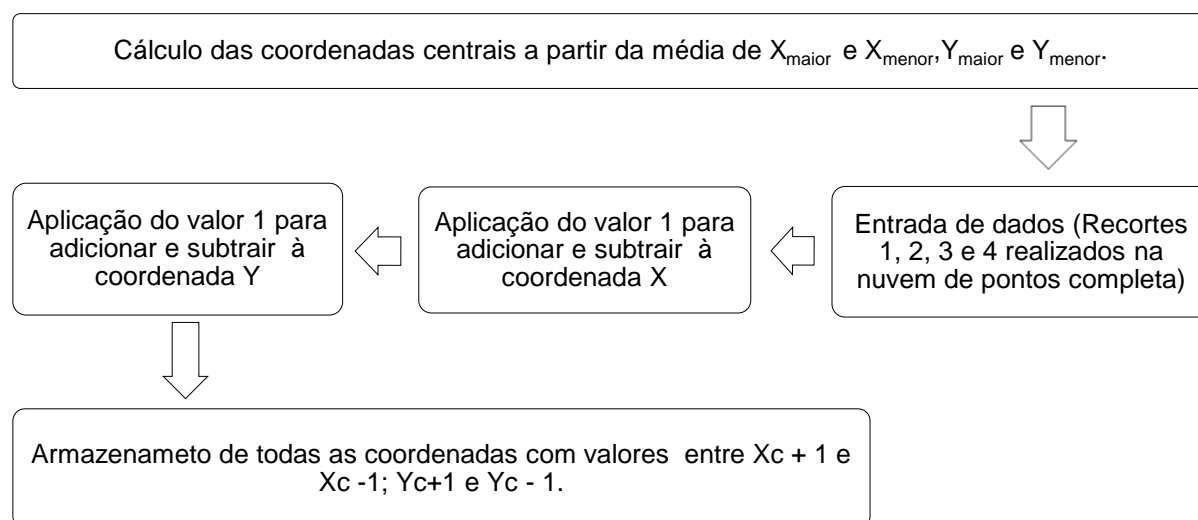
Para que o algoritmo possa extrair os diâmetros e alturas, primeiramente é necessário estipular as dimensões que irão criar um "envelope", o qual determinará quais coordenadas pertencem a árvore de interesse. O "envelope" é gerado a partir das coordenadas centrais (X_c e Y_c), as quais são adicionados e subtraídos os valores

de metade do envelope. A altura do "envelope" está automaticamente condicionada os valores de Z das coordenadas.

O valor estipulado para o envelope foi 2 x 2 metros, criando assim um envelope de 2 x 2 x h (altura) metros. Este valor foi determinado com base nas características das árvores do bosque, ou seja, devido a inclinação e altura das mesmas, a área do envelope não pode ser muito pequena, por causa da perda de informações, e também não poderá ser muito grande, pois pontos de árvores vizinhas podem no "envelope".

A Figura 35 mostra as etapas realizadas pelo algoritmo para selecionar os pontos pertencentes a cada árvore de interesse.

Figura 35- Fluxograma das etapas realizadas para a individualização das árvores.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Após a individualização das árvores é necessário inserir no algoritmo a altura em que deseja obter o diâmetro, e também a espessura da seção do tronco a partir da altura escolhida, que irá conter os pontos com as coordenadas.

Pesck (2015) adotou a espessura de 0,10 m para a seção transversal, com a finalidade de obter o diâmetro a partir do método da Distância Máxima.

Silva et al. (2011), utilizou em seu algoritmo a espessura de 1 cm para a seção transversal, com o objetivo de extrair o diâmetro da *Araucaria angustifolia*. Esta espessura é equivalente a largura de uma fita métrica utilizada para a medição direta.

Para a comparação dos dados TLS com os dados obtidos por meio de técnicas tradicionais, foram extraídos além do DAP, os diâmetros a cada 2 metros de altura, a contar do primeiro metro acima do solo. Também foi definido uma espessura de 0,05

m, o qual irá separar os pontos pertencentes a seção. A escolha desta grandeza é em razão do número de pontos máximos que a nuvem possui a determinada distância, ou seja, há apenas 1 ponto a cada 2,2 centímetros. Uma espessura muito pequena (ex. 0,01 m ou 0,02m) poderá não conter o número necessário de pontos para extrair o diâmetro, assim como uma espessura muito grande (ex. 0,10 m) poderá interferir no cálculo do diâmetro não representado-o na altura desejada.

O algoritmo executa esta tarefa buscando pela menor coordenada de Z do envelope e adiciona a altura inserida. Todas as coordenadas que se encontram entre o valor calculado mais 0,05 m são armazenadas, e então extrai-se o diâmetro a altura desejada.

Os diâmetros foram calculados por meio da leitura das coordenadas que pertencem a seção selecionada, onde o algoritmo determina os valores máximos e mínimos de abscissas e ordenadas. Então a distância planimétrica entre X_{maior} e X_{menor} , e entre Y_{maior} e Y_{menor} é determinada. Ao final faz-se a média das distâncias encontradas, a qual é definida como o diâmetro da seção.

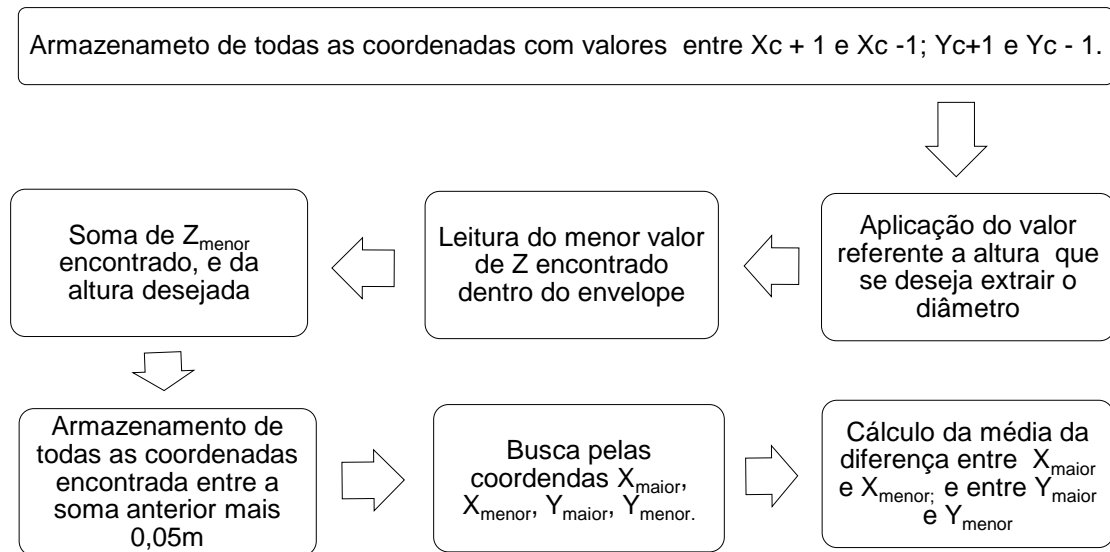
Lingnau et al. (2009) desenvolveu um algoritmo que lê as coordenadas das fatias estabelecidas encontrando as coordenadas X_{maior} , X_{menor} , Y_{maior} , Y_{menor} , e executa o cálculo da distância entre o ponto que possui X_{maior} e o que possui o X_{menor} , e também realiza o mesmo com os pontos que contém os valores de Y_{maior} , Y_{menor} . A maior distância é escolhida como provável diâmetro. Após o algoritmo avalia a distância de todos os pontos da seção a estes dois, sendo que ao final, a distância mais afastada é tida como o diâmetro.

Silva (2011) em sua pesquisa explicou que o método desenvolvido por Lingnau para extrair o diâmetro apresenta bons resultados na determinação do DAP em dados de varreduras simples e múltiplas. Porém, geralmente apresenta superestimativas por escolher a maior distância entre os pontos encontrados na seção.

Pesck (2015) descreveu que ao utilizar o método das Distâncias Máximas desenvolvido por Lingnau, a tendência de superestimativa foi amenizada em sua pesquisa por estar trabalhando com *Eucalyptus spp*, cuja as seções apresentam-se mais circulares.

A Figura 36 mostra as etapas realizadas pelo algoritmo para extrair os diâmetros a diferentes alturas.

Figura 36- Fluxograma das etapas para extrair os diâmetros.



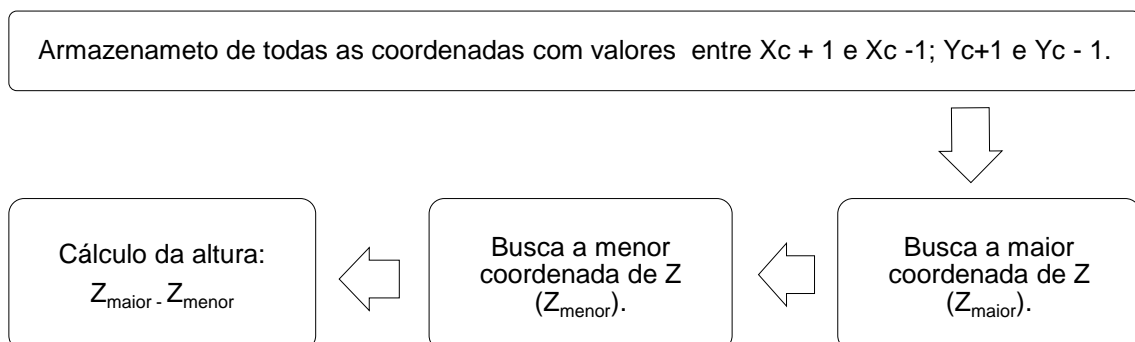
Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

3.3.1.3 Determinação da altura total

A altura total foi obtida pela diferença entre a maior e menor coordenada de Z ($Z_{\text{maior}} - Z_{\text{menor}}$) contida no envelope utilizado para a individualização das árvores (Figura 37).

A altura total das árvores é uma variável que pode ser determinada de maneira simples e rápida, a partir da subtração entre o ponto mais alto da copa e o ponto mais baixo do tronco (ASCHOFF et al., 2004; HOPKINSON et al., 2004; BIERNERT et al., 2006, SILVA et al., 2011).

Figura 37- Fluxograma das etapas para a extração da altura total.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

3.3.2 Extração das variáveis dendrométricas a partir de sensores embarcados em um VANT

3.3.2.1 Determinação do número de árvores e suas coordenadas

Para a extração do número de árvores utilizando o aplicativo DetecTree foi aplicado o valor de 5 para *sigma*, 10 para *minimum distance* (Distância mínima) e 3 para *Band* (Banda).

O valor de *sigma* corresponde ao desvio padrão do Kernel Gaussiano (Figura 39). Este valor determinará o quão "agressivo" será a filtragem, ou seja, a medida que aumenta-se a grandeza de sigma, a imagem torna-se cada vez mais suavizada. Portanto um valor muito alto resultará em um imagem embaçada (DETECTREE, 2017).

O parâmetro *Minimum distance* é aplicado para evitar haver muitos pontos na vizinhança. Isto significa que o número de pixel será de duas vezes a distância mínima mais 1 (Equação 1). E o parâmetro *Band*, se refere ao número de bandas em uma imagem (DETECTREE, 2017).

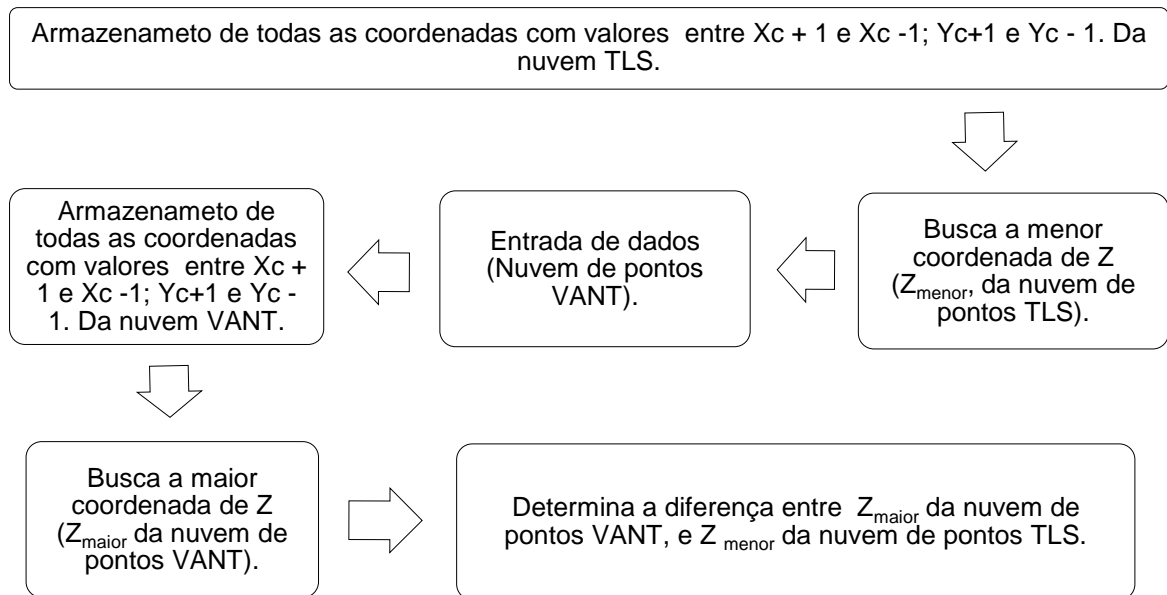
$$2 * \text{min_distance} + 1 \text{ (Eq. 1).}$$

3.3.2.2 Determinação da altura total

A variável altura total foi obtida utilizando o aplicativo Python, e integrando a nuvem de pontos TLS com a nuvem de pontos adquiridos a partir de sensores embarcados em um VANT.

No primeiro método, foi adicionado ao algoritmo já criado, a nuvem de pontos obtida pelos sensores embarcados em um VANT. Um envelope idêntico ao já existente é criado para definir quais os pontos da copa pertencem a árvore em questão. A altura total foi definida pela subtração do maior valor da coordenada Z encontrado dentro do envelope a partir da nuvem de pontos gerada pelos sensores embarcados em um VANT, e do menor valor da coordenada Z encontrada no envelope a partir de nuvem de pontos TLS (Figura 38).

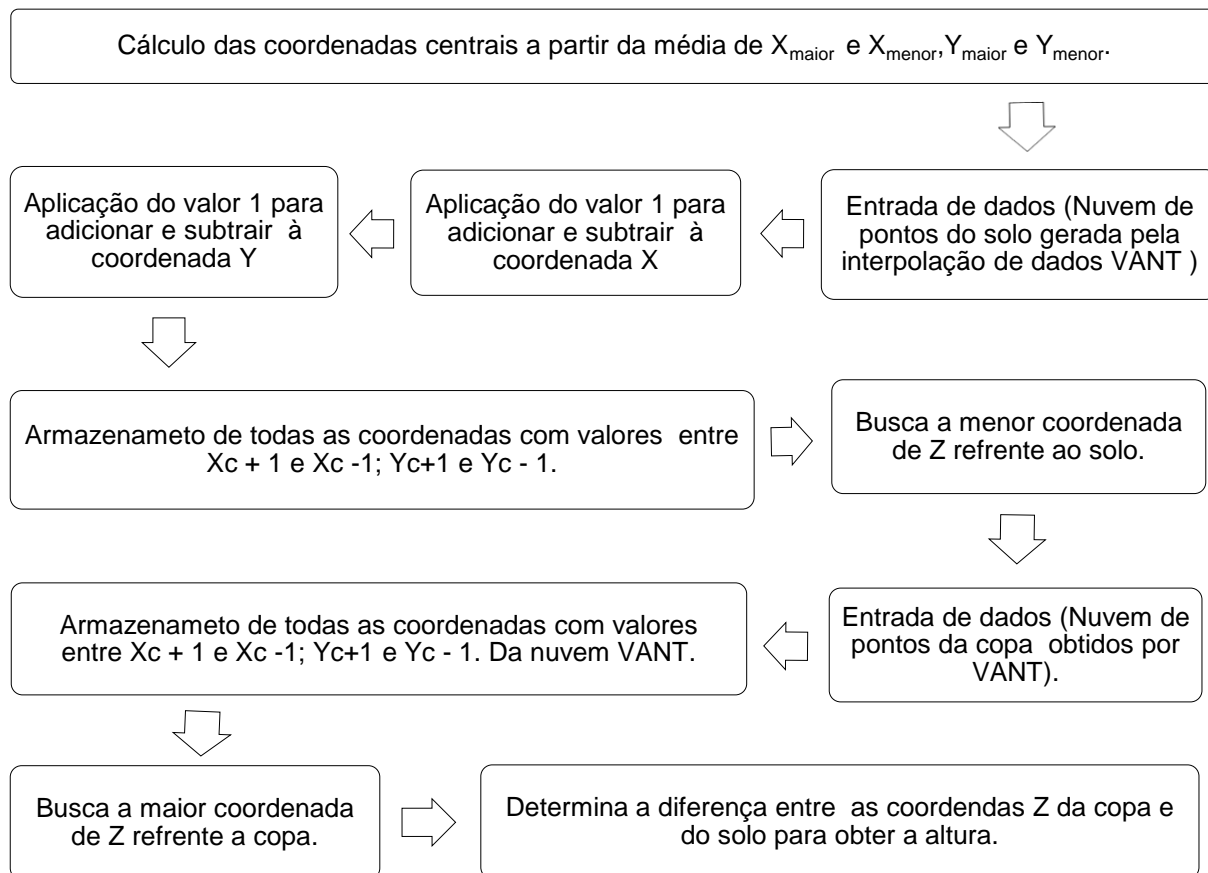
Figura 38- Fluxograma das etapas de extração da altura total a partir da integração de dados TLS e dados obtidos por meio de sensores embarcados em um VANT.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

No segundo método para a obtenção da altura total foi realizada apenas a substituição do arquivo referente ao recorte da nuvem de pontos completa capturada por meio do TLS, pelo DTM. Assim a altura total foi determinada subtraindo a coordenada de maior valor da copa pela coordenada de menor valor do solo (Figura 39).

Figura 39- Fluxograma para a extração da altura total utilizando as coordenadas de Z baseadas na nuvem fotogramétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

3.4 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS ÁRVORES INDIVIDUAIS

A representação gráfica das árvores sob diversas perspectivas foi criada utilizando o aplicativo Python. Para gerar estes gráficos foram utilizadas as coordenadas armazenadas em listas/envelopes. Estas informações foram usadas para auxiliar na análise dos resultados quando necessário.

3.5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

As análises estatísticas aplicadas para a avaliação dos resultados foram realizadas utilizando o aplicativo *Action Stat* versão de avaliação.

3.5.1 Avaliação das metodologias usadas para a detecção das árvores

Para a avaliação das metodologias aplicadas para identificação das árvores utilizou-se os índices de acurácia (Equações 2 a 4). Como parâmetro para comparação foi usada a nuvem de pontos TLS do recorte transversal, contendo as seções das árvores pertencentes ao segundo levantamento à campo.

Erro de Omissão (%) = $N^{\circ} \text{ Arv não detectadas} / N^{\circ} \text{ Total de Arv}$ (eq. 2)

Erro de Comissão (%) = $N^{\circ} \text{ Arv detectadas erroneamente} / N^{\circ} \text{ Total de Arv}$ (eq. 3)

Acerto (%) = $N^{\circ} \text{ Arv detectadas corretamente} / N^{\circ} \text{ Total de Arv}$ (eq. 4)

3.5.2 Avaliação das metodologias aplicadas para a extração dos diâmetros e alturas

Os dados obtidos utilizando técnicas tradicionais foram utilizados como parâmetro para comparação.

Para realizar a análise estatística dos dados, foram utilizadas 30 árvores do total mensurado. E para certificar-se da normalidade aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk. Este teste se faz necessário devido a dificuldade em coletar dados a medida que a altura aumenta, diminuindo assim o número de amostras.

"Para amostras de tamanho $n > 30$, a distribuição das médias amostrais pode ser aproximada satisfatoriamente por uma distribuição normal." (TRIOLA, 1998).

Os dados que não se enquadraram na distribuição normal foram submetidos a transformação de Box-Cox antes de realizar os testes para comparações.

O teste de F foi empregado para verificar se os tratamentos possuem diferença estatísticas significativa entre si, aplicado ao nível de significância de 0,05%.

A estatística de teste F é destinada a uma afirmação realizada sobre duas variâncias, também podendo ser aplicada a dois desvios-padrão populacionais, onde, um valor de F próximo de 1 sustenta a conclusão de que as variâncias são iguais, e o contrário evidencia uma conclusão contra a igualdade das variâncias (TRIOLA, 1998).

Conforme Anjos (2005), após verificar a diferença significativa entre os tratamentos aplicando o teste de F , e houver interesse em estimar a magnitude destas diferenças, pode-se utilizar o teste de comparações múltiplas de *Tukey*, o qual permite testar o contraste, sempre, entre duas médias.

Freitas e Wichert (1998), aplicaram os testes estatísticos de *F* e de *Tukey*, para comparar as variáveis dendrométricas obtidas utilizando o Suunto, Blume Leiss, Criterion 400 sem tripé e Criterion 400 com tripé.

A quantidade de variação encontrada foi expressa utilizando o coeficiente de determinação R^2 ou r^2 , e a distribuição gráfica dos resíduos.

Segundo Triola (1998, p. 251), "O coeficiente de determinação é o valor da variação de y que é explicado pela reta de regressão".

Buck et al. (2016), utilizou o coeficiente de regressão para avaliar a altura total e o gráfico de distribuição dos resíduos sobre o DAP, das árvores obtidas pela cubagem à campo e pelo processamento de dados *laser*.

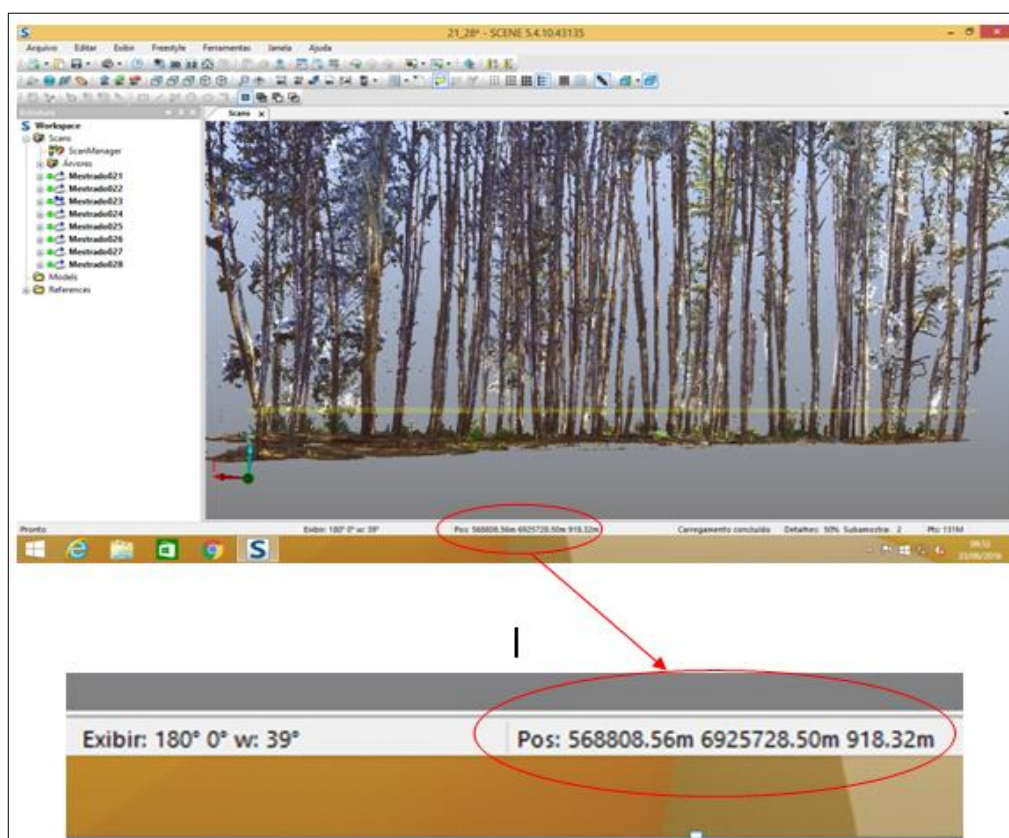
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS

4.1.1 Registro e georreferenciamento da nuvem de pontos TLS

A Figura 40 mostra a nuvem de pontos TLS após o registro e o georreferenciamento realizado no aplicativo Scene. Também optou-se por aplicar cores à nuvem, melhorando assim a qualidade do produto.

Figura 40 - Nuvem de pontos 3D georreferenciada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A apresentação visual (Figura 40) mostra o alto grau de detalhamento das árvores, o que é atribuído ao método de coleta de dados à campo empregado, e consequentemente ao posicionamento do equipamento e dos alvos, os quais permitiram que o registro fosse realizado utilizando todas as varreduras.

Quando se emprega a varredura múltipla para a coleta de dados TLS à campo, o tempo destinado para tal tarefa é elevado devido ao número de estações utilizadas, assim como, para efetuar o registro da nuvem de pontos. Porém este método permite alcançar um maior nível de detalhamento das árvores (BUCK et al., 2016).

De acordo com Dassot, Constant e Fournier (2011), é necessário que haja pelo menos três alvos de referência visíveis em cada varredura, para que se possa realizar a transformação geométrica para unir os dados em uma nuvem de pontos.

4.1.2 Filtragem da nuvem de pontos fotogramétrica empregando o aplicativo CloudCompare e DTM gerado no aplicativo 3DForest

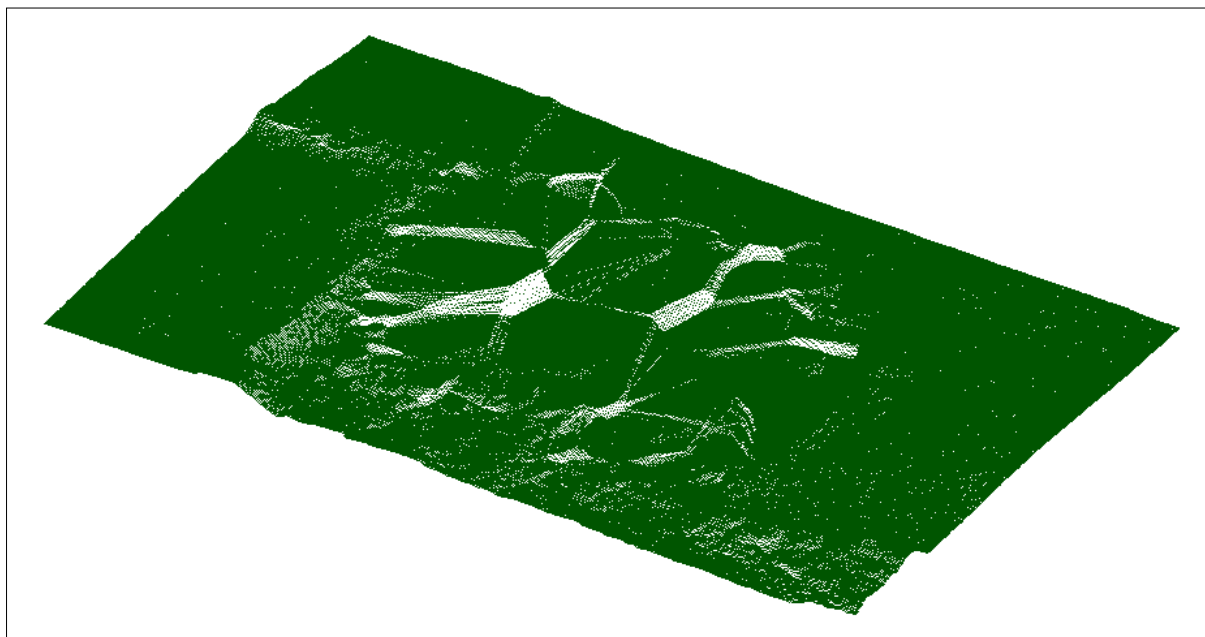
Empregando o aplicativo CloudCompare para a filtragem da nuvem de pontos fotogramétrica, obteve-se uma nova fonte de dados contendo apenas os pontos referentes ao terreno (Figura 41). A partir destas informações e utilizando o único método de interpolação disponível no aplicativo 3D Forest, o IDW, foi criado o DTM (Figura 42).

Figura 41 - Filtragem da nuvem de pontos fotogramétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Figura 42 - DTM gerado após a interpolação dos pontos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A criação do DTM forneceu dados para a extração da variável dendrométrica altura total. Sem a aplicação desta metodologia não seria possível determinar a cota Z_{\min} utilizando apenas as informações geradas a partir da nuvem de pontos fotogramétricas, pois a rotina desenvolvida em Python exige a presença de no mínimo uma coordenada para que esta variável possa ser determinada.

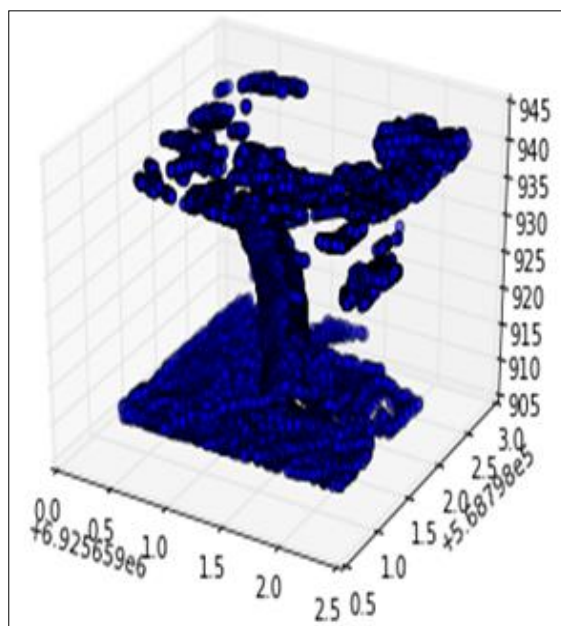
De acordo com Bienert et al. (2006), muitos autores aplicam o DTM para a determinação da altura total das árvores, devido ao elevado número de pontos que referentes ao solo que é gerado. Esse volume de informações permite que o ponto mais baixo de cada árvore, seja obtido com maior facilidade.

4.1.3 Envelope gerado empregando o aplicativo Python

O envelope criado no aplicativo Python, permitiu selecionar as coordenadas pertencentes ao tronco de cada árvore, individualmente. No entanto, devido a forte inclinação das árvores, em muitas situações também foram incluídas coordenadas pertencentes à copa de árvores vizinhas, não sendo possível individualizar todas as árvores por completo.

A Figura 43 ilustra um envelope criado para selecionar as coordenadas de cada árvore, em listas individuais temporárias.

Figura 43 - Envelope criado para a individualização das árvores de interesse utilizando o aplicativo Python.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Para esta área de estudo, o tamanho definido de 2 x 2 x h (altura) metros apresentou-se adequado, pois dimensões maiores acabariam incluindo coordenadas pertencentes ao fuste de árvores vizinhas, assim como dimensões menores que a definida, deixariam de selecionar dados importantes.

Buck et al. (2016), realizou o recorte das árvores individuais a partir das coordenadas planimétricas do vetor de médias ($X_c; Y_c$), utilizando um raio de 1,80 metros, correspondente à metade do maior espaço definido no alinhamento.

4.1.4 Representação gráfica dos dados utilizando o aplicativo Python

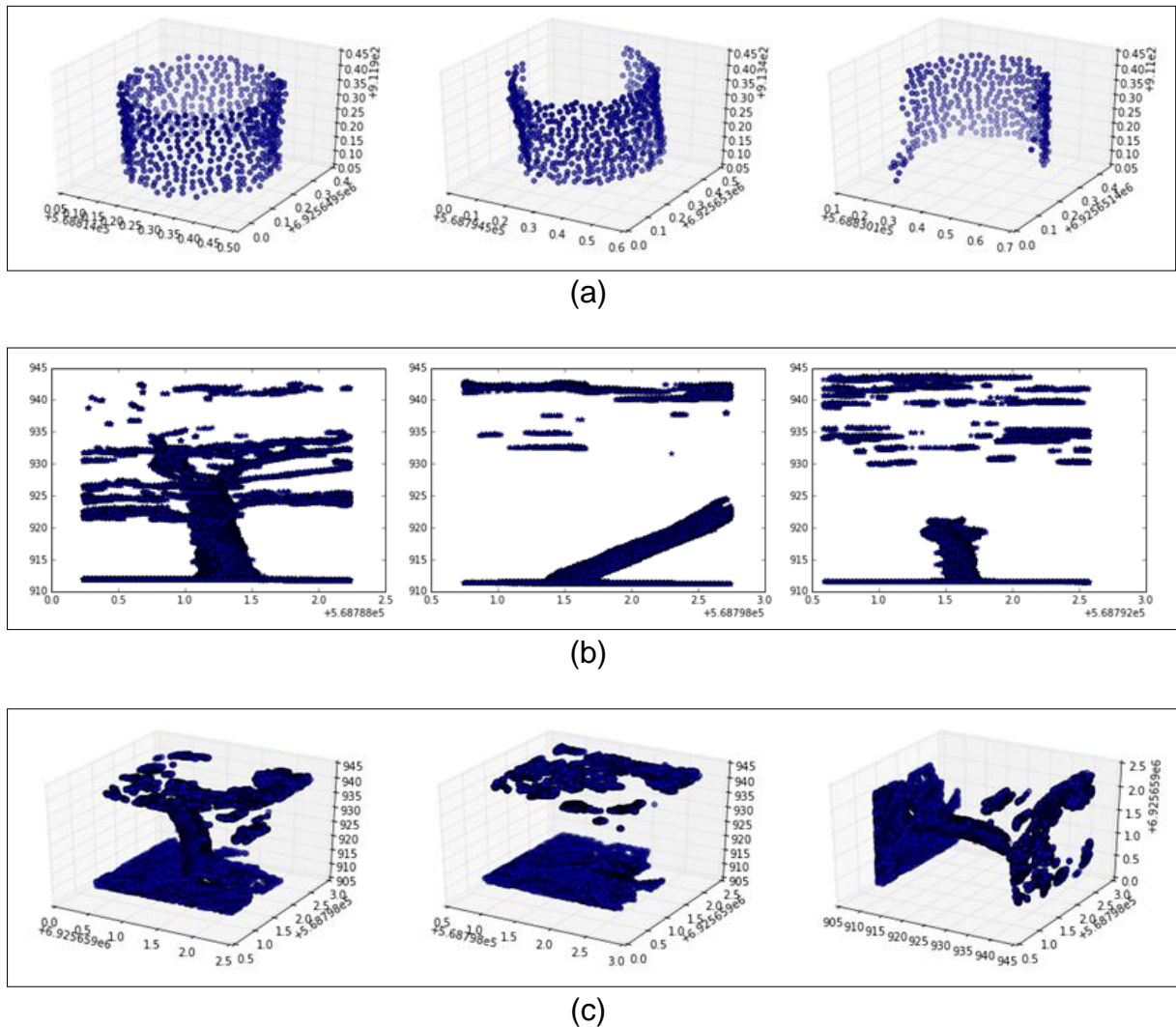
A rotina aplicada no aplicativo Python para a criação da representação gráfica dos dados, permitiu verificar o comportamento dos dados e as respostas dos algoritmos elaborados, complementando assim análise dos resultados.

A Figura 44a mostra exemplos obtidos com a representação gráfica das seções transversais, onde foi possível verificar o efeito do sombreamento, e a sua intensidade.

A Figura 44b ilustra exemplos de representação das árvores obtidas em 2D, das quais foi possível observar a presença de galhos, pontos referentes a copas e a

inclinação das árvores mensuradas, assim como na Figura 44c, porém esta é apresentada em 3D sob diferentes perspectivas.

Figura 44 - Exemplo das representações gráficas criadas no Python. a) Exemplo de seções transversais detectadas em 3D; b) Perfil das árvores em 2D; c) Gráfico em 3D do envelope sob diferentes perspectivas.



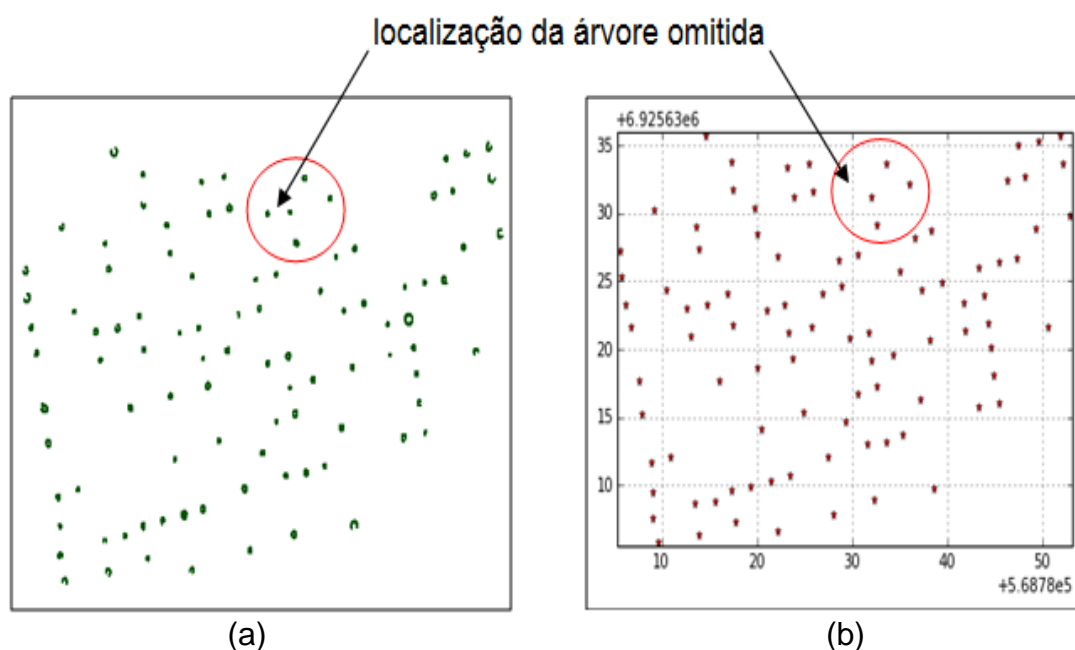
Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

4.2 AVALIAÇÃO DO MÉTODO PARA DETECÇÃO DAS ÁRVORES A PARTIR DOS DADOS TLS

A extração das coordenadas, e a representação gráfica das seções transversais das árvores selecionadas, permitiu realizar uma avaliação precisa dos dados obtidos.

A Figura 45a ilustra as seções transversais obtidas a partir do recorte da nuvem de pontos, a qual contempla as árvores mensuradas no segundo levantamento. E a Figura 45b representa a localização espacial de cada árvore detectada utilizando do aplicativo Python. Um círculo vermelho abrangendo um pequeno grupo de seções foi criado manualmente para facilitar a identificação da árvore omitida.

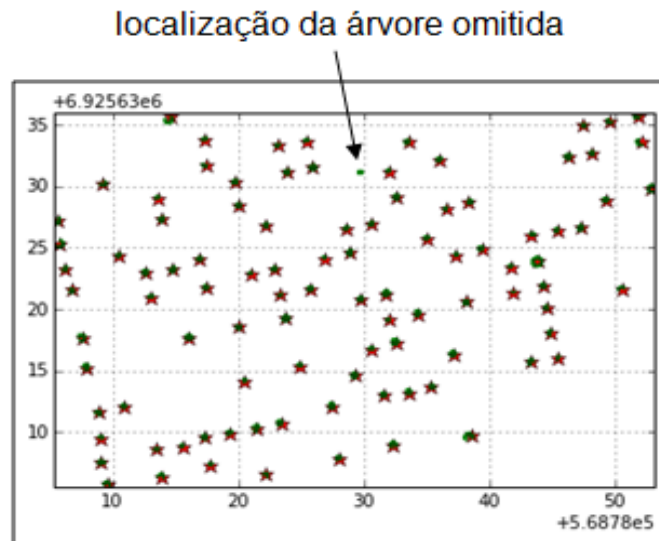
Figura 45 - Representação gráfica. a) total de seções transversais das árvores selecionadas com a localização espacial da árvore omitida. b) total de árvores detectadas e a localização espacial da árvore omitida.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

No Python também foi possível realizar a mesma análise através da sobreposição das imagens. Na Figura 46 as seções transversais da nuvem de pontos TLS foram representadas por pontos verdes, e as coordenadas das árvores detectadas foram representadas por estrelas vermelhas.

Figura 46 - Sobreposição das seções transversais da nuvem de pontos TLS mensuradas à campo, representada por pontos verdes, e das coordenadas detectadas, representadas pelas estrelas vermelhas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A Figura 47 mostra um quadro com a lista de todas as coordenadas centrais ($X_c; Y_c$) detectadas, utilizando o Python.

Figura 47 - Quadro com a lista das coordenadas centrais (Xc;Yc) em metros obtidas utilizando o Python.

Árvore	Leste	Norte	Alt	Xc	Yc
1	568789,610	6925635,760	51	568792,650	6925652,980
2	568793,895	6925636,380	52	568794,810	6925653,250
3	568797,810	6925637,330	53	568801,005	6925652,885
4	568802,235	6925636,630	54	568802,915	6925653,260
5	568789,080	6925637,530	55	568821,715	6925653,475
6	568808,015	6925637,885	56	568786,215	6925653,305
7	568793,550	6925638,635	57	568790,500	6925654,380
8	568795,580	6925638,860	58	568796,985	6925654,065
9	568797,310	6925639,660	59	568806,845	6925654,160
10	568812,290	6925638,975	60	568808,930	6925654,605
11	568818,585	6925639,710	61	568817,330	6925654,410
12	568789,075	6925639,535	62	568823,820	6925653,905
13	568799,325	6925639,910	63	568785,810	6925655,300
14	568801,460	6925640,295	64	568819,480	6925654,950
15	568803,470	6925640,745	65	568815,015	6925655,785
16	568788,880	6925641,650	66	568823,360	6925656,080
17	568790,900	6925642,095	67	568825,375	6925656,390
18	568807,470	6925642,115	68	568827,250	6925656,690
19	568811,575	6925643,030	69	568793,945	6925657,325
20	568813,580	6925643,230	70	568802,260	6925656,830
21	568800,530	6925644,175	71	568808,590	6925656,615
22	568809,270	6925644,680	72	568810,595	6925656,955
23	568815,365	6925643,710	73	568785,655	6925657,210
24	568787,925	6925645,290	74	568800,060	6925658,430
25	568804,925	6925645,430	75	568816,555	6925658,155
26	568823,315	6925645,735	76	568793,570	6925659,080
27	568817,100	6925646,360	77	568812,605	6925659,105
28	568825,480	6925645,995	78	568818,335	6925658,740
29	568787,645	6925647,670	79	568829,240	6925658,850
30	568810,620	6925646,785	80	568832,910	6925659,790
31	568812,570	6925647,335	81	568789,235	6925660,235
32	568796,110	6925647,710	82	568799,745	6925660,355
33	568800,095	6925648,640	83	568803,930	6925661,145
34	568824,860	6925648,060	84	568805,940	6925661,670
35	568803,795	6925649,265	85	568811,985	6925661,235
36	568811,980	6925649,125	86	568797,515	6925661,695
37	568814,260	6925649,660	87	568815,980	6925662,195
38	568818,175	6925650,640	88	568826,295	6925662,420
39	568824,590	6925650,100	89	568803,165	6925663,330
40	568786,785	6925651,630	90	568813,565	6925663,685
41	568793,120	6925651,010	91	568828,190	6925662,720
				568832,095	6925663,590

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Com base nos dados observados foram calculados os índices de acurácia para a detecção das árvores a partir da nuvem de pontos obtida com TLS (Tabela 7).

Tabela 7 - Índices de acurácia para a detecção das árvores a partir dos dados TLS.

Parâmetro	Número de árvores Detectadas			Índices de Acurácia (%)		
	Total	Corretas	Erradas	Omissão	Comissão	Acerto
98	97	97	0	1,02	0	98,98

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Apesar de haver um caso de omissão o que representou 1,02% do total de árvores encontradas, a apreciação visual apontou a detecção de 100% das árvores demarcadas/numeradas à campo, pertencentes ao recorte da nuvem de pontos referente ao segundo levantamento. Por este motivo não foram realizadas novas tentativas de localizar 100% das árvores, já que o algoritmo permite alterar variáveis como tamanho da janela de busca, avanço da janela (passo), dimensões máximas e mínimas do diâmetro para a seleção de árvores.

A escolha da grandeza destas variáveis é determinante para o bom desempenho do algoritmo, e neste caso elas foram escolhidas baseando-se nas características das árvores do bosque.

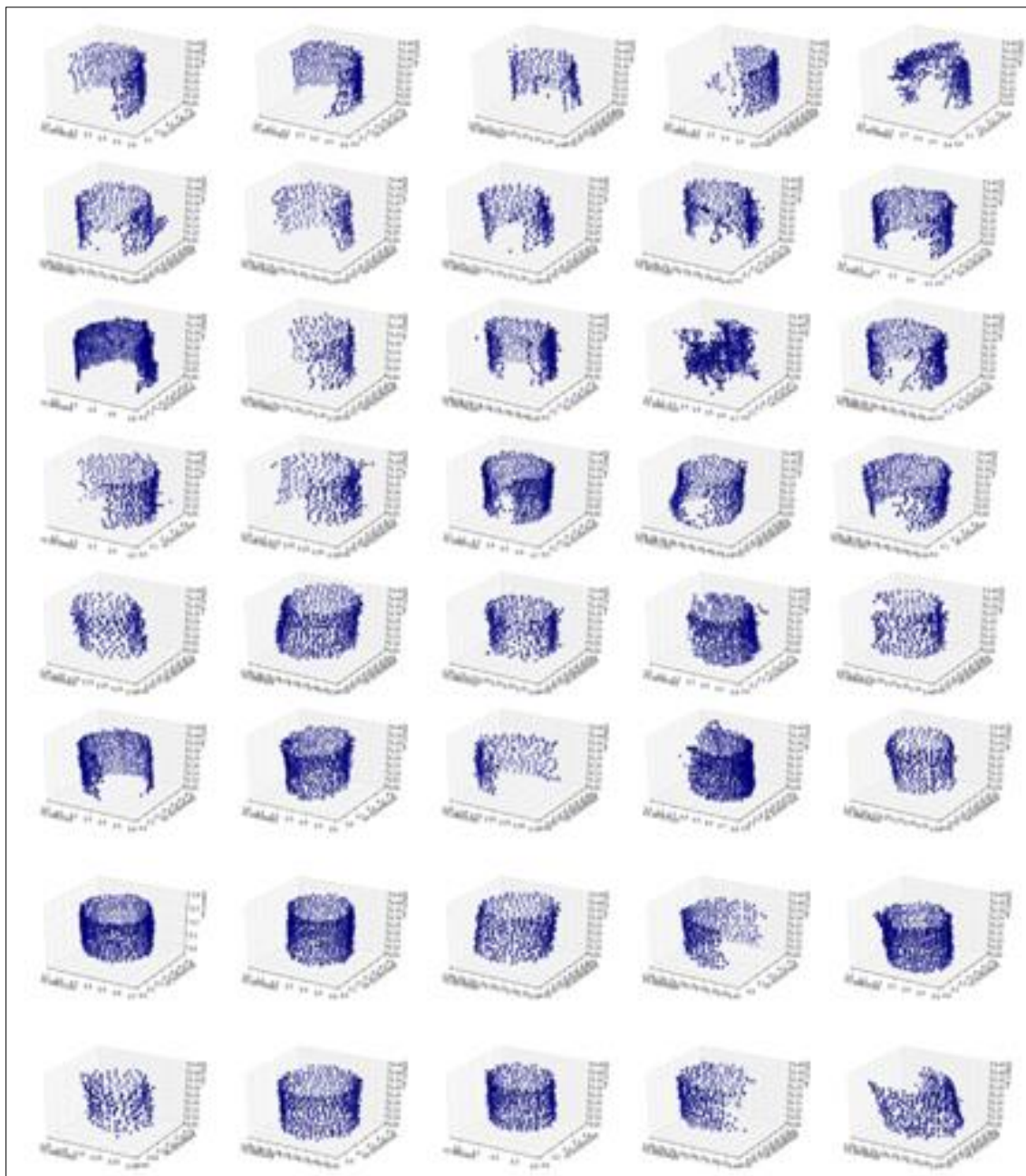
As árvores da área de estudo não apresentam espaçamentos bem definidos, nenhum tipo de trato silvicultural, e ainda há duas espécies distintas plantadas com uma grande variação de diâmetro, e de qualidade de fuste, o que pode explicar a o erro de omissão.

Em florestas boreais, onde a distribuição espacial das árvores não encontram-se em linhas, e a amplitude diamétrica é maior do que em plantios clonais, Liang e Hyypä (2013) detectaram corretamente 96% das árvores aplicando o método de varreduras múltipla.

Thies e Spiecker (2004), detectaram automaticamente 52% das árvores utilizando o método de varreduras múltiplas em florestas mistas, caracterizadas por 95% de faia (*Fagus sylvatica* L.) e 5% de carvalho (*Quercus spec.*), em unidades amostrais de 900 m².

A Figura 48 apresenta uma amostra das seções transversais representadas em 3D. Esta figura evidencia que mesmo aplicando o método de varreduras múltiplas, muitas árvores mensuradas foram cometidas pelo sombreamento.

Figura 48 - Amostras das representações gráficas em 3D seções transversais detectadas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Segundo Martins Neto (2016), "mesmo com varreduras múltiplas podem ocorrer alguns sombreamentos das árvores, principalmente em florestas onde não há espaçamento ou onde o espaçamento não esteja muito bem definido."

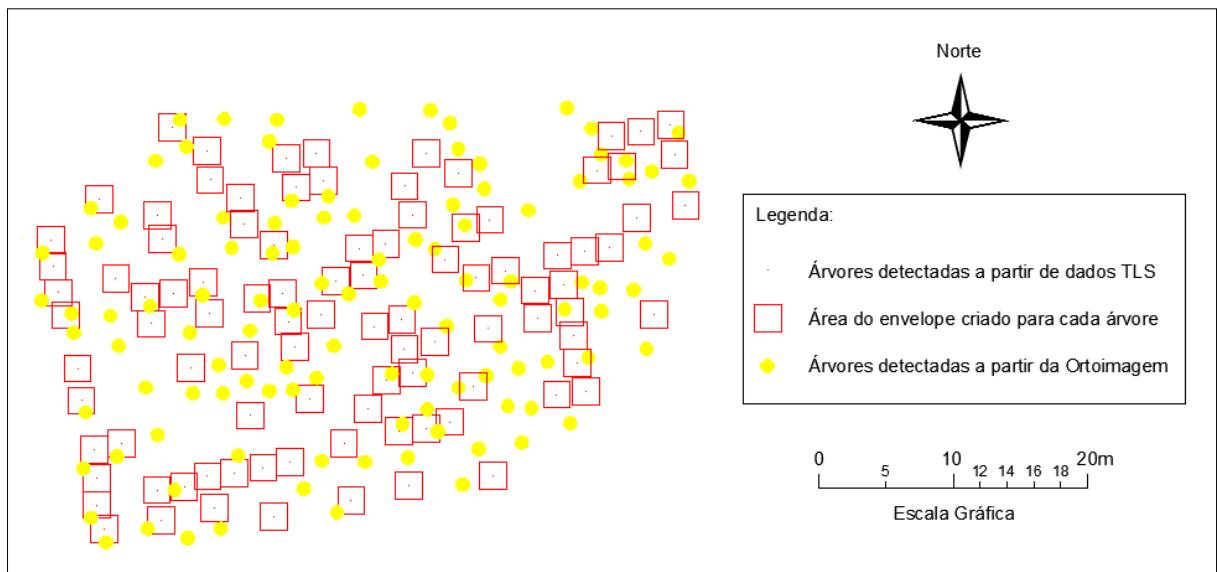
De acordo com Zasada et al. (2013), o sombreamento está associado a subestimativas do número de árvores existentes na parcela.

Pelo erro de omissão ter apontado um valor muito baixo (1,02%), o sombreamento não é uma causa provável deste resultado, pois o número de árvores que apresentaram algum grau deste efeito é muito alto, ou seja, das 97 seções detectadas, apenas 32 não apresentaram sombreamento.

4.3 DETECÇÃO DAS ÁRVORES A PARTIR DA ORTOIMAGEM

Na Figura 49 os pontos referentes ao recorte das seções da nuvem de pontos que foi utilizada como parâmetro de comparação, está representada por um ponto vermelho no centro de um quadrado da mesma cor e com dimensões equivalentes ao tamanho do envelope. Os círculos amarelos com raio de 0,5 m representam os pontos detectados pelo aplicativo DetecTree.

Figura 49 - Pontos referentes as árvores detectadas a partir da ortoimagem, e pontos com a área de envelope utilizado como parâmetro.

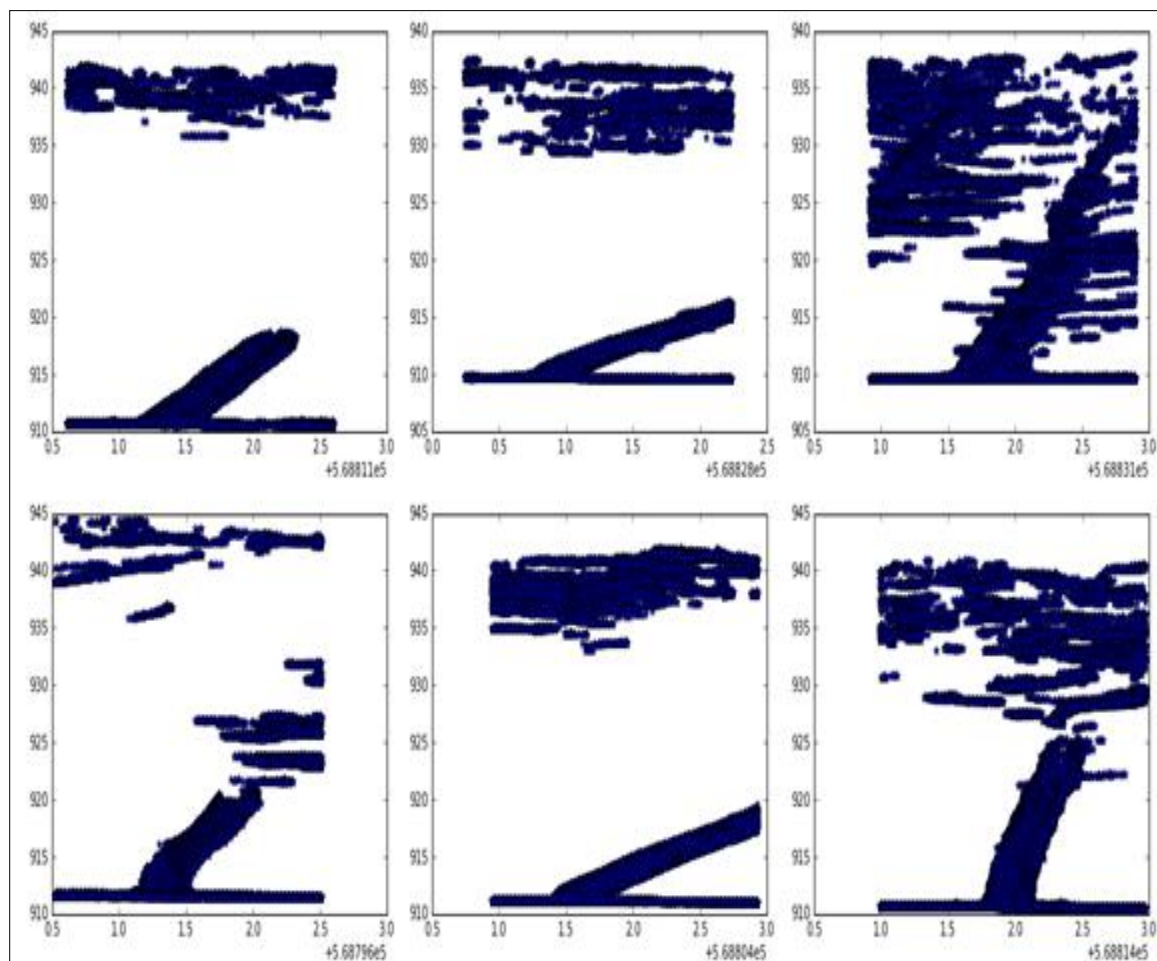


Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

O aplicativo DetecTree encontrou 112 árvores na área de estudo. Porém as coordenadas encontradas não coincidiram com as coordenadas usadas como parâmetro. Como a área de copa é maior que a área basal do tronco, foi adotado como critério para a árvore detectada corretamente, somente um círculo que sobrepõe totalmente ou parcialmente a área do envelope. A não compatibilidade dos pontos referentes ao tronco e o ápice das copas já era esperado, principalmente devido a

grande inclinação das árvores, como mostra os exemplos retirados dos envelopes da nuvem de pontos TLS ilustrados na Figura 50.

Figura 50 - Inclinação das árvores. Exemplos de árvores obtidas a partir da nuvem de pontos TLS.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A Tabela 8 apresenta os resultados dos índices de acurácia encontrados para a detecção das árvores a partir da ortoimagem obtida por sensores embarcados em um VANT, de acordo com os critérios estabelecidos.

Tabela 8 - Índices de acurácia para a detecção das árvores a partir da ortoimagem.

Parâmetro	Número de árvores Detectadas			Índices de Acurácia (%)		
	Total	Corretas	Erradas	Omissão	Comissão	Acerto
98	112	52	60	46,94	61,22	53,06

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Além da inclinação já mencionada, outros fatores que podem ter influenciado no erro de omissão são a presença de espécies diferentes, e a não homogeneidade das árvores. Apesar da realização de vários testes, o baixo valor definido para o *sigma* (igual a 1) do aplicativo Detectree, pode ser a principal causa do erro de comissão, pois o mesmo poderá detectar mais de um pico em uma só árvore, devido à baixa suavização. O acerto de 53,06%, foi o melhor valor obtido na comparação com os dados como a verdade de campo. Porém resultado inferior quando comparado a outras metodologias utilizadas em áreas mais homogêneas.

Favarin (2013) utilizou imagens obtidas por sensores embarcados em um VANT, e realizou uma contagem da copa das árvores, em uma parcela de um plantio homogêneo de *Pinus taeda*, onde detectou 80 árvores nas imagens adquiridas, sendo que no levantamento a campo foram identificadas 89 árvores.

Nunes e Freitas (2014) utilizando um VANT embarcado com uma câmera RGB Cannon T3i, e o aplicativo *eCognition*, realizou a detecção e contagem de árvores em parcelas contidas em um talhão florestal clonal de *Eucalyptus urograndis*, onde alcançou resultados que subestimaram o valor real, com perda máxima de 25 indivíduos de um total de 469, o qual demonstrou grande potencial.

Utilizando aviões de 3 m de envergadura de asa com uma câmera com resolução de 12 mega pixel RGB, Pontes e Freitas (2015), obtiveram erro médio de omissão de 10% na contagem de árvores em plantios de eucalipto, utilizando para a análise o aplicativo ArcGis 10.1 desenvolvido pela empresa ESRI.

4.4 AVALIAÇÃO DO MÉTODO PARA A EXTRAÇÃO DOS DIÂMETROS

A Tabela 9 apresenta as estatísticas descritivas dos resultados obtidos para a extração dos diâmetros em diferentes alturas, contendo os valores referentes ao número de árvores amostradas, média, desvio padrão, variância e os valores máximos e mínimos para os diâmetros.

Tabela 9- Estatística descritivas para os métodos de extração do d_i .

d_i	Estatística Descritiva											
	N		Média (m)		Desvio Padrão (m)		Variância (m ²)		Máximo (m)		Mínimo (m)	
	TLS	Conv	TLS	Conv	TLS	Conv	TLS	Conv	TLS	Conv	TLS	Conv
$d_{1,3}$	30	30	0,353	0,351	0,081	0,083	0,007	0,007	0,550	0,555	0,210	0,207
$d_{3,3}$	30	30	0,349	0,331	0,080	0,079	0,006	0,006	0,610	0,514	0,200	0,185
$d_{5,3}$	30	30	0,455	0,315	0,306	0,077	0,094	0,006	1,290	0,482	0,150	0,169
$d_{7,3}$	29	30	0,436	0,297	0,312	0,076	0,097	0,006	1,640	0,457	0,170	0,153
$d_{9,3}$	27	30	0,513	0,275	0,341	0,076	0,116	0,006	1,390	0,443	0,150	0,137
$d_{11,3}$	25	30	0,458	0,253	0,357	0,075	0,128	0,006	1,380	0,406	0,080	0,121
$d_{13,3}$	20	30	0,540	0,230	0,539	0,073	0,291	0,005	1,770	0,369	0,060	0,082
$d_{15,3}$	22	30	0,591	0,205	0,554	0,069	0,307	0,005	1,800	0,324	0,020	0,039
$d_{17,3}$	19	29	0,638	0,187	0,569	0,055	0,324	0,003	1,80	0,282	0,050	0,073
$d_{19,3}$	19	29	0,712	0,163	0,558	0,050	0,311	0,002	1,710	0,243	0,020	0,057
$d_{21,3}$	20	28	1,035	0,135	0,600	0,046	0,360	0,002	1,820	0,205	0,010	0,041
$d_{23,3}$	20	28	0,954	0,116	0,623	0,041	0,388	0,002	1,800	0,171	0,020	0,025
$d_{25,3}$	19	26	1,064	0,097	0,617	0,035	0,380	0,001	1,950	0,137	0,110	0,012
$d_{27,3}$	24	21	1,021	0,085	0,558	0,023	0,311	0,001	1,910	0,112	0,010	0,030
$d_{29,3}$	24	19	0,956	0,065	0,576	0,019	0,332	0,000	1,870	0,089	0,020	0,023
$d_{31,3}$	16	13	1,173	0,052	0,711	0,015	0,506	0,000	1,990	0,072	0,020	0,023
$d_{33,3}$	4	5	0,960	0,173	0,985	0,295	0,971	0,087	1,970	0,700	0,080	0,021

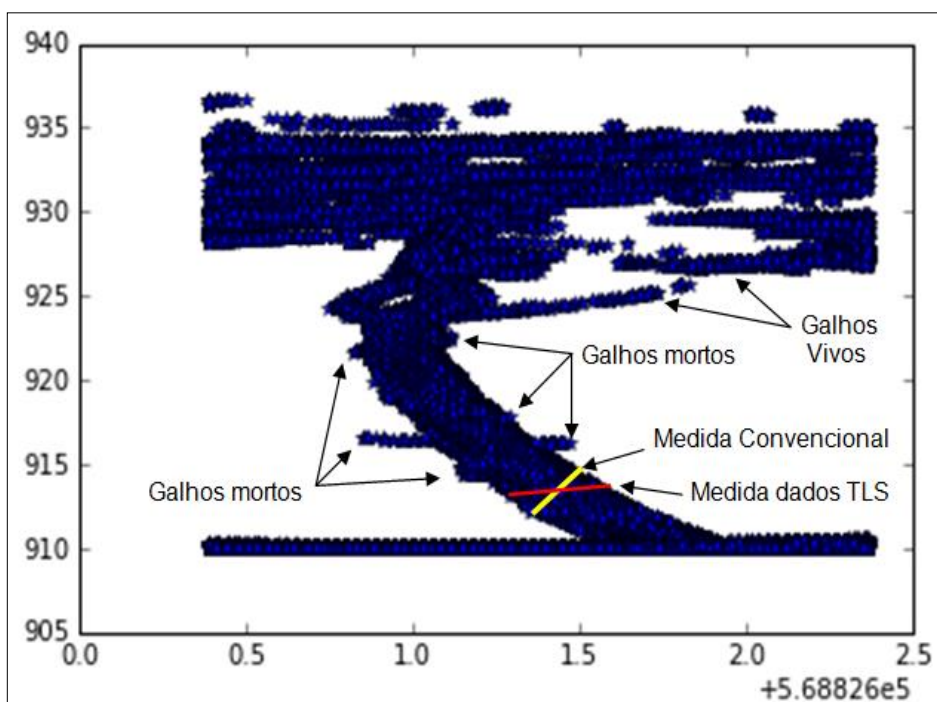
N = número de árvores amostradas; Conv = d_i extraído por métodos convencionais; TLS = d_i extraído utilizando dados TLS.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A análise dos resultados apresentados na Tabela 9, mostra que não foi possível extrair os diâmetros em todas as alturas estabelecidas. É uma consequência do efeito do sombreamento causado por outras árvores, e pelos galhos presentes tanto na copa como no fuste. Este fato embarca com maior intensidade os dados obtidos por meio de dados TLS. Assim como na média dos diâmetros, que também foi prejudicada pela presença de galhos e inclinação das árvores, principalmente a contar da altura de 5,3 metros, ou seja, há diâmetros que foram determinados apenas com pontos pertencentes ao tronco, e diâmetros que incluíram pontos pertencentes aos galhos. O desvio padrão e a variância, evidenciam bem este acontecimento ao compará-los com os dados obtidos por técnicas convencionais, ou ainda se observado os valores de

máximas. A Figura 51 ilustra os efeitos que acometem os dados, utilizando um conjunto de coordenadas de uma árvore, contraídos por um envelope.

Figura 51- Causas dos erros de superestimativas dos diâmetros.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Gatzliolis et al. (2010) relataram sobre a presença de obstáculos na mensuração de diâmetros nas partes mais altas das árvores, devido as suas copas, sugerindo a interpolação para as estimativas dos diâmetros nestas porções do fuste.

No estudo realizado por Lingnau et al. (2009) indicaram que nas porções do tronco, onde os resultados obtidos pelo *laser*, e aquelas determinadas por técnicas convencionais coincidem nos valores, não há presença de galhos. Porém, nas seções onde o *laser* superestimou o diâmetro, foi verificado a presença de galhos.

Como verificou-se valores para N inferiores a 30, foi aplicado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk (Tabela 10), no qual observou-se que apenas os conjuntos de dados pertinentes as observações $d_{1,3}$, $d_{3,3}$, $d_{19,3}$ e $d_{21,3}$, apresentam distribuição normal, ou seja, de acordo com teste realizado, quando o P-Valor for maior que o nível de probabilidade ($\alpha=0,05$) e/ou, quando o $W_{\text{calculado}}$ for maior que o $W_{\text{crítico}}$.

Para as observações que não apresentaram distribuição normal dos dados, foi aplicado a transformação Box-Cox.

Tabela 10- Teste de normalidade de Shapiro-Wilk.

d_i (m)	Teste de normalidade de Shapiro-Wilk					
	TLS			Conv.		
	$W_{\text{calculado}}$	$W_{\text{crítico}}$	P-Valor	$W_{\text{calculado}}$	$W_{\text{crítico}}$	P-Valor
d_{1,3}	0,9694	0,927	0,5242	0,9623	0,927	0,3536
d_{3,3}	0,9332	0,927	0,0598	0,9679	0,927	0,4842
d _{5,3}	0,7022	0,927	$1,68 \times 10^{-6}$	0,972	0,927	0,5956
d _{7,3}	0,3843	0,926	1×10^{-6}	0,979	0,927	0,7971
d _{9,3}	0,823	0,923	0,0004	0,9865	0,927	0,9599
d _{11,3}	0,7776	0,918	1×10^{-4}	0,9826	0,927	0,8902
d _{13,3}	0,7061	0,905	5×10^{-5}	0,9855	0,927	0,945
d _{15,3}	0,8561	0,911	0,0044	0,9822	0,927	0,8797
d _{17,3}	0,8502	0,901	0,0067	0,9731	0,926	0,7235
d_{19,3}	0,9007	0,901	0,0502	0,9666	0,926	0,4707
d_{21,3}	0,9296	0,905	0,1518	0,9508	0,924	0,2076
d _{23,3}	0,8832	0,905	0,0202	0,926	0,924	0,049
d _{25,3}	0,8873	0,901	0,0288	0,9163	0,920	0,0368
d_{27,3}	0,9409	0,916	0,1706	0,8866	0,908	0,0194
d_{29,3}	0,941	0,916	0,172	0,8973	0,901	0,0434
d _{31,3}	0,8738	0,887	0,0311	0,8876	0,866	0,0904
d_{33,3}	0,8213	0,748	0,1463	0,5933	0,762	0,0005

Os valores descritos em negritos apresentam distribuição normal.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A Tabela 11 aponta os resultados do teste de F, tendo como não significativo os diâmetros que obtiveram valores para $F_{\text{calculado}}$ menores que $F_{\text{crítico}}$, e/ou grandeza de P-Valor maior que o nível de probabilidade ($\alpha=0,05$). Desta forma temos que, os diâmetros extraídos a 1,3 e 3,3 metros de altura, utilizando técnicas convencionais e dados obtidos por meio de levantamento TLS, não possuem diferença estatística ao nível de significância de 5%.

Tabela 11- Teste de F ao nível de significância de 5%.

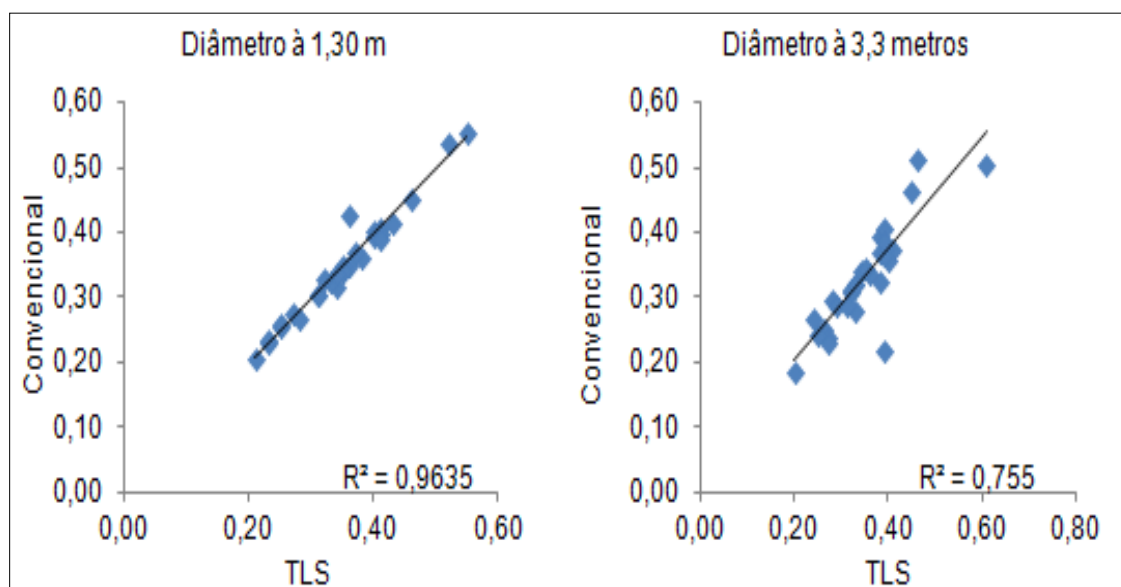
h(m)	Teste de F ao nível de significância $\alpha=0,05\%$		
	F _{calculado}	F _{crítico}	P-Valor
1,3	1,0261	1,8608	0,4726
3,3	1,0314	1,8608	0,4670
5,3	31,451	1,8608	$3,2 \times 10^{-15}$
7,3	52,495	1,8677	3×10^{-18}
9,3	29,139	1,883	1×10^{-14}
11,3	29,752	1,9005	1×10^{-14}
13,3	84,034	1,9581	2×10^{-20}
15,3	555,74	1,9322	3×10^{-32}
17,3	562,55	2,0543	4×10^{-27}
19,3	125,77	1,9868	5×10^{-22}
21,3	173,88	1,987	2×10^{-23}
23,3	4625,6	1,987	2×10^{-42}
25,3	6405	2,0353	3×10^{-41}
27,3	509820	2,0917	5×10^{-53}
29,3	727753	2,1587	2×10^{-49}
31,3	2263495	2,616851	$2,47 \times 10^{-36}$
33,3	11,159	6,5914	0,0206

Os valores descritos em negritos não apresentaram diferença estatística.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A distribuição gráfica dos resíduos e o coeficiente de determinação R^2 dos diâmetros referentes as alturas 1,3 e 3,3 metros foram ilustrados na Figura 52, na qual é possível verificar a quantidade de variação encontrada. Tendo os dados alusivos ao diâmetro à 1,30 metros (DAP), alcançado o melhor ajuste a linha de regressão, $R^2 = 0,9635$. Os dados relativos ao diâmetro à altura de 3,3 metros alcançaram o valor de $R^2 = 0,755$. Analisando os gráficos mostrados na Figura 52, torna-se evidente um número maior de *outliers*, nos dados correspondentes a altura de 3,3 metros. O que pode significar que a inclinação das árvores diminui próxima ao solo, e que também, a partir desta altura começam a surgir galhos, provavelmente pequenos tocos mortos.

Figura 52- Coeficiente de determinação e gráfico de resíduos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Para a obtenção do diâmetro à 1,30 metros por meio da varredura *laser*, Hopkinson et al. (2004) encontrou um coeficiente de correlação de 0,92 entre as estimativas convencionais e a estudada. Em estudo similar Thies e Spiecker (2004), encontraram erros de 1,3 % na mensuração do DAP.

Martins Neto et al. (2013), a partir de dados *laser*, realizaram o isolamento e a filtragem de duas árvores, das quais extraíram os diâmetros ao longo do fuste, correspondentes à 50% (árvore 1) e 35% (árvore 2) da altura total, pois a presença de galhos e copa impossibilitaram a extração em pontos mais altos. Os melhores resultados foram obtidos nas partes mais baixas da árvore.

Li et al. (2014) utilizando um método semiautomático para a obtenção de diâmetros, a partir de dados TLS, obteve erros para o diâmetro entre 0,52 e 0,95 cm, quando confrontados com o inventário de campo.

4.5 AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS PARA A EXTRAÇÃO DA ALTURA TOTAL

Os resultados referentes a estatística descritiva da variável dendrométrica altura total, alcançados pela diferença entre as cotas máximas e mínimas ($Z_{\max} - Z_{\min}$), das nuvens de pontos geradas a partir da varredura *laser* (método TLS), de sensores embarcados em um VANT (método VANT), de sensores embarcados em um VANT

com interpolação IDW dos pontos pertencentes ao solo (método VANT-idw), e também por meio de técnicas convencionais (método Conv), estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12- Estatística descritiva para os método de extração da altura total.

Método	Estatística descritiva					
	N	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Variância (m ²)	Máximo (m)	Mínimo (m)
Conv	30	30,0	4,38	19,182	36	16,5
TLS	30	32,09	1,496	2,239	34,84	28,45
VANT-idw	30	33,39	2,383	5,681	37,09	28,59
TLS + VANT	30	31,783	1,399	1,957	34,23	27,36

Conv = Altura total obtida por meio de métodos convencionais; TLS = Altura obtida a partir da varredura *laser* terrestre; VANT-idw = Altura obtida a partir de sensores embarcados em um VANT com emprego do método de interpolação IDW dos pontos pertencentes ao solo. TLS + VANT = Altura total obtida a partir das nuvens de pontos TLS e VANT.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Buck et al. (2016) observou em seu estudo que a altura total, obtida por meio de dados TLS e método automático para a detecção, foi subestimada.

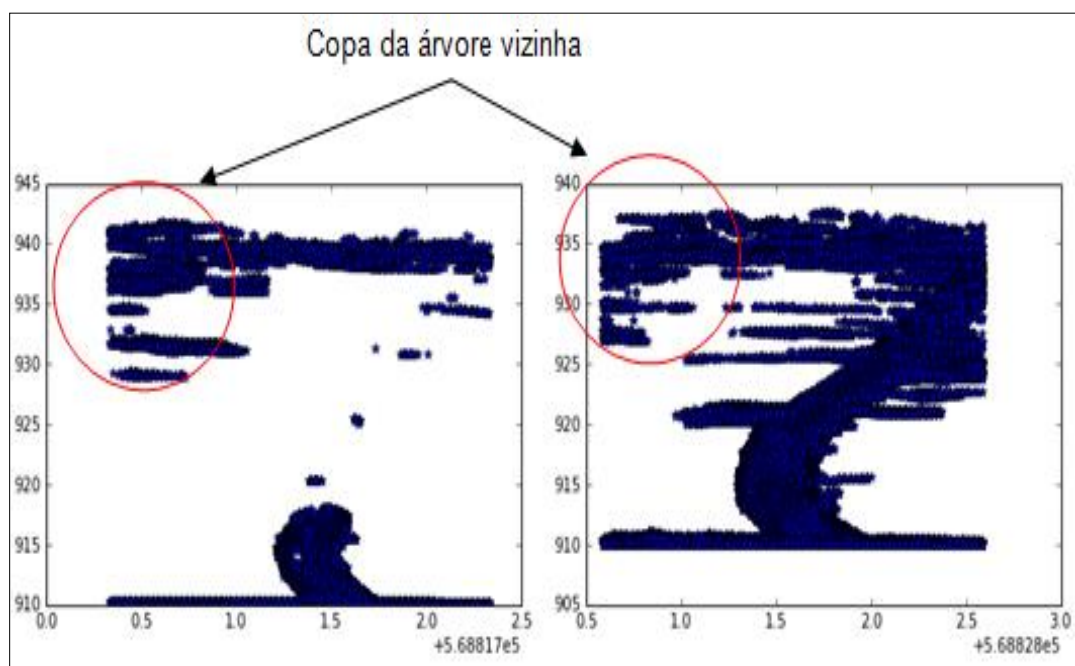
A ausência de pontos no ápice da árvore, ocasionado pela alta densidade da copa e ao posicionamento do equipamento TLS, resultam em subestimação da altura total (LINGNAU et al., 2009; SILVA et al., 2011; MATINS NETTO et al., 2013).

Os valores das médias obtidas pela estatística descritiva, apresentam resultados opostos aos encontrados pelos autores acima, tendo para este estudo a técnica convencional obtida uma média menor que a adquirida por TLS, o que pode ser explicado pela densidade relativamente baixa de árvores, pelas clareiras existentes, e pelo número de estações utilizadas para a varredura *laser*.

Como os demais métodos usam dados do dossel do bosque, médias da altura total maiores já eram esperadas.

A grande diferença da grandeza da variância entre os métodos testados e o parâmetro (método convencional), revela que as metodologias aplicadas foram incapazes de detectar alturas menores. Este fato também é devido a inclinação das árvores, que podem gerar a mistura de pontos pertencentes a outras copas quando selecionadas pelo envelope (Figura 53), assim como a ausência de informações sobre as copas abaixo do dossel (árvores dominadas e suprimidas), quando empregadas as técnicas utilizando VANT.

Figura 53- Exemplo de envelopes contendo pontos de árvores vizinhas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Mesmo selecionando-se 30 árvores para realizar as análises estatísticas, foi necessário testar a normalidade dos dados, devido aos valores observados da variância. A Tabela 13 mostra os resultados para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, tendo distribuição normal dos dados apenas os métodos que utilizam a dados TLS.

Tabela 13 - Teste de normalidade de Shapiro-Wilk para os métodos de extração da altura total.

Método	Teste de normalidade de Shapiro-Wilk		
	$W_{\text{calculado}}$	$W_{\text{crítico}}$	P-Valor
Conv	0,90	0,927	0,01
TLS	0,980	0,927	0,83402
VANT-idw	0,089	0,927	0,00
TLS + VANT	0,939	0,927	0,08606

Conv = Altura total obtida por meio de métodos convencionais; TLS = Altura obtida a partir da varredura *laser* terrestre; VANT-idw = Altura obtida a partir de sensores embarcados em um VANT com emprego do método de interpolação IDW dos pontos pertencentes ao solo. TLS + VANT = Altura total obtida a partir das nuvens de pontos TLS e VANT.

Os métodos e valores descritos em negrito apresentaram distribuição normal dos dados.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Foi necessária a transformação do conjunto de dados, pois o teste de F é sensível a normalidade, para tal utilizou-se a transformação de Box-Cox.

A comparação múltipla dos dados não foi possível devido a não homogeneidade das variâncias, verificada após a realização do teste de Cochran.

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos empregando o teste de F, tendo apenas as alturas nas quais foram empregados os métodos utilizando dados TLS e a integração de dados TLS e de sensores embarcados em um VANT como não significativo, ou seja, são estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%. As comparações dos métodos testados, com o parâmetro (método convencional), foram significativas, portanto não são iguais estatisticamente ao nível de significância de 5%.

Tabela 14- Teste de F ao nível de significância de 5% aplicado às metodologias para a extração da altura total.

Comparações	Teste de F ao nível de significância de 5%		
	F _{calculado}	F _{crítico}	P-Valor
Conv X TLS	5,644	1,861	6,1 X 10 ⁻⁶
Conv X TLS + VANT	6,919	1,861	6,7 X 10 ⁻⁷
Conv X VANT-idw	2,095	1,861	0,025
TLS x TLS + VANT	1,226	1,861	0,293
TLS x VANT-idw	2,693	1,861	0,005
TLS + VANT x VANT-idw	3,302	1,861	0,001

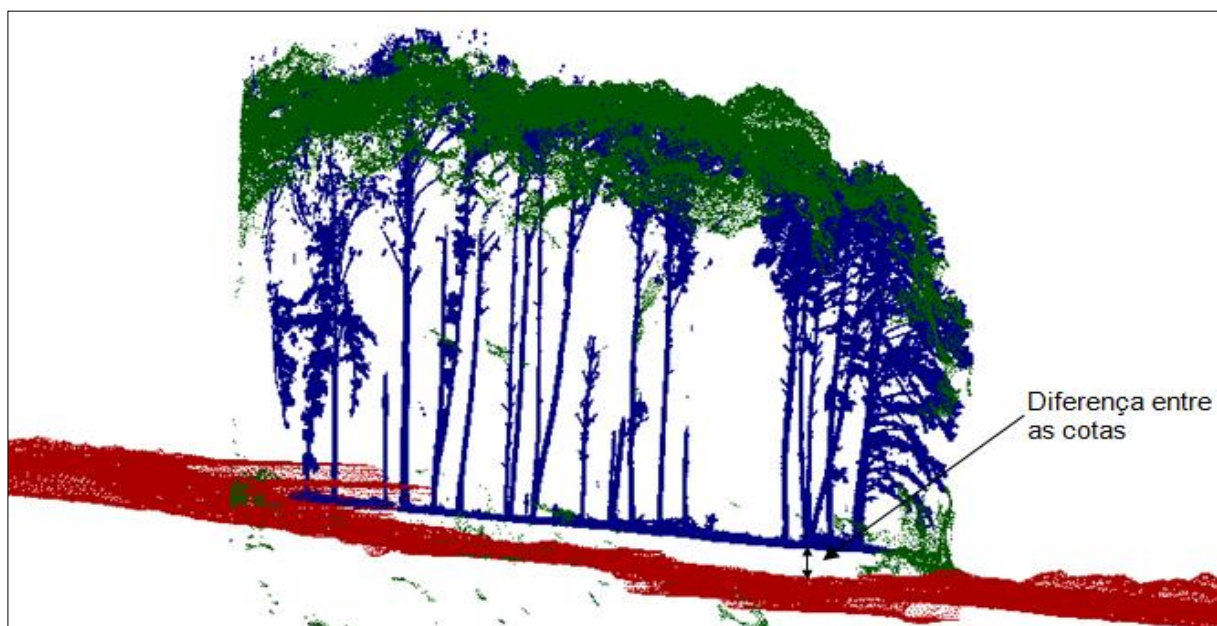
Os métodos e valores descritos em negrito não foram significativos.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Os resultados utilizando a interpolação IDW e dados TLS, foram significativos, devido ao método de interpolação ter criado cotas menores do que as observadas na nuvem de pontos TLS. Enquanto que os pontos pertencentes as copas, das nuvens de pontos TLS e VANT apresentam maior coerência.

A Figura 54 ilustra a integração das nuvens de pontos. Onde a nuvem vermelha representa os pontos do terreno gerados a partir da interpolação IDW dos dados VANT, a cor azul representa um recorte nuvem de pontos TLS, e a nuvem verde os pontos das copas obtidas com VANT. A partir desta imagem é possível observar a diferença entre as cotas do terreno geradas pelas nuvens.

Figura 54- Integração das nuvens de pontos obtidas com VANT e TLS.

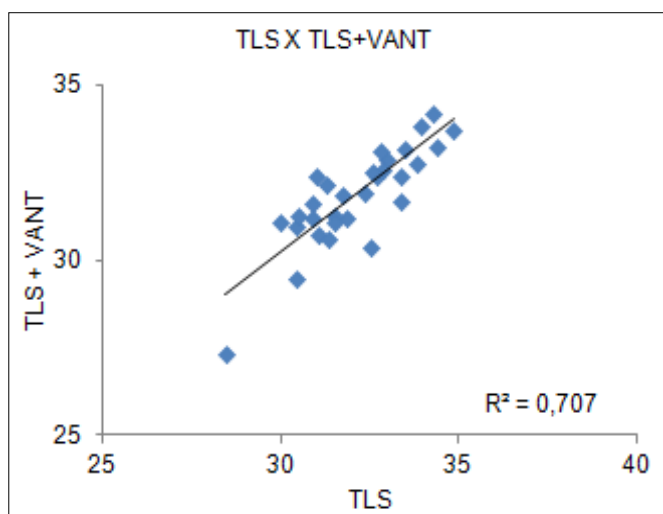


Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

O resultado de $R^2 = 0,707$ (Figura 55) encontrado para os métodos TLS e TLS+VANT, mostra um ajuste razoável dos dados a linha de regressão. No entanto, estes resultados são esperados quando comparado com métodos convencionais.

Buck et al. (2016) utilizando o método automático para a determinação da altura total a partir de dados TLS, encontrou o valor de $R^2 = 0,67$. O levantamento empregando técnicas convencionais foi tomada como verdade de campo.

Figura 55- Coeficiente de determinação e gráfico de resíduos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

5 CONCLUSÕES

O emprego do aplicativo Python para criar algoritmos que permitam extrair as variáveis dendrométricas, a partir de nuvem de pontos TLS e VANT, mostrou-se muito versátil, apresentando uma linguagem de programação eficiente e de fácil aprendizado. O mesmo foi observado com o programa CloudCompare em relação a oferta de ferramentas para edições, visualizações e filtragens das nuvens de pontos.

A detecção do número de árvores com suas respectivas coordenadas utilizando dados TLS apresentou alta acurácia. O algoritmo detectou 98,98 % das árvores não cometendo erros de comissão. Esse resultado deve-se principalmente a escolha das dimensões da janela de busca e ao avanço desta sobre a nuvem de pontos.

As configurações utilizadas para detectar as árvores a partir da ortoimagem, empregando o aplicativo DetecTree, não são indicadas para o uso em situações semelhantes. Os erros de comissão e omissão obtiveram valores muito elevados.

O algoritmo criado para a extração dos diâmetros, permite que estas variáveis sejam determinadas em qualquer altura. Porém, devido à ausência de filtros que eliminem galhos, e de equações que ofereçam melhores resultados quando detectada algum grau de inclinação do tronco, o algoritmo não foi eficiente ao obter resultados em alturas superiores a 3,3 metros. Contudo, os valores de $R^2=0,9635$ para o DAP, e $R^2=0,755$ para o diâmetro à 3,3 metros, apresentando igualdade estatística ao nível de significância de 5%, demonstra a possibilidade em se extrair do fuste, informações de alta qualidade a partir de dados TLS.

Os métodos utilizados para extrair a altura total, não apresentaram igualdade estatística ao nível de significância de 5%, com o parâmetro considerado. Mesmo utilizando dados obtidos com sensores embarcados em um VANT, a inclinação das árvores causou a inclusão de pontos de copas, que não pertencem a árvore selecionada. Ainda que, capaz de identificar o valor de Z_{maior} e Z_{menor} , o algoritmo não fez distinções entre as copas. Sendo que, os métodos aplicados para determinar a altura total das árvores, não são indicados para florestas com as mesmas características à estudada.

As representações gráficas das nuvens de pontos em 2D e 3D, forneceram informações visuais importantes, para a análise dos dados obtidos por cada tecnologia aplicada, de maneira individual e integrada. A partir destas exibições foi possível verificar, que após o pré e pós-processamento dos dados, as nuvens de pontos geradas apresentaram-se coesas.

6 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se adicionar à rotina computacional criada no Python, um filtro que permita eliminar os pontos pertencentes à galhos inseridos ao longo do fuste e também equações para extrair os diâmetros que minimizem o erro causado pela inclinação das árvores.

Para realizar uma comparação mais criteriosa dos dados, o recomendado é empregar métodos convencionais destrutivos. Pois variáveis como a altura total, são difíceis de serem tomados em florestas com idades mais avançadas, assim como os diâmetros em diferentes alturas.

Também recomenda-se testar outras metodologias para a avaliação da detecção automática das árvores a partir da ortoimagem, pois a empregada apresentou-se muito rigorosa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS, A. Análise de Variância. In: ANJOS, A. **Planejamento de Experimentos I: Notas de Aula**. Curitiba - Pr: UFPR, 2005. p. 109-118.

ARAÚJO, M. A.; CHAVIER, F.; DOMINGOS, J. L.; Avaliação do potencial de produtos derivados de aeronaves não tripuladas na atividade florestal. **Ambiência**. v. 2 p. 69-82, 2006.

ASCHOFF, T.; SPIECKER, H. Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36 – 8/w2. Freiburg, 2004.

BIENERT, A. et al. Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 36. 2006.

BOANOVA FILHO, J. Aeronaves não tripuláveis no Brasil e sua regulação. **Revista Brasileira de Direito Aeroespacial e Espacial**, [s.i.], p.49-51, 2014.

BRAZ, A. M. et al. Análise da aplicação de VANT na atualização de cadastro florestal com uso de pontos de controle. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 2015, João Pessoa-PB. **Anais...** João Pessoa: INPE, 2015.

BROLLY, G.; KIRALY, G. Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning. **Acta Silvatica et Lignaria Hungarica**, v. 5, p. 119-130, 2010.

BUCK, A. L. B. **Análise de métodos de filtragem em dados *LASER scanner* terrestre aplicados à modelagem tridimensional do tronco de *Pinus spp.*** 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Departamento de Ciências Florestais, UFPR, Curitiba, 2012.

BUCK, A. L. B. et al. Avaliação da modelagem tridimensional do tronco de *Pinus elliottii* a partir de dados *LASER* terrestre. **Ambiência**. v. 8, p. 549-557, 2012.

BUCK, A. L. B. et al. Um algoritmo para filtragem do tronco em nuvem de pontos *LASER* terrestre de árvores de *Pinus spp.* **Boletim de Ciências Geodésicas** (Online), v. 20, p. 806-829, 2014.

BUCK, A. L. B. **Modelagem de dados *LASER scanner* terrestre para estimativa do volume em plantios clonais de *Eucalyptus spp.*** 2016. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

CARROLL, J. M. **Fundamentos y Aplicaciones del *LASER***. Barcelona, Marcombo Boixareu Editores, 1978.

CHAVES, A. A. et al. Uso de VANTs e processamento digital de imagens para a quantificação de áreas de solo e de vegetação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2015, João Pessoa-PB, **Anais...** João Pessoa: INPE, 2015.

CLOUDCOMPARE. **3D point cloud and mesh processing software**. Disponível em: <<http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Introduction>> Acessado em 10 de janeiro de 2017.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS J. Photogramm.** Remote Sens. 2014.

DASSOT, M.; CONSTANT, T.; FOURNIER, M. The use of terrestrial LIDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. In: **Annals of Forest Science**. 2011.

DETECTREE v.1 tools for tree detection. Freiburg, Germany, 2017, 3p.

ELKAIM, G. H. et al. **Principles of guidance, navigation, and control of UAVs**. Santa Cruz, Ca, Usa: K.p. Valavanis, G.I. Vachtsevanos (eds.), Handbook Of Unmanned Aerial Vehicles, 2015. 31 p.

FAVARIN, J. S. et al. Obtenção de fotografias aéreas de um povoamento de Pinus taeda L. com o VANT Microdrone MD4-1000. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...**Foz do Iguaçu: INPE, 2013.

FINGER, C.A.G. **Fundamentos da biometria florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 269 p. 1992.

FREITAS, A. G.; WICHERT, M. C. P. **Comparação entre instrumentos tradicionais de medição de diâmetro e altura com o criterion 400**. Piracicaba, Sp: Stadium Gebarate, 1998. 5 p. Circular Técnica nº 188.

GALVÃO, G. M; ROSALEN, D. L. Acurácia da mosaicagem gerada por veículo aéreo não tripulado utilizado na agricultura de precisão. In: FURLANI, C.E.A; SILVA, R.P; ROSALEN, D.L. (Org.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 42, 2013, Fortaleza. **Os desafios para o desenvolvimento sustentável**. 1ed. Jaboticabal: SBEA, 2013, v., p. 3-.

GATZIOLIS, D. et al. Evaluation of terrestrial LIDAR technology for the development of local tree volume equations. In: SILVILASER 10^o, 2010. Freiburg. **Proceedings...** Freiburg, 2010.

GENECHTEN, B. 2008. **Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning**: Training material based on practical applications. Recuperado em janeiro de 2017, de <https://lirias.kuleuven.be/handle/123456789/201130>

GONÇALES, R. **Dispositivo de varredura LASER 3D terrestre e suas aplicações na Engenharia, com ênfase em túneis**. 2007. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GROETELAARS, N. J.; AMORIM, A. L. Tecnologia 3D Laser Scanning: características, processos e ferramentas para manipulação de nuvens de pontos. In: SIGRADI, 15. 2011, Santa Fé. **Congresso**. [s.i.]: Sigradi, 2011. p. 1 - 5.

GURTNER, A. et al. Investigation of fish-eye lenses for small_UAV aerial photography. In: **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 3, 2009.

HOPKINSON, C. et al. Assessing forest metrics with a ground-based scanning LIDAR. **Canadian Journal of Forest Research**, 34, p. 573-583, 2004.

ICAO, 2011. Unmanned Aircraft Systems (UAS), ICAO Circular 328-AN/190 Quebec, Canada.

JORGE, L.A.C.; INAMASU, R.Y.; CARMO, R.B.; Desenvolvimento de um VANT totalmente configurado para aplicações em Agricultura de Precisão no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, Curitiba, PR, **Anais...** Curitiba: INPE, 2011.

KASPAR, M. et al. **Laser Scanning in civil engineering and land surveying**. 2004.

LEONARDO DA VINCI, EDUCATION AND CULTURE. Theory and practice on Terrestrial LASER Scanning. **3D RiskMapping**, 2008. Disponível em: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/201130/2/leonardo_tutorial_final_vers5_english.pdf>. Acesso em 30 ago. 2015.

LIANG, X. et al. Plot-level trunk detection and reconstruction using one scan mode terrestrial LASER scanning data. 2008 **International workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications**, IEEE, China, Beijing, 30 June–2 Jul, 2008.

LIANG, X. et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, p. 63-77, 2016.

LIANG, X.; HYYPPÄ, J. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels. **Sensors**, v. 13, n. 2, p. 1614–1634, 2013.

LINGNAU, C. et al. Obtenção de parâmetros florestais através de *LASER* terrestre – Novas perspectivas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007.

LINGNAU, C. et al. Modelagem do fuste em povoamentos de *Pinus taeda* a partir da varredura *LASER* terrestre. In: IX SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 2010, Curitiba. **Anais...**2010. v. 1. p. 111-118.

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

LITKEY, P. et al. Single-scan TLS methods for Forest parameter retrieval. In: **Silvilaser 2008**, Edinburg UK. p. 295 – 304, 2008.

LONGHITANO, G. A, **VANTS para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. 2010. 148 f. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MAAS, H. G. et al. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial *LASER scanner* data. **International Journal of remote sensing**, v. 29, n. 5, p. 1579–1593, 2008.

MARTELLO, M. et al. Utilização de imagens aéreas obtidas por RPA no monitoramento inicial de *Eucalyptus sp.* In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17, 2015, João Pessoa-PB. **Anais...** João Pessoa: INPE, 2015.

MARTINS NETO, R. P. et al. Modelagem da seção transversal de *Pinus taeda* L. por meio da varredura LASER terrestre. In: **X SenGeF –Anais...** p. 776-783, 2012.

MARTINS NETO, R. P. et al. Avaliação da varredura LASER terrestre em diferentes distâncias da árvore para mensurar variáveis dendrométricas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n° 3, p. 420 – 433, jul – set, 2013.

MARTINS NETO, R. P. **Extração de variáveis dendrométricas em árvores de *Pinus Taeda* L. a partir de dados TLS e ALS.** 2016. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages - SC, 2016.

MEDEIROS, F.A. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão**, 2007. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2007.

MITISHITA, E. et al. O Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) em Aplicação de Mapeamento Aerofotogramétrico. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 2014, Gramado-RS. **Anais...** Gramado, 2014.

NASCIMENTO JÚNIOR, J. O.; SCHULER, C. A. B.; CAVALCANTE, R. B. S. Sistema *LASER scanner*. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 2006, Aracajú – SE. **Anais...** Aracajú, 2006.

NI WENJIAN et al. Evaluation of UAV-Basead forest inventory system compared with *LIDAR* data. **2015 International symposium of Geoscience and Remote Sensing Society**, IEEE, China, Beijing, 2015.

NUNES, M. G. et al. Avaliação Preliminar de dados obtidos por VANT em talhão florestal clonal de *Eucalyptus urograndis* H13 no estado de Mato Grosso. In: **Anais**

do IX Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal, 2010, Curitiba. PONTES, G. R.; FREITAS T. U. Monitoramento de plantios de eucalipto utilizando técnicas de sensoriamento remoto aplicadas em imagens obtidas por VANT. In: 17 SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2015, João Pessoa - PB. **Anais...** João Pessoa, 2015.

PRZYBILLA, H. J., WESTER-EBBINGHAUS, W. Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. Bildmessung und Luftbildwesen. **Zeitschrift fuer Photogrammetrie und Fernerkundung**. Herbert Wichman Verlag. Karlsruhe. 1979.

SCENE. **FARO's 3D Documentation Software for Laser Scanner**. Em: <<http://www.faro.com/en-us/products/faro-software/scene/overview>> Acesso em: 10 de janeiro de 2017.

SENSEFLY. **Tabelas de especificações do VANT eBee**. Disponível em: <<https://www.sensefly.com/home.html>> Acesso em 15 de outubro de 2016.

SILVA, M. N. **Aplicação de LASER scanner terrestre para determinação de variáveis dendrométricas em Pinus spp.** 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Departamento de Ciências Florestais, UFPR, Curitiba, 2011.

SILVA, M.N. et al. *LASER Scanner Terrestre para medições florestais - Princípios e 79 Aplicações*. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia (Online)**, v. 65, p. 1143-1152, 2013.

SIMONSE, M. et al. 2003: Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial LASER scanning. **Proceedings of the ScandLASER Scientific Workshop on Airborne LASER Scanning of Forests**, Umeå/Sweden. p. 251- 257, 2013.

THIES, M.; SPIECKER, H. Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. xxxvi – 8/w2. Freiburg, 2004.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

WALLACE, L. et al. Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SFM) points clouds. **Forest**. v. 7, p. 2-16, 2016.

WATT, P. J.; DONOGHUE, D. N. M.; DUNFORD, R. W. Forest parameter extraction using terrestrial LASER scanning. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, p. 1437 – 1446, 2003.

WREGE, M.S. et al. eds. **Atlas climático da Região Sul do Brasil**: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Pelotas, Embrapa Clima Temperado; Colombo, Embrapa Florestas, 2011. v.1, 332p.

WUTKE, J. D. **Métodos para avaliação de um sistema *LASER scanner* terrestre**. 2006. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

ZARCO-TEJADA, P. J. et al. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. **European Journal Of Agronomy**, p. 88-99, 2014.

ZASADA, M. et al. Horizon visibility and accuracy of stocking determination on circular sample plots using automated remote measurement techniques. **Forest Ecology and Management**, v. 302, p. 171-177, 2013.

ZHIQIANG, et al. **Detail-preservation 3-D modelling for elaborate Buddha sculpture** , Proceedings of the 22nd CIPA Symposium, Kyoto, Japan. 2009.