

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIELI SABRINA RUZA

SISTEMAS DE IMPLANTAÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NA EXTRAÇÃO DE
MÉTRICAS FLORESTAIS COM TLS (*TERRESTRIAL
LASER SCANNING*)

CURITIBA

2019

MARIELI SABRINA RUZA

SISTEMAS DE IMPLANTAÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NA EXTRAÇÃO DE
MÉTRICAS FLORESTAIS COM TLS (*TERRESTRIAL
LASER SCANNING*)

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Dalla Corte

Coorientador: Prof. Dr. Alessandro Camargo Ângelo; Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta; Prof. Dr. Vagner Alex Pesck

CURITIBA

2019

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Ruza, Marieli Sabrina

Sistemas de implantação e sua influência na extração de métricas florestais com TLS (Terrestrial Laser Scanning) / Marieli Sabrina Ruza. – Curitiba, 2019.

83 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Dalla Corte

Coorientadores: Prof. Dr. Alessandro Camargo Ângelo

Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta; Vagner Alex Pesck

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Defesa: Curitiba, 27/02/2019. Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Levantamentos florestais. 2. Florestas - Medição. 3. Sensoriamento remoto. 4. Sistemas de varredura. 5. Lasers. 6. Dendrometria. 7. Teses. I. Dalla Corte, Ana Paula. II. Ângelo, Alessandro Camargo. III. Sanquetta, Carlos Roberto. IV. Pesck, Vagner Alex. V. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. VI. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.524.6

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **MARIELI SABRINA RUZA** intitulada: **SISTEMAS DE IMPLANTAÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NA EXTRAÇÃO DE MÉTRICAS FLORESTAIS COM TLS (TERRESTRIAL LASER SCANNING)**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Fevereiro de 2019.

ANA PAULA DALLA CORTE

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

ANDRE LEONARDO BORTOLOTTO BUCK

Avaliador Externo (SFGE)

ALEXANDRE BEHLING

Avaliador Interno (UFPR)



AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Ana Paula Dalla Corte, por confiar em meu trabalho e me desafiar a aprender coisas novas. Obrigada por todas as oportunidades e por me acompanhar profissionalmente por todos esses anos.

Ao meu coorientador Carlos Roberto Sanquetta, por seu meu primeiro orientador na graduação e por todos os aprendizados nesse tempo. Agradeço em especial por todas as sugestões e melhorias propostas nesse trabalho.

Ao meu coorientador Vagner Alex Pesck, por aceitar o convite de coorientação e por todas as contribuições para a realização dessa pesquisa.

Ao meu coorientador Alessandro Camargo Ângelo, por todas as conversas, viagens, trabalhos de campo e aprendizados durante a minha passagem no grupo PET. Obrigada por ter sido um professor que fez a diferença na minha formação!

Ao projeto NITA e a todos os seus integrantes, na pessoa do prof. Anibal de Moraes, pela iniciativa de implementação de um trabalho tão importante para a pesquisa brasileira, pela disponibilização de dados, e por toda cooperação desde o início desse estudo.

Ao Miguel Angelo Menegusto, a Evandra Banchik e a empresa Leica *Geosystems*, pela disponibilização do equipamento para coleta de dados, por todo o apoio prestado e por acreditar nessa pesquisa.

Ao professor Alexandre Behling, por toda a paciência em me ensinar desde o início da minha graduação, por sempre me mostrar o lado bom das coisas, e por ser um exemplo de humildade. Também agradeço por todos os momentos compartilhados com um bom chá.

Ao Vinicius, Mateus, Luani, Matheus, Naiany, Bruna, Tieme e André, por todo auxílio na coleta de dados. Com vocês ficou tudo mais fácil e divertido.

À minha amiga Bruna, seu apoio foi fundamental durante esses dois anos!! Agradeço-lhe por todas as conversas, por todos os trabalhos de campo, pizzas, pipocas, e por ser a melhor vizinha que eu poderia ter.

Às amigas que comigo dividiram um lar, Vitória, Maria Elise e Jaqueline, quantas diferenças e risadas para um espaço tão pequeno. Ressalto o agradecimento a Jaque, por toda ajuda principalmente na fase final desse trabalho, por todas as madrugadas de estudo e pelos incontáveis mates compartilhados.

Aos amigos Ana Martins, Luani, Maria Emília, Naiany, Tieme, Vinícius e ao professor Pedrosa por de alguma forma sempre alegrarem o meu dia no BIOFIX.

À minha família, por todo amor, confiança e por fazerem parte da minha vida.

“Do ponto de vista evolutivo, faz sentido que apenas os membros mais fortes da comunidade sobrevivam. Mas o bem-estar do grupo depende da comunidade, e, quando os membros supostamente fracos desaparecem, os outros também saem perdendo.”

Peter Wohlleben

RESUMO

Os sistemas integrados de produção agropecuária estão se expandindo no Brasil, incentivados por políticas públicas, portanto é necessário o desenvolvimento de técnicas de mensuração que permitam gerar estimativas com acurácia para essas áreas. O objetivo do estudo foi avaliar a influência do sistema de implantação, convencional e iLF (integração lavoura-floresta), na extração das métricas de *Eucalyptus benthamii* obtidas com *laser scanner* terrestre (TLS) e inventário tradicional, testando a hipótese de que os métodos de extração não apresentam diferenças significativas. A área de estudo é composta por um sistema convencional de plantio sob espaçamento de 3 x 2 m, em que 61 árvores foram avaliadas, e por um sistema iLF, sob espaçamento de 14 x 2 m, em que 69 árvores foram mensuradas. Foi realizado um inventário tradicional, para obtenção das variáveis dap (diâmetro à 1,3 m de altura) e altura total (h), juntamente com a coleta de dados com o TLS, posicionado em 5 locais na área de estudo. Ademais, foi realizada a cubagem parcial de 34 árvores do sistema convencional e 16 árvores do sistema iLF com o equipamento Criterion. No processamento da nuvem de pontos obtida pelo TLS foi realizada a extração manual das métricas dap, h e diâmetros a diferentes alturas por varredura simples. Em que, primeiramente foi individualizado o objeto de interesse, com posterior elevação do plano de corte à altura de 1,30, 2, 4 e 6 m para extração das métricas de diâmetros, finalizando com a obtenção da h por meio da medição da distância entre o ponto mais alto e mais baixo de cada árvore. O volume total (v) foi estimado por uma equação ajustada que condiz com as características da área de estudo. Para a estimativa da variável biomassa seca acima do solo (BS) foram ajustados modelos com base em dados de BS de 22 árvores disponibilizados pelo projeto NITA e de dados de BS de 24 árvores fornecidos pelo BIOFIX. As métricas dap, h, v e BS não apresentaram diferenças estatísticas entre os métodos de obtenção (inventário tradicional e TLS) para os dois sistemas de implantação. No sistema iLF a melhor visualização das árvores, proporcionada pelo maior espaçamento, facilitou a extração das métricas obtendo menor variação entre os dados. Os diâmetros à diferentes alturas obtidos na cubagem parcial dos indivíduos apresentaram diferença estatística entre os métodos de obtenção, que podem ser justificadas pela dificuldade na medição com o Criterion, devido à complexidade de visualização da base da árvore, pois o componente lavoura do sistema iLF já estava em fase de crescimento, ou também pelo fato de que essas medidas foram obtidas um tempo depois dos dados obtidos com o TLS. As métricas individuais de dap, v e BS no sistema iLF foram maiores quando comparados ao sistema convencional, porém ao incluir o número de árvores por hectare o sistema convencional se mantém mais produtivo. A hipótese levantada inicialmente no trabalho foi confirmada. Portanto, os métodos de extração de métricas florestais do inventário tradicional e do TLS não apresentam diferenças significativas.

Palavras-chave: Sistema iLF. Sistema Convencional. Mensuração Florestal.

ABSTRACT

Integrated Crop-Livestock Systems are expanding in Brazil, stimulated by public policies. Thereby, it has been necessary to develop measurement techniques that allow accurate estimates for these areas. The aim of this study was to evaluate the influence of two different integration systems, conventional and iLF (crop-forest integration), in the metrics extraction of *Eucalyptus benthamii* obtained with terrestrial laser scanning (TLS) and traditional forest inventory, testing the hypothesis that significant differences exist. The study area consists of a conventional system under 3 x 2 m plant spacing, where 61 trees were evaluated, and a crop-forest system under 14 x 2 m plant spacing, where 69 trees were measured. From a traditional forest inventory, the variables diameter at breast-height (dap) and total height (h) were obtained, along with the collection data with TLS, positioned in five locations in the study area. In addition, the diameters at different heights of 34 trees under conventional system and 16 trees under crop-forest system were estimated with Criterion equipment. In the point cloud processing obtained with TLS, the manual extraction of the metrics dap, h and diameters at different heights were performed by simple sweep, in which the target of interest was first individualized, with subsequent elevation of the cut plane to the height of 1.3, 2, 4 and 6 meters, for the metric diameters extractions, finishing with the obtaining of h by measuring the distance between the highest and lowest point of each tree. The total volume (v) was estimated by an equation that fits to the characteristics of the study area. To estimate the above-ground dry biomass (BS) variable, models were adjusted based on BS data for 22 trees, provided by NITA project, and BS data for 24 trees, provided by BIOFIX laboratory. There were no statistical differences for the metrics dap, h, v and BS obtained by the traditional inventory and the TLS, for the two implantation systems evaluated. In the iLF system the better visualization of the trees, provided by the greater spacing, facilitated the extraction of the metrics obtaining smaller variation between the data. The diameters at different heights obtained with Criterion equipment presented statistical differences, which can be explained by the difficulty in measuring with Criterion due to the complexity of visualization of the tree base, once the iLF system was in the crop-growth phase, or also because the Criterion measurements were obtained a few days later the data obtained with TLS. The individual metrics of dap, h, v and BS in the iLF system were higher when compared to the conventional system, but by including the number of trees per hectare the conventional system remains more productive. The research hypothesis raised initially in this study was confirmed. Therefore, the extraction methods of forest metrics from the traditional forest inventory and the TLS would not present significant differences.

Keywords: Conventional system. iLF system. Forest measurement.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DEMONSTRAÇÃO DOS SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO COM FLORESTA, LAVOURA E PECUÁRIA.....	19
FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO DOS SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA FLORESTA IMPLANTADOS NO BRASIL ATÉ O ANO DE 2015.....	21
FIGURA 3 – COMPONENTES DE UM SISTEMA ALS (<i>AIRBORNE LASER SCANNING</i>) E DEMOSNTRAÇÃO DE SEU FUNCIONAMENTO NA OBTENÇÃO DOS RETORNOS.....	28
FIGURA 4 – CAMPO DE VISADA DOS FEIXES ÓPTICOS NO SENTIDO HORIZONTAL E VERTICAL DE UM TLS COM ABERTURA ANGULAR VERTICAL DE 290°	30
FIGURA 5 – DEMONSTRAÇÃO DE UM LEVANTAMENTO COM VARREDURA SIMPLES E MÚLTIPLA COM UM TLS (<i>TERRESTRIAL LASER SCANNING</i>)	32
FIGURA 6 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA FAZENDA CANGUIRI, PERTENCENTE A UFPR, NO MUNICÍPIO DE PINHAIS – PR.....	36
FIGURA 7 – MEDIÇÕES DURANTE O INVENTÁRIO TRADICIONAL REALIZADO NO SISTEMA CONVENCIONAL E NO SISTEMA iLF PARA <i>EUCALYPTUS BENTHAMII</i> LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI – PINHAIS.....	38
FIGURA 8 – <i>LASER SCANNER</i> LEICA SCANSTATION P40 E SEU POSICIONAMENTO EM CAMPO PARA A COLETA DE DADOS.....	40
FIGURA 9 – DEMONSTRAÇÃO DAS ETAPAS DO PROCESSAMENTO PARA EXTRAÇÃO DAS MÉTRICAS DE DIAMETROS E h OBTIDOS POR TLS PARA <i>EUCALYPTUS BENTHAMII</i> LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI – PINHAIS.....	41
FIGURA 10 – PRIMEIRA HIPOTÉSE EMPREGADA NO <i>PROFILE ANALYSIS</i> , AVALIANDO O PARALELISMO ENTRE OS PONTOS DE OBSERVAÇÕES.....	47
FIGURA 11 – SEGUNDA HIPOTÉSE EMPREGADA NO <i>PROFILE ANALYSIS</i> , AVALIANDO A COINCIDÊNCIA ENTRE OS PONTOS DE OBSERVAÇÕES.....	48

FIGURA 12 – TERCEIRA HIPÓTESE EMPREGADA NO <i>PROFILE ANALYSIS</i> , AVALIANDO SE OS PERFIS SÃO PARALELOS AO EIXO DAS ABSCISSAS AO LONGO DOS PONTOS DE OBSERVAÇÕES.....	48
FIGURA 13 – RELAÇÃO ENTRE A BIOMASSA SECA ACIMA DO SOLO E AS VARIÁVEIS <i>dap</i> E <i>h</i> DOS DADOS DE <i>EUCALYPTUS</i> PROVENIENTES DO PROJETO NITA E DO BANCO DE DADOS DO BIOFIX.....	49
FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS OBTIDOS A PARTIR DE EQUAÇÕES UTILIZADAS NA ESTIMATIVA DE BIOMASSA SECA ACIMA DO SOLO EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i>	52
FIGURA 15 – RELAÇÃO ENTRE A MÉTRICA <i>dap</i> OBTIDA PELO INVENTÁRIO TRADICIONAL E PELO TLS COM A BS ESTIMADA PARA O SISTEMA CONVENCIONAL E PARA O SISTEMA iLF EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS BENTHAMII</i> LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI – PINHAIS.....	53
FIGURA 16 – RELAÇÃO ENTRE AS MÉTRICAS DAS VARIÁVEIS OBTIDAS PELO INVENTÁRIO TRADICIONAL E PELO TLS PARA OS SISTEMAS DE PLANTIO CONVENCIONAL E iLF DE <i>EUCALYPTUS BENTHAMII</i> LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI - PINHAIS.....	56
FIGURA 17 – PARALELISMO ENTRE AS MEDIDAS DE DIAMETROS A DIFERENTES ALTURAS PELO CRITERION E PELO TLS PARA O SISTEMA CONVENCIONAL E PARA O SISTEMA iLF LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI – PINHAIS.....	64
FIGURA 18 – DIFERENÇA DE CRESCIMENTO ENTRE O SISTEMA CONVENCIONAL E iLF PARA AS MÉTRICAS DAS VARIÁVEIS <i>dap</i> , <i>h</i> , <i>v</i> E BS OBTIDOS POR MEIO DE GRÁFICOS DO TIPO <i>BOX-</i> <i>PLOT</i>	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO DE ALGUNS TLS DISPONÍVEIS NO MERCADO E UTILIZADOS NA ÁREA FLORESTAL.....	31
TABELA 2 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CRITERION RD1000.....	39
TABELA 3 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS dap, h E BS DAS 46 ÁRVORES DE ESPECIES DE <i>EUCALYPTUS</i> UTILIZADAS NA MODELAGEM DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO.....	43
TABELA 4 – MODELOS UTILIZADOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO DE <i>EUCALYPTUS</i>	43
TABELA 5 – CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS INDEPENDENTES (dap E h) E DEPENDENTE (BS) UTILIZADAS NOS MODELOS PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA SECA INDIVIDUAL ACIMA DO SOLO PARA <i>EUCALYPTUS</i>	50
TABELA 6 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DO AJUSTE DE EQUAÇÕES PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO PARA PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i>	51
TABELA 7 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS VARIÁVEIS: dap, h, v E BS OBTIDAS PELO INVENTÁRIO TRADICIONAL E PELO TLS PARA O SISTEMA CONVENCIONAL E PARA O SISTEMA iLF LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI – PINHAIS.....	57
TABELA 8 – RESULTADO DA INFERÊNCIA DAS VARIÁVEIS MENSURADAS NO INVENTÁRIO TRADICIONAL E PELO TLS PARA <i>EUCALYPTUS BENTHAMII</i> LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI - PINHAIS....	59
TABELA 9 – SIMULAÇÃO DA MUDANÇA EM % PARA O VOLUME (v) E BIOMASSA SECA ACIMA DO SOLO (BS) COM O AUMENTO DE 1 CM NAS CLASSES DE dap PARA O SISTEMA CONVENCIONAL E PARA O SISTEMA iLF.....	62
TABELA 10 – SIMULAÇÃO DA MUDANÇA EM % PARA O VOLUME (v) E BIOMASSA SECA ACIMA DO SOLO (BS) COM O AUMENTO DE 1 M NAS CLASSES DE h PARA O SISTEMA CONVENCIONAL E PARA O SISTEMA iLF.....	63

TABELA 11 – RESULTADO DAS TRÊS HIPÓTESES TESTADAS COM A FERRAMENTA PROFILE ANALYSIS, PARA OS DOIS SISTEMAS AVALIADOS.....	64
TABELA 12 – RESULTADO DA ANÁLISE DO SEGMENTO COM MAIOR CONTRIBUIÇÃO NO NÃO PARALELISMO ENTRE AS CURVAS DE DIÂMETROS A DIFERENTES ALTURAS OBTIDOS PELO CRITERION E PELO TLS PARA O SISTEMA CONVENCIONAL E PARA O SISTEMA iLF.....	65

LISTA DE SIGLAS

ABC – Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura

BS – Biomassa Seca acima do solo (kg)

ALS – *Airborne Laser Scanning* (laser scanner aéreo)

BIOFIX – Centro de Excelência em Pesquisa sobre Fixação de Carbono na Biomassa

cap – circunferência a 1,30 m de altura (centímetros)

COP – Conferência das Partes

dap – diâmetro à 1,30 m de altura (centímetros)

FAB – Fator de Área Basal

GEE – Gases do Efeito Estufa

GIS – *Geographic Information System*

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

GPS – *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

h – Altura total (metros)

iLF – integração Lavoura-Floresta

iLP – integração Lavoura-Pecuária

iLPF – integração Lavoura-Pecuária-Floresta

IMU – *Inertial Measurement Unit* (Sistema de Medição Inercial)

iPF – integração Pecuária-Floresta

Laser – *Light Amplification by Stimulated of Radiation*

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

MDE – Modelo Digital de Elevação

NAMAS - Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas

NDC – Contribuição Nacionalmente Determinada

NITA – Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SIPA – Sistemas Integrados de Produção Agropecuária

TLS – *Terrestrial Laser Scanning* (TLS)

UFPR – Universidade Federal do Paraná

v – volume total sem casca (m³)

VANT – Veículo Aéreo não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVO.....	16
1.1.1	Objetivo geral.....	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
1.2	HIPÓTESE.....	17
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1	SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA.....	18
2.2	EVOLUÇÃO DO INVENTÁRIO FLORESTAL	22
2.3	LIDAR.....	24
2.3.1	<i>Airborne Laser Scanning</i> (ALS) e o inventário florestal.....	27
2.3.2	<i>Terrestrial Laser Scanning</i> (TLS) e o inventário florestal.....	29
2.3.3	Espaçamento e sua influência na extração de métricas com o TLS.....	34
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	36
3.2	INVENTÁRIO FLORESTAL.....	37
3.3	COLETA DE DADOS COM O <i>LASER SCANNER</i> TERRESTRE (TLS).....	39
3.4	PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	41
3.4.1	Estimativa do volume individual.....	41
3.4.2	Estimativa da Biomassa Seca acima do solo (BS) individual.....	42
3.4.3	Análise estatística das métricas dap, h, v e BS.....	45
3.4.4	Análise estatística para as métricas de diâmetros a diferentes alturas.....	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1	DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO PARA ESTIMATIVA DE BS INDIVIDUAL.....	49
4.2	ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS.....	53
4.3	ANÁLISE DO AFILAMENTO PARCIAL DAS ÁRVORES.....	63
4.4	PRODUÇÃO FLORESTAL NO SISTEMA CONVENCIONAL E NO SISTEMA iLF.....	66
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	69
	REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da ciência florestal existe a preocupação de mensurar a floresta, buscando gerar informações precisas, que sejam eficientes e de baixo custo (MELLO, 2004). Apesar da área florestal, do mercado e da própria floresta serem dinâmicos, o conhecimento acerca das condições em que se encontra uma floresta é baseada em suas características dendrométricas.

Nesses casos, o volume é a primeira variável a ser calculada, sendo importantíssima na avaliação da capacidade produtiva de um povoamento. Ademais, em florestas com destinação final de multiprodutos, é importante mensurar e avaliar o volume dos sortimentos, devido aos diferentes preços de mercado pago a esses produtos (SERPE; FIGUEIREDO FILHO; ARCE, 2018).

Diversas são as maneiras para obtenção da estimativa da variável volume, assim, como das demais variáveis dendrométricas. Entre elas as mais comuns consistem na utilização de equações, obtidas por meio da cubagem rigorosa de alguns indivíduos da floresta, quando o objetivo é a obtenção do volume (SOARES; NETO; SOUZA, 2006). Ainda inventário de biomassa, quando o objetivo é saber o peso do material lenhoso, utilizado principalmente em florestas com fins energéticos ou para polpa e papel. Essas técnicas de estimativa foram implementadas na década de 1950 e até hoje muitos modelos matemáticos foram desenvolvidos, porém nenhum modelo consegue abranger todas as condições e características de um povoamento (MACHADO; CONCEIÇÃO; FIGUEIREDO, 2002).

Os avanços da tecnologia na área florestal têm focado na busca por encontrar novas maneiras de abordar a estimativa das variáveis dendrométricas. Com o *Laser Scanner* Terrestre (TLS) é possível obter os diâmetros as diferentes alturas da árvore e, portanto, podem viabilizar a reconstrução do afilamento dos indivíduos de forma indireta. Esse equipamento permite a obtenção dos dados de forma rápida e precisa, tendo sido utilizado para o levantamento de variáveis de difícil mensuração, como a geometria dos troncos das árvores (MAAS et al., 2008).

Os diferentes sistemas silviculturais adotados no estabelecimento de um plantio possibilitam resultados de crescimentos distintos para as variáveis dendrométricas. Um dos sistemas com gradual aumento de áreas no país são os iLPF (integração Lavoura-Pecuária-Floresta) que são considerados inovadores, além de serem vistos como uma solução para a recuperação de áreas degradadas (ASSIS et

al., 2015). Esses sistemas também foram incluídos na NDC (Contribuição Nacionalmente Determinada) do Brasil acordada em Paris onde o país se comprometeu a implantar 5 milhões de hectares de sistema iLPF até 2030 (BRASIL, 2015).

Haja visto o aumento e estímulo pela implantação desses sistemas integrados no território brasileiro, será necessário o desenvolvimento de técnicas de mensuração que permitam gerar as estimativas com precisão. Desta maneira, será necessária uma adaptação ou desenvolvimento de métodos e processos de obtenção dessas variáveis para as condições desses sistemas que levem em consideração a influência da densidade dos plantios.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a influência dos sistemas de implantação, convencional e iLF (integração lavoura-floresta), na extração das métricas de indivíduos de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage obtidas por meio do *laser scanner* terrestre (TLS).

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho dos métodos de extração de métricas do inventário tradicional e *laser scanner* terrestre (TLS) para as variáveis: dap e h, e estimar as variáveis v e BS em dois sistemas de implantação (convencional e iLF);
- Testar se os métodos de extração de métricas do inventário tradicional e *laser scanner* terrestre (TLS) não apresentam diferenças significativas para as variáveis analisadas nos sistemas de implantação;
- Avaliar se o equipamento Criterion RD1000 e o TLS não apresentam diferenças significativas para a estimativa de diâmetros parciais a diferentes alturas.

1.2 HIPÓTESE

Este trabalho testou como hipótese que os métodos de extração de métricas florestais do inventário tradicional e do *laser scanner* terrestre (TLS), não apresentam diferenças significativas na geração de variáveis florestais individuais para diferentes sistemas de implantação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

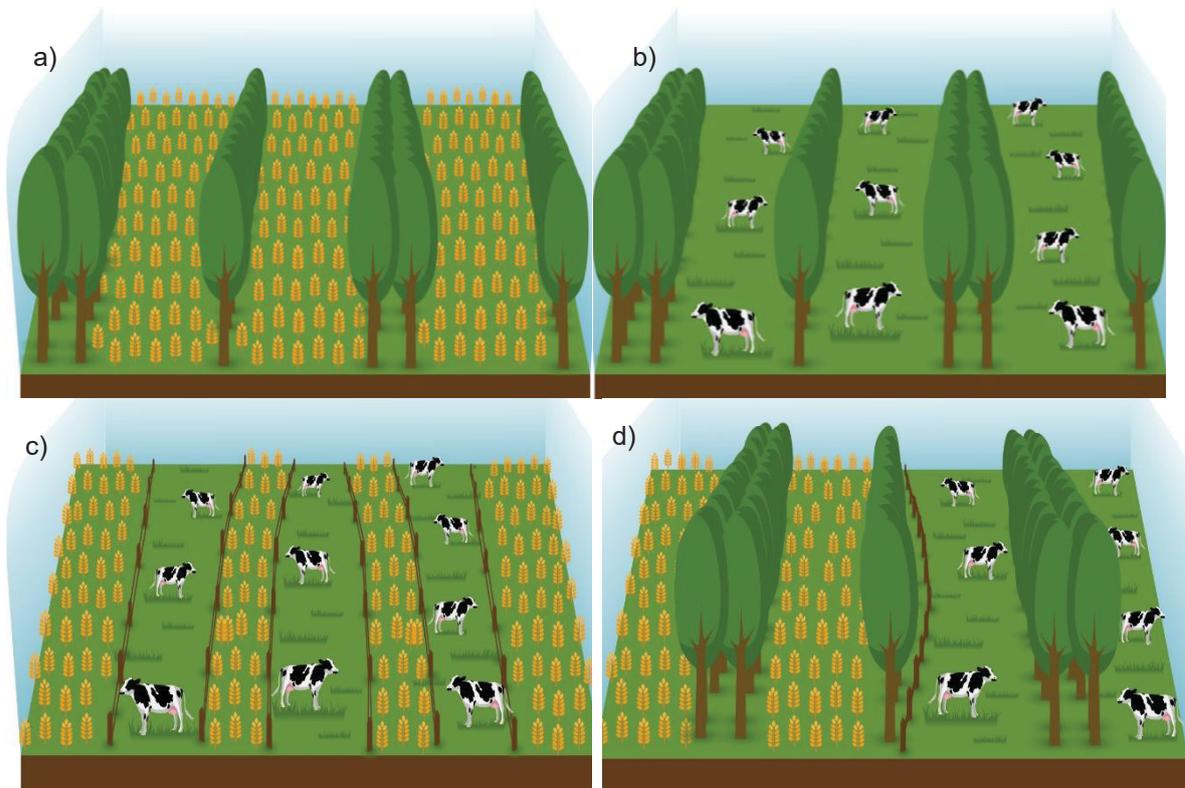
O setor agrário tem sido o principal ambiente onde se introduzem práticas produtivas, e na maioria dos espaços terrestres existe a atuação constante da sucessão natural, na direção da floresta diversificada. Assim, o uso das florestas ao longo de sua exploração não supõe que sua transformação esteja restrita a monocultura, mas que pode resultar em mosaicos de florestas manejadas e sistemas agroflorestais (STEENBOCK et al., 2013).

Os sistemas agroflorestais foram definidos pela legislação brasileira como sistemas de uso e ocupação do solo em que plantas lenhosas perenes são manejadas em associação com plantas herbáceas, arbustivas, arbóreas, culturas agrícolas ou forrageiras em uma mesma unidade de manejo, de acordo com arranjo espacial e temporal, com alta diversidade de espécies e interações entre estes componentes (BRASIL, 2009; BRASIL, 2010).

Enquanto que a integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) pode ser definida como uma estratégia de produção sustentável que tem como propósito integrar atividades agrícolas, pecuárias e florestais, realizadas na mesma área, que podem ter cultivo consorciado, em sucessão ou rotação, buscando a sinergia entre os componentes do agroecossistema. (BALBINO et al., 2011; CORDEIRO et al., 2015).

Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta são constituídos por 4 modalidades: Integração Lavoura-Floresta (iLF) ou sistema silviagrícola; integração Pecuária-Floresta ou sistema silvipastoril; integração Lavoura-Pecuária (iLP) ou sistema agropastoril; e integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) ou Sistema Agrossilvipastoril (BEHLING et al., 2014) (FIGURA 1).

FIGURA 1 – DEMONSTRAÇÃO DOS SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO COM FLORESTA, LAVOURA E PECUÁRIA



FONTE: A autora (2018).

a) Integração Lavoura-Floresta; b) Integração Pecuária-Floresta; c) Integração Lavoura-Pecuária; d) Integração Lavoura-Pecuária-Floresta.

O sistema de integração Lavoura-Floresta geralmente objetiva produzir novos produtos e serviços em uma área que anteriormente à implantação do sistema era exclusivamente cultivada para agricultura, nesses casos a lavoura amortiza o custo de implantação da floresta (BEHLING et al., 2014). Esse tipo de sistema integra os componentes agrícola e florestal por meio do consórcio de espécies agrícolas (perenes ou anuais) e arbóreas em rotação e/ou sucessão. Quando o elemento florestal é inserido no sistema, as árvores são plantadas em faixas ou renques de linhas simples ou linhas múltiplas com grandes espaçamentos entre as linhas ou renques, no qual é inserido o componente agrícola (CORDEIRO et al., 2015).

Apesar de caracterizar uma nova forma de produção rural no Brasil, os sistemas de integração são conhecidos desde a antiguidade na Europa, com vários tipos de plantios associados entre culturas anuais e perenes, entre frutíferas e árvores madeireiras e também com criação de animais entre as árvores. Os primeiros relatos registrados sobre esse tipo de arranjo são do século I d.C. (DUPRAZ; LIAGRE, 2008).

Esses tipos de sistemas, porém, desapareceram quando as lavouras, gado e árvores passaram a ter produções independentes, intensificadas e dissociadas, em virtude principalmente da mecanização e do aumento por demanda de alimentos (GHOLZ, 1987; BALBINO et al., 2011).

Para atender as necessidades crescentes por alimentos, energia e produtos florestais, busca-se soluções que permitam incentivar o desenvolvimento socioeconômico, sem comprometer a sustentabilidade dos recursos naturais. Portanto a integração dos sistemas é uma forma de produzir a mesma quantidade ou mais do produto já anteriormente fornecido, sem a necessidade de incorporar novas áreas ao processo (CORDEIRO et al., 2015).

A adoção da implementação de sistemas iLPF pelo Brasil nas metas de mitigação de gases do efeito estufa (GEE) surgiu na 15ª Conferência das Partes (COP) em Copenhague em 2009 através do NAMAS (Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas) (MACHADO, 2016). Como o setor agropecuário tem a vantagem de possuir os maiores potenciais de redução de emissões no curto prazo com a implementação de boas práticas agronômicas, foi elaborado em 2010 o Plano ABC (Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura) com o objetivo de responder aos compromissos assumidos pelo país para redução das emissões de GEE especificamente no setor agropecuário, e implantar sistemas iLPF com potencial de mitigação entre 18 e 22 milhões de Mg de CO₂eq até 2020 (AMARAL; CORDEIRO; GALERANI, 2012).

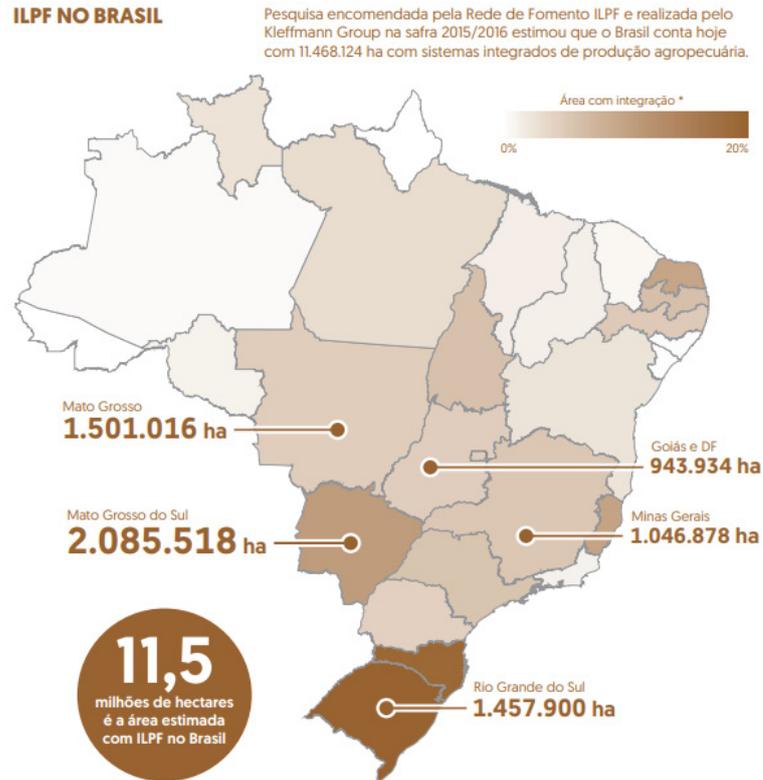
Segundo estimativa divulgada pela Embrapa (2016), em 2015 a área com sistemas iLPF atingiram 11,5 milhões de hectares, ultrapassando os 4 milhões inicialmente estipulados pelo plano ABC (FIGURA 2). Desse total, a integração Lavoura-Floresta (iLF) representa apenas 1% dos modelos adotados pelo país.

No mesmo ano de 2015, durante a COP 21 de Paris o Brasil acordou por meio da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) incrementar em mais 5 milhões de hectares os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) até 2030 (KÄSSMAYER; FRAXE NETO, 2016).

Apesar dos números apresentados, Reis et al. (2017) afirmam que a transição para uma agricultura de baixo carbono não está atingindo os resultados esperados, e conseqüentemente as metas estabelecidas da NDC também estão abaixo do

esperado, ainda sugerem que é necessário maior disponibilidade de subsídios, financiamento e assistência técnica para atingir os objetivos propostos.

FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO DOS SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA FLORESTA IMPLANTADOS NO BRASIL ATÉ O ANO DE 2015



FONTE: Portal Embrapa (2016): ILPF em números.

O estado do Rio Grande do Sul, possui mais de 20% do seu território composto por sistemas de integração de produção agropecuária (FIGURA 2), sendo que dessa área, somente 3% são de sistemas iLF (EMBRAPA, 2016). Para a região Sul do Brasil, os sistemas de integração de produção permitem a diversificação de atividades tanto em grandes quanto em pequenas propriedades, otimizando dessa maneira os implementos, insumos e mão de obra da propriedade, proporcionando maior competitividade e estabilidade em questões econômicas (CORDEIRO et al., 2015).

Outro compromisso do Brasil se estende em restaurar adicionalmente 15 milhões de hectares de pastagens degradadas até 2030 (REIS et al., 2017). Para tornar essas áreas produtivas novamente, dentre todas as técnicas, também é possível instalar sistemas iLPF que contenham pecuária em seu arranjo.

2.2 EVOLUÇÃO DO INVENTÁRIO FLORESTAL

O Inventário Florestal pode ser considerado a base para o planejamento do uso dos recursos florestais. Por meio dele é possível a caracterização de uma determinada área e o conhecimento quantitativo e qualitativo da cobertura florestal que a compõe, por meio de censo ou amostragem (ZONETE et al., 2010). Com o censo da área obtém-se os parâmetros da floresta, sendo necessário, porém, mensurar todos os indivíduos, o que na maioria das vezes não se torna viável, devido ao tempo e custos despendidos. A opção alternativa é adotar a amostragem por meio da medição de algumas unidades amostrais e dessa maneira gerar estimativas para o restante do povoamento. Juntamente com a escolha de um processo de amostragem está associado o erro amostral, resultante da medição de apenas parte da população (UBIALLI et al., 2009).

Os processos de amostragem sistemático e aleatório foram definidos por Husch (1971). Na amostragem sistemática cada unidade amostral é premeditadamente distribuída espacialmente, e possibilita estimativas mais precisas da média e do total da população. Na amostragem aleatória, as unidades amostrais são distribuídas aleatoriamente e permitem calcular a dimensão do erro amostral (SPURR, 1952; FREESE, 1962; HUSCH, 1971).

Após determinar o processo de amostragem, é definido a forma e tamanho das unidades amostrais, as quais influenciam diretamente no custo, trabalho e precisão do inventário florestal. Portanto durante o planejamento do inventário florestal é avaliado qual o melhor tamanho e forma das unidades amostrais a serem instaladas para representarem a população com um menor custo (CESARO et al., 1994).

Quanto ao tamanho da unidade amostral e sua representatividade Kramer e Akça (1982) e Husch et al. (1982), afirmam que em populações homogêneas, menores unidades amostrais apresentam uma melhor precisão devido a maior quantidade de unidades amostrais independentes instaladas. Enquanto que em populações heterogêneas, unidades amostrais de maiores tamanhos e, por consequência, em menor número, conseguem diminuir a variância entre as parcelas.

Para o processo de inventário florestal, durante o planejamento do método a ser empregado em campo, é fixado a precisão desejada e busca-se o menor erro com a mesma proporção de trabalho (MELLO et al., 2009). A intensidade amostral está diretamente relacionada à variabilidade da floresta e com a precisão pretendida

(HIGUCHI; SANTOS; JARDIM, 1982). Portanto, a definição do processo de amostragem, da forma e tamanho das unidades amostrais deve considerar a sua aplicação prática e operacional na floresta (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997; MOSCOVICH et al., 1999).

As principais variáveis mensuradas em um inventário florestal são os diâmetros e as alturas, pois a partir delas é possível obter a área transversal, área basal, volume, quociente e fator de forma (SANQUETTA et al., 2014b). Informações referentes ao volume são geralmente o objetivo da maioria dos inventários, devido a sua relevância para quantificação do material lenhoso de um povoamento (MACHADO et al., 2002).

Com o aprofundamento do conhecimento na mensuração, novas ferramentas foram empregadas no inventário florestal, os equipamentos de medição de altura e diâmetro foram se adaptando melhor as condições de campo e ficando mais precisos (FREITAS; WICHERT, 1998).

Os diâmetros possuem a medição direta com fita diamétrica ou métrica, suta mecânica ou eletrônica. Para a obtenção de diâmetros a diferentes alturas com o objetivo de cubagem rigorosa não destrutiva, método indireto de obtenção do volume e biomassa, foram desenvolvidos os dendrômetros ópticos, os quais possibilitam a tomada de diâmetros as diferentes alturas ao longo do tronco, desses podem ser citados o Pentaprisma de Wheeler, Relascópio de Bitterlich, dendrômetro de Barr e Stroud e os dendrômetros da família Criterion (ARNEY; PAINE, 1972; NICOLETTI et al., 2015).

As alturas das árvores geralmente são medidas com hipsômetros, os quais são baseados nos princípios geométricos ou trigonométricos. Para a medição de alturas os hipsômetros trigonométricos mais comuns são o Blume-Leiss, Haga, e o clinômetro Suunto. Os hipsômetros Vertex IV, Vertex *Laser* Geo, e o L5 juntamente com o Trupulse 200L e o Clinômetro eletrônico Haglöf são os instrumentos com recursos mais avançadas para medições de alturas (SANQUETTA et al., 2014b). A utilização de equipamentos eletrônicos como: suta eletrônica, coletores de dados, medidores de altura e o dendrômetro Criterion 400, tem facilitado a mensuração dos dados em campo e também sua posterior transcrição para o meio digital (FREITAS; WICHERT, 1998).

A biomassa é caracterizada como a quantidade de massa orgânica, tanto de origem vegetal, quanto animal, viva ou morta produzida em uma unidade de área

(SOARES; NETO; AGOSTINHO, 2011). Para a biomassa de origem vegetal em específico, pode ser utilizada a denominação de fitomassa (SANQUETTA, 2002). A biomassa ainda pode ser dividida em biomassa aérea, que envolve os compartimentos acima do solo (galhos, fuste e folhas), ou biomassa total, quando envolve a biomassa acima do solo e as raízes (MARTINELLI et., 1994). Os métodos para obtenção de biomassa podem ser diretos, quando todas as árvores são derrubadas e pesadas em uma unidade amostral, e os dados são extrapolados para o povoamento, ou pelo método indireto em que os valores são obtidos por meio de estimativas subsidiadas por equações alométricas, baseadas nos dados do inventário florestal (HIGUCHI; CARVALHO JR, 1994).

Enquanto que o inventário tradicional consegue gerar estimativas para grandes áreas, como estratos ou conjunto de talhões, as novas técnicas de sensoriamento remoto estão permitindo estimativas mais precisas ao nível de cada talhão, garantindo conseqüentemente um planejamento mais específico para as circunstâncias encontradas (ANDRADE, 2013).

Silva (2013b) afirmava que os veículos aéreos não tripulados seriam a nova tendência em sensoriamento remoto no Brasil e destacou as vantagens de que além da redução dos custos de operação, comparados às aeronaves tripuladas, a utilização de VANTs trariam a possibilidade de monitoramento de atividades em tempo real ou em áreas onde o voo tripulado pode apresentar um risco a tripulação. Ainda em 2018, Souza Neto e Coelho, destacam que os VANTs são promissores devido às vantagens de obtenção de imagens aéreas com alta resolução espacial e baixo custo de aquisição quando comparados a outros métodos de aquisição como imagens de satélite.

Modernas técnicas de sensoriamento remoto têm-se apresentado como alternativas capazes de substituir certas operações de campo normalmente associadas com altos custos, essas, porém estão associadas a escala do inventário florestal. Dentre essas técnicas, equipamentos baseados em emissões de *laser* são cada vez mais acessíveis (ZONETE et al., 2010).

2.3 LIDAR

A tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) é conhecida no Brasil como Sistema de Varredura a *Laser* (CENTENO; MITISHITA, 2007) ou ainda como

perfilamento a *laser* (CASTRO; CENTENO, 2007), são técnicas de sensoriamento remoto baseadas na detecção da variação de luz do *laser* (POPESCU, 2011). Sua teoria surgiu em 1958 com os estudos desenvolvidos por Schawlow e Townes (1958), que para obter a amplificação de luz por emissão estimulada de radiação se basearam nos princípios estabelecidos por Einstein em 1917. Entre 1960 e 1970 o *laser* teve seu início no sensoriamento remoto com trabalhos discretos nas áreas de monitoramento atmosférico e estudos oceanográficos (WEHR; LOHR, 1999). Com o passar dos anos os sensores a *laser* foram melhorados e iniciaram a realização de medição de distâncias sem exigir refletores, até terem suas primeiras aplicações em inventários florestais na década de 1990 (TOMMAZELLI, 2003; VAUHKONEN et al., 2014).

Giongo et al. (2010) reforçam que a utilização dos dados LiDAR teve seu início em levantamento de dados para a elaboração de Modelos Digitais de Elevação (MDE), visto que os métodos empregados não estavam sendo suficientes. Porém demonstrou ter potencial em diversas áreas, como: florestas, agricultura, planejamento costeiro, planejamento urbano, avaliação de riscos de inundação, entre outros.

O sistema de varredura *laser* consiste na emissão de milhares de pulsos *laser* por segundo na velocidade da luz, e o tempo de retorno dos pulsos *laser* emitidos pelo sensor até a plataforma, permitem estimar a distância dos alvos do levantamento (BALTSAVIAS, 1999). Desta forma, a distância pode ser calculada por meio do conhecimento da velocidade do pulso *laser* e do tempo entre a emissão e a detecção, e juntamente com a distância é mensurado a intensidade da energia refletida pelo objeto alvo e os parâmetros de atitude do feixe (azimute e elevação), além de registrar e armazenar os dados (TOMMAZELLI, 2003; WUTKE, 2006). Esse sistema é caracterizado como um sistema de detecção ativo, pois aplica um feixe *laser* como suporte para detecção do alvo, e ainda recebe uma parte desse feixe de *laser* emitido como resposta (WEHR; LOHR, 1999).

Os *scanners a laser* são baseados pelo princípio da triangulação, pelo tempo de retorno do sinal ou por diferença de fase. Se tratando do primeiro caso, os *scanners* possuem uma fonte *laser* e um sensor CCD, são indicados para reconstrução de pequenos objetos e possuem problemas de identificação do ponto *laser* refletido pelo alvo, causados pela iluminação local e pela distância ao objeto (TOMMAZELLI, 2003; BARBER et al., 2001). Pelo princípio de tempo de retorno do sinal é utilizado o sistema LiDAR, esse sistema emite milhares de pulsos por segundo, resultando numa nuvem

de pontos 3D, também chamada de Modelo Numérico de Superfície. Em comparação as estações totais robotizadas os sistemas de varredura a *laser* possuem maior velocidade de coleta e automações mais avançadas (TOMMAZELLI, 2003). No princípio da diferença de fase a medição eletrônica utiliza o método de comparação de fase ou a medida da defasagem entre a onda emitida e a onda de retorno. Assim, uma onda eletromagnética de alta frequência, é modulada em amplitude com um sinal de comprimento de onda muito maior e emitida de maneira contínua. Possui um intervalo restrito ao máximo de 100 metros com precisão de medidas de distância de alguns milímetros. A taxa de amostragem é alta, porém tem a desvantagem de possuírem uma faixa restrita de dados sem ambiguidade (FRÖHLICH, MATTENLEITER, 2004; SILVA, 2011).

Uma característica importante dos *scanners* do tipo LiDAR é a sua exatidão homogênea em relação à distância do objeto. Enquanto, nos *scanners* por triangulação ou no processo fotogramétrico, a exatidão diminui com o quadrado da distância, nos *scanners* LiDAR há uma discreta diminuição da precisão da medida com o aumento da distância. Isto ocorre porque o erro na medida do tempo de retorno não é influenciado significativamente pelo aumento da distância (TOMMAZELLI, 2003). Gordon et al. (2001) concluíram que a exatidão da distância, após o ajuste de superfícies à nuvem de pontos, é da ordem de +- 2 mm, para uma distância de 30m.

A varredura a *laser* contém algumas características importantes que são apresentadas na sequência:

É um método ativo que não depende da luz visível refletida, embora alguns modelos de *scanners* apresentem comportamento inadequado na ausência total de iluminação;

Operação remota, o que significa que o objeto não precisa ser tocado;

O princípio geométrico de cálculo das coordenadas pode ser a triangulação ou o irradiação, dependendo do modelo, mas em ambos os casos a varredura pode ser feita com apenas uma estação por visada;

A resposta está disponível em tempo real, ou seja, após o término da varredura o operador tem à sua disposição milhões de pontos com coordenadas conhecidas, estando apto a fornecer respostas sobre os objetos, como distâncias entre peças, dimensões, volumes, verticalidade de superfícies, etc.;

Alta densidade de pontos coletados e, conseqüentemente, altíssima redundância na descrição discreta dos objetos;

É possível realizar o controle de qualidade durante a coleta e refazer a varredura, se necessário;

A exatidão das coordenadas é homogênea, ou seja, a qualidade dos pontos depende apenas da distância do *laser* ao objeto;

Operação *stand-alone* simples e flexível; basta um operador para posicionar e operar o sistema;

É possível combinar vários modelos numéricos gerados de diferentes posições, o que permite cobrir quase toda superfície visível dos objetos;

Alguns sistemas possuem *softwares* para a obtenção de descrições paramétricas dos objetos por ajuste à nuvem de pontos, o que permite uma exatidão ainda maior que a dos pontos isolados; além disto, devido à alta densidade de pontos as ferramentas automáticas de alguns sistemas fazem a busca pelos pontos pertencentes aos mesmos objetos ou superfícies. (TOMMASELLI, 2003, p.10).

Os dados LiDAR podem ser coletados pelos equipamentos aéreos, embarcados em aeronaves ou VANTs; espaciais, embarcados em satélites (GEDI); ou ainda ser coletados por equipamentos terrestres sendo esse fixo ou móvel. Quando o equipamento é fixado em uma posição, para a aquisição dos dados é classificado como estático e quando o equipamento é montado sobre uma plataforma móvel para a coleta dos dados é classificado como dinâmico (PADILHA, 2017). A varredura estática possui a vantagem de uma alta densidade de pontos e de uma precisão milimétrica. Na varredura dinâmica com equipamentos aéreos, a coleta de dados pode ser realizada em áreas extensas, porém, são necessários posicionamentos complementares, tais como GPS e IMU (PADILHA, 2017). As distinções ópticas e mecânicas entre os sistemas LiDAR terrestre, aéreo e espacial, ocorrem na montagem das plataformas e na complexidade das tecnologias na determinação da orientação e posição do sensor (POPESCU, 2011).

Na medida em que utilizamos um sistema *laser scanner* para executar o levantamento de medidas florestais, obtemos não apenas suas características espaciais, mas podemos também obter dados adicionais que podem permitir um maior entendimento desses objetos (BORDIN et al., 2013).

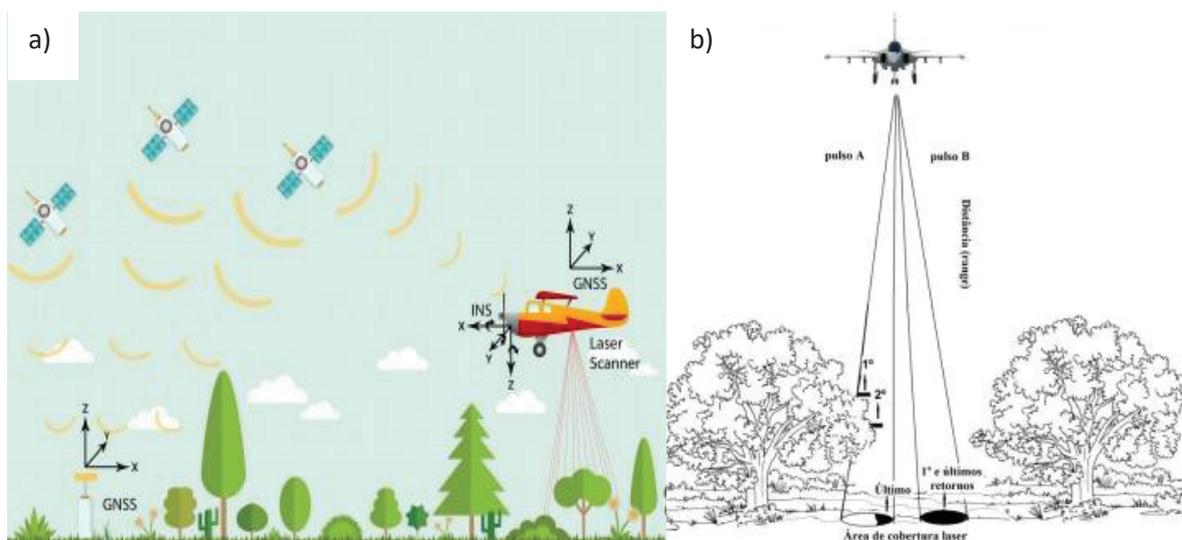
2.3.1 Airborne Laser Scanning (ALS) e o inventário florestal

O escaneamento a *laser* aerotransportado ou ALS é uma das técnicas mais promissoras para as finalidades do inventário florestal, pois resulta numa nuvem de pontos 3D, próximo a superfície da terra que contém medidas diretas dos alvos

(árvores) de interesse. A altura média, área basal e volume são exemplos de variáveis estimadas pelo ALS (NAESSET, 2004; ALVES, 2010).

O sistema ALS é composto por uma unidade de emissão e recebimento *laser* acoplado a aeronave; Sistemas de GPS (posicionamento global) posicionadas no avião e outro na base em terra; Sistemas de medição inercial (IMU, do inglês *Inertial Measurement Unit*), acoplado à unidade *laser* para medir *roll* (rolamento), *pitch* (arfagem) e *yaw* (guinada) e computador para registrar os pulsos emitidos e controlar o sistema (FIGURA 3a) (SILVA, 2013a; MACEDO, 2009). Em diversas situações são vários os obstáculos ou objetos encontrados antes de atingir o solo, e com o equipamento demonstrado na FIGURA 3b armazena o registro do primeiro e segundo retorno antes de atingir o solo e do último registro de retorno do pulso.

FIGURA 3 – COMPONENTES DE UM SISTEMA ALS (*AIRBORNE LASER SCANNING*) E DEMONSTRAÇÃO DE SEU FUNCIONAMENTO NA OBTENÇÃO DOS RETORNOS



FONTE: a) BEBERT (2016); b) Adaptado de JENSEN (2009).

Geralmente na área florestal os instrumentos ALS são *small-footprint*, ou seja, o sensor mede apenas um, dois ou um número pequeno de alturas. Esse sistema de retornos discretos armazena um ou mais retornos para cada pulso *laser* emitido (FIGURA 3b). A abertura do feixe *laser* ao deixar o sensor emissor até atingir o alvo, também chamado de *footprint*, tem tamanho de 1 metro (VAUHKONEN et al., 2014; ALVES, 2010). O primeiro retorno do pulso *laser* geralmente corresponde as maiores alturas das árvores, o segundo retorno de alguma altura intermediária e o terceiro retorno na maioria dos casos corresponde a superfície do terreno (LIM et al., 2001).

Wack et al. (2003) afirmavam que a combinação do processamento avançado com a primorosa estrutura dos dados resultantes do ALS e a integração com ferramentas de Sistema de Informação Geográfica (SIG ou GIS - *Geographic Information System*), tem capacidade de fornecer oportunidades de otimizar a coleta e consistência de dados, auxiliando nas decisões e gestão florestal. Sendo então, o escaneamento a *laser*, reafirmado por demais autores, como uma das técnicas promissoras para fins de medições em inventários florestais, devido à alta precisão alcançada com a ALS para obtenção de variáveis dendrométricas (NAESSET, 2004; MACEDO, 2009).

Segundo Shinzato (2015) os estudos no Brasil com ALS incluindo florestas plantadas iniciaram com os trabalhos de Pires (2005) e de Zandoná (2006). O trabalho de Pires (2005) utilizou o ALS para estimativa da altura de árvores em plantios de *Eucalyptus* e Zandoná (2006) para a estimativa de algumas variáveis dendrométricas e não somente a altura. Depois estudos envolvendo modelagem de carbono (CELES, 2017), biomassa (SILVA, 2013a), estratos da cobertura vegetal (ALIXANDRINI, 2005), trabalhos com árvore individual (TIEDE; HOCHLEITNER; BLASCHKE, 2005; ZANDONÁ, 2006), com copa e outras variáveis também foram desenvolvidos.

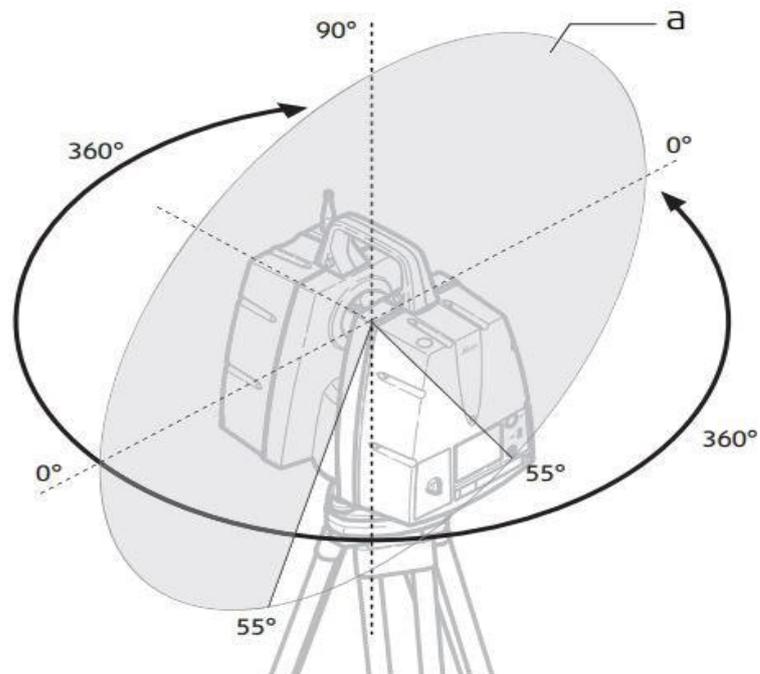
Portanto o sensor de varredura a *laser* aerotransportado tem potencial para utilização em florestas na aquisição de diferentes variáveis, visando sempre integrar e facilitar os inventários tradicionais. Macedo (2009) ressalta os benefícios da utilização desse sistema em relação aos inventários convencionais. Aborda que com o ALS é possível a realização de censos, ao invés de amostragens, que produz alturas em diferentes pontos de uma mesma árvore em um único sobrevoo, que permite a identificação de diâmetros de copas, além de calcular precisamente áreas de superfície e contar indivíduos.

2.3.2 *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) e o inventário florestal

Os equipamentos *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) ou então *laser scanner* terrestre, em português, geralmente são montados sobre um tripé, e após a configuração inicial de escaneamento, o pulso *laser* é propagado horizontalmente em pequenos intervalos angulares. Assim, então por meio de um espelho giratório, o equipamento TLS dispara também pulsos no sentido vertical, calculando dessa maneira as coordenadas dos pontos que refletem o sinal (MÁRQUEZ, 2010).

Esses sistemas fazem as medições por meio de duas janelas de captura. O feixe de luz é direcionado por espelhos internos para uma das janelas possibilitando a varredura com campo de visão (*Field Of View – FOV*) (SILVA, 2011). Os feixes ópticos são distribuídos verticalmente em aberturas angulares, geralmente de 170°, no movimento giratório ou sentido horizontal os feixes são distribuídos em abertura total de 360° (ALMEIDA, 2017) (FIGURA 4). O resultado desse escaneamento é uma nuvem de pontos 3D, que pode ser utilizada para a coleta rápida e acurada de dados com alto detalhamento e com uma ampla variedade de aplicações (LICHTI; PFEIFER; MAAS, 2008).

FIGURA 4 – CAMPO DE VISADA DOS FEIXES ÓPTICOS NO SENTIDO HORIZONTAL E VERTICAL DE UM TLS COM ABERTURA ANGULAR VERTICAL DE 290°



FONTE: *User Manual* Leica ScanStation P50/P40/P30 (2018).

O princípio de medição utilizado pelo TLS nesse trabalho é o *time of flight* (tempo de voo do sinal), que mede distâncias superiores a 100m. Esse é o princípio mais utilizado entre os equipamentos *laser* e é baseado no cálculo do tempo entre a emissão e a recepção do pulso de *laser*, ou seja, é a equação geral da velocidade que é a razão entre a distância e o tempo. Então o equipamento TLS envia os pulsos *laser* na velocidade da luz, que atingem as árvores e são refletidos retornando o sinal ao equipamento. Esses equipamentos geralmente utilizam comprimentos de ondas do infravermelho-próximo (900-1500nm) e tem uma baixa velocidade no processo de

aquisição dos dados (FRÖHLICH; MATTENLEITER, 2004; MÁRQUEZ, 2010, LEMMENS, 2011 a).

Os equipamentos com princípio *time of flight* podem realizar o escaneamento por 4 métodos: (a) Gravação de um único retorno para o primeiro objeto que reflete somente uma porção do pulso *laser* emitido; (b) Gravação da primeira e da última reflectância; (c) Gravação de retorno múltiplo, de até cinco sinais e; (d) Gravação de onda completa, que produz uma melhor avaliação da estrutura do alvo (PFEIFER, 2007; LEMMENS, 2011b).

Na TABELA 1 estão apresentadas características de funcionamento de alguns modelos de TLS disponíveis no mercado e utilizados na área florestal. Nela estão expressas as precisões, aberturas angulares no sentido horizontal e vertical, velocidade de medição além de outros detalhes. O TLS utilizado nesse trabalho foi o ScanStation P40 da marca Leica e é possível verificar pelas descrições as vantagens e desvantagens que ele possui sobre os demais TLS apresentados.

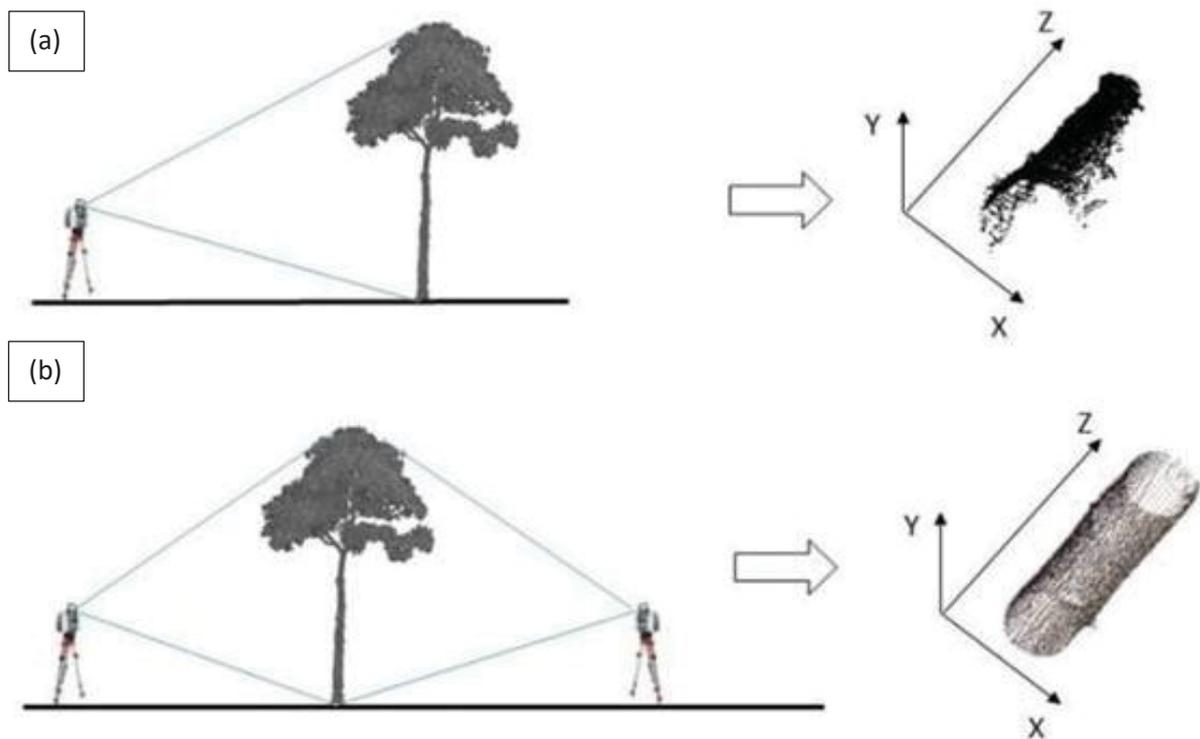
TABELA 1 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO DE ALGUNS TLS DISPONÍVEIS NO MERCADO E UTILIZADOS NA ÁREA FLORESTAL

Funcionalidade	ScanStation P40 Leica	Cyrax HDS 3000 Leica	Faro Focus XD X 330	RIEGL VZ 1000	Stonex X300
Máximo alcance	270 m	100 m	330 m	1400 m	300 m
Precisão	3 mm até 50m/ 6mm até 100m	4 mm/50m	± 2 mm para d ≤ 25m	8mm/1000m	< 6mm para d ≤ 50m e < 40mm até 300m
Campo de visão horizontal	360°	360°	360°	360°	360°
Campo de visão vertical	290°	270°	270°	100°	90°
Comprimento de onda	1550 nm	532 nm	1550 nm	904 nm	905 nm
Tamanho da projeção do <i>laser</i>	2.5 mm circular	6 mm (até distâncias de 50 m)	2.25mm (circular)	Não disponibilizado no manual do fabricante	1.5 mm
Velocidade de medição	1.000.000 pontos/s	20.000 pontos/s	976.000 pontos/s	122.00 pontos/s	40.000 pontos/s
Divergência do feixe <i>laser</i>	0.23 mrad	0.3 mrad	0.19 mrad	0.3 mrad	0.37 mrad
Princípio de funcionamento	<i>Time of flight</i>	<i>Time of flight</i>	<i>Time of flight</i>	<i>Time of flight</i>	<i>Time of flight</i>
Peso (com as baterias)	12,65kg	16 kg	5 kg	9,8 kg	7kg
<i>Laser</i>	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1

FONTE: A autora (2018) - Elaborado de acordo com o manual dos fabricantes.

Quanto ao levantamento, esse pode ser classificado como varredura simples ou múltipla (FIGURA 5). Na varredura simples o escaneamento com *laser* ocorre somente em um ponto da área estudada, ou seja, em apenas uma estação, a aquisição dos dados é parcial, resultando em semicircunferências das árvores. Quando o escaneamento é realizado em duas ou mais estações é caracterizado como varredura múltipla e garante uma melhor cobertura e caracterização dos alvos, pois a união das varreduras tomadas nos diferentes pontos propicia maior detalhamento, abrangendo toda a superfície do fuste das árvores (SILVA, 2011; BUCK, 2012; PESCK, 2015; LIANG et al., 2016). O pré-processamento e transformação geométrica das nuvens provenientes de varreduras múltiplas é realizado pelo cálculo das coordenadas tridimensionais dos pontos imageados pelo feixe *laser*, tendo como referência alvos que sejam comuns a ambas varreduras (DASSOT et al., 2011).

FIGURA 5 – DEMONSTRAÇÃO DE UM LEVANTAMENTO COM VARREDURA SIMPLES E MÚLTIPLA COM UM TLS (*TERRESTRIAL LASER SCANNING*)



FONTE: MARTINS NETO (2016).

a) exemplificação da varredura simples; b) exemplificação da varredura múltipla

O TLS obtém distâncias com alta precisão, e por meio da associação de ângulos obtém também o cálculo de posições tridimensionais dos pontos imageados (SILVA, 2013a). O cálculo desse posicionamento 3D torna-se uma alternativa para a obtenção de variáveis dendrométricas, porém, devido ao tempo e a dificuldade de

processamento dos dados, a condição essencial para maior aplicabilidade do TLS é a implementação de algoritmos que permitam a automatização das medições a serem realizadas nas florestas (ZASADA et al., 2013).

O *laser scanner* aerotransportado teve mais estudos aplicados ao longo de sua utilização na área florestal. Entretanto, devido as dificuldades encontradas na obtenção do dap e diâmetros ao longo do fuste (SILVA, 2011) oportunizaram o desenvolvimento de estudos com TLS, que possibilitam a aquisição de dados sobre a geometria ao longo do tronco da árvore gerando informações de alta precisão (MASS et al., 2008).

Porém ao ser utilizado em um povoamento florestal, a nuvem de pontos não registra apenas a superfície do tronco e sim todo o conjunto de galhos, folhas e demais formações vegetais, além de possíveis objetos que se encontrem no campo de visada do equipamento, esses dados que não fazem parte do interesse do estudo e precisam ser eliminados quando se objetiva aplicar modelagem tridimensional para obtenção do volume (LITKEY et al., 2008). E apesar da crescente evolução na pesquisa, desenvolvimento e utilização de TLS, ainda é encontrado dificuldade em alguns casos de recobrimento satisfatório na parte superior das árvores, isso deve-se a oclusão causada por sombreamento de galhos, folhas e outras copas, principalmente em florestas mais desenvolvidas ou fechadas. Essa oclusão diminui a densidade de pontos, e dificulta a utilização das medidas obtidas (VAN DER ZANDE et al., 2006; GATZIOLIS et al., 2010).

Após a aquisição da nuvem de pontos vários são os processos de automatização que podem ser aplicados para obtenção do volume individual de árvores, como a detecção e filtragem de troncos, processamentos para a extração de altura total e diâmetros ao longo do tronco (SILVA et al., 2011). O uso de algoritmos para detecção de árvores e determinação de dap foi abordado no estudo de Pesck (2015). Já a extração da altura total da árvore pode ser obtida de forma simples na nuvem de pontos TLS, visto que é a diferença entre o ponto mais baixo do tronco e ponto mais alto da copa, essa variável dendrométrica tem sido obtida com acurácia como demonstram os estudos de ASCHOFF; THIES; SPIECKER (2004), HOPKINSON et al. (2004), SILVA et al. (2011) e MARTINS NETO et al. (2013). Bordin et al. (2013) trabalharam com a calibração radiométrica do TLS, avaliaram a distância nos dados de intensidade de retorno do *laser* e analisaram o efeito da borda em imageamento de alvos florestais.

Cada equipamento TLS gera um formato próprio de arquivo dos dados coletados, no entanto esses arquivos possuem similaridades em relação às suas informações. Os arquivos armazenam as coordenadas dos pontos no espaço (X, Y, Z), o valor de intensidade de retorno do pulso *laser* e, se possível, os valores provenientes da câmera fotográfica digital (RGB), gerando uma sequência de informações (XYZ, I, RGB) (BORDIN et al., 2013).

2.3.3 Espaçamento e sua influência na extração de métricas com o TLS

A escolha inicial do espaçamento de plantio tem como objetivo proporcionar o espaço suficiente para promover o maior crescimento com o menor custo (CHIES, 2005). O espaçamento influencia no crescimento inicial do plantio e no crescimento da floresta num todo (STAPE, 1995), afetando no manejo a ser escolhido, na produção final, no tamanho médio da tora e na qualidade da madeira (PINKARD, NIELSEN, 2001).

Por enquanto nenhum estudo avaliando a influência da densidade de plantas por hectare envolvendo o uso do TLS ou de seus produtos foi realizado. É de conhecimento que o sombreamento das copas vizinhas pode influenciar na extração de métricas de copa e alturas médias (HOPKINSON et al., 2004) e que a presença de muitos galhos ou sobreposição de copas diminui a densidade de pontos do fuste e interfere no isolamento dos indivíduos. Silva (2011) realizou a extração das métricas de área transversal, para tanto fez cortes ao longo do troco e comenta sobre a influência da densidade de pontos na espessura do corte, em que quanto mais alta o corte ao longo do tronco, maior deve ser a espessura do corte devido a influência dos galhos e menor densidade de pontos. Ainda nesse contexto Buck et al. (2014) comentam que a alta densidade de acículas é um fator limitante para a filtragem e modelagem do tronco. Porém Tavares et al. (2016) ressaltam que o aumento da densidade de pontos gerado pelo equipamento TLS, implica em um aumento no tempo de escaneamento e no processamento dos dados.

Watt e Donoghue (2005) ao avaliarem duas espécies com diferentes densidades de indivíduos por hectare, concluíram que o sombreamento causado pela densidade das demais árvores ou pela presença dos galhos diminui a quantidade de informações uteis presentes em uma varredura. Martins Neto et al. (2013) constataram que a determinação da altura dos indivíduos pelo método de média das

cotas pode ter erros ocasionados pela presença de copas adjacentes no campo de visada do laser.

Lingnau et al. (2008) afirmam ao trabalharem em uma densidade de 890 árvores por hectare, com um espaçamento pouco denso, que não ocorreu muita sobreposição e sombreamento e ainda que não conteve árvores vizinhas no raio de isolamento dos indivíduos. Porém ressaltam que o uso do TLS e os métodos empregados devem ser estudados com diferentes densidades de plantios.

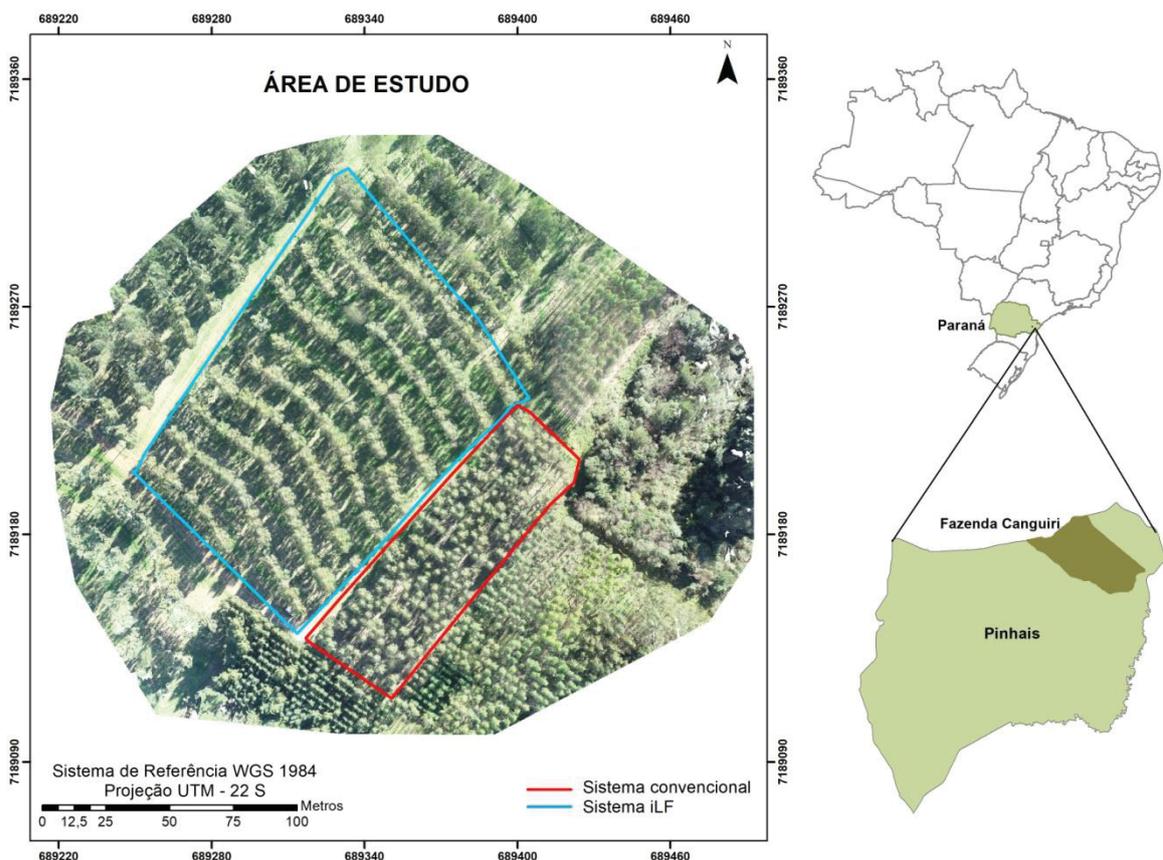
Diante do exposto, esse trabalho irá buscar aprofundar a discussão da influência de diferentes sistemas de implantação sobre a extração de métricas florestais a partir de dados obtidos com um TLS.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo pertence à Fazenda Experimental Canguiri, da Universidade Federal do Paraná (UFPR), e faz parte do projeto NITA (Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária) que objetiva desenvolver conhecimentos por meio da pesquisa com a implantação de projetos SIPA (Sistemas Integrados de Produção Agropecuária), o qual busca aplicar diferentes práticas agrícolas e zootécnicas nos sistemas de produção (FIGURA 6).

FIGURA 6 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA FAZENDA CANGUIRI, PERTENCENTE A UFPR, NO MUNICÍPIO DE PINHAIS – PR



FONTE: A autora (2018)

A Fazenda Experimental Canguiri está localizada no município de Pinhais, região metropolitana de Curitiba entre as coordenadas geográficas: 25°22'38" e 25°24'46" de latitude sul, 49°09'05" e 49°06'40" de longitude oeste. Possui uma área

de 440 ha e altitude média de 920 m. O clima da região é classificado como Cfb caracterizado por clima oceânico sem estação seca com verão temperado e temperatura média anual de 17° C (20,5° C em janeiro e 13° C em julho) e precipitação anual de 1.550 mm, ligeiramente concentrada nos meses do verão, os meses mais secos são julho e agosto (ALVARES et al., 2013).

As áreas correspondentes ao estudo foram classificadas como: sistema convencional de plantio (talhão A – em vermelho na FIGURA 6) que corresponde a uma área de 0,48 hectares; e sistema iLF (integração de lavoura com floresta - talhão B – em azul na FIGURA 6) que corresponde a uma área de 1,41 hectares. Os dois sistemas foram implantados em curva de nível.

Entende-se por sistema convencional de plantio, o modelo que é implantado em larga escala e adotado pelas grandes empresas reflorestadoras do setor florestal no Brasil, baseado em uma alta densidade de árvores por hectare, geralmente com espaçamento inicial de 3 x 2 m ou 3 X 3 m. No sistema convencional de plantio da área de estudo foram avaliadas 61 árvores com espaçamento inicial de plantio de 3 X 2 m. O segundo sistema avaliado (iLF) tem espaçamento inicial de 14 x 2 m e nessa condição foram avaliadas 69 árvores, distribuídas entre 10 linhas de plantio. Supondo áreas de um hectare, o sistema convencional totalizaria 1666 indivíduos e o sistema iLF 357 indivíduos no plantio inicial.

Ambos os talhões eram compostos por árvores de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage com aproximadamente 4 anos de idade. A referida espécie foi escolhida para os plantios por suas qualidades de rápido crescimento e por ser resistente ao frio e a geadas, características presentes na área em questão, conforme apresentado por Higa e Pereira (2003).

3.2 INVENTÁRIO FLORESTAL

Todas as árvores dos dois sistemas tiveram a circunferência a 1,30 m acima do solo (cap) mensurada com fita métrica (FIGURA 7a, em centímetros), posteriormente transformados em dap. A altura total (FIGURA 7b, em metros) foi mensurada com clinômetro digital da marca Haglöf. Essas medições ocorreram em outubro de 2016, juntamente com a coleta de dados com o equipamento TLS.

Ainda foram cubadas parcialmente 34 árvores no sistema convencional e 16 árvores no sistema de integração lavoura-floresta com o relascópio digital Criterion

RD1000 da marca *Laser Technology* em fevereiro de 2017. Esse equipamento permite a cubagem rigorosa não-destrutiva, ou seja, possibilita que os indivíduos tenham seu diâmetro mensurado em diferentes alturas da árvore sem que a mesma seja cortada. As medições foram tomadas nas alturas fixas de 1,3 m, 2 m, 4 m e 6 m (FIGURA 7 c-d).

FIGURA 7 – MEDIÇÕES DURANTE O INVENTÁRIO TRADICIONAL REALIZADO NO SISTEMA CONVENCIONAL E NO SISTEMA iLF PARA *EUCALYPTUS BENTHAMII* LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI – PINHAIS



FONTE: A autora (2018).

a) medição da circunferência a 1,30 m de altura; b) medição de altura total; c) e d) medição de diâmetros às diferentes alturas

Na TABELA 2 estão especificadas as características técnicas do Criterion RD1000 que possui como função a medição de diâmetros a diferentes alturas, de altura para algum diâmetro específico e também atua como relascópio, indicando se as árvores estão dentro ou fora de algum FAB (Função de Área Basal) pré-determinado.

TABELA 2 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CRITERION RD1000

Especificações técnicas	
Faixa de medição de diâmetro	5 a 254 cm
Fator de Área Basal (FAB)	0,2 a 29,1 m ² /ha
Inclinação	± 90°
Exatidão de diâmetro	± 6 mm a 24 m
Exatidão de inclinação	± 0,1°

Todos os dados foram anotados em ficha de campo especificamente desenvolvida para registro das informações, bem como, para o posicionamento dos indivíduos na linha visando um controle posterior de posição.

Os dados foram digitados no Excel para conferência e suporte aos cálculos que foram realizados na sequência.

3.3 COLETA DE DADOS COM O *LASER SCANNER* TERRESTRE (TLS)

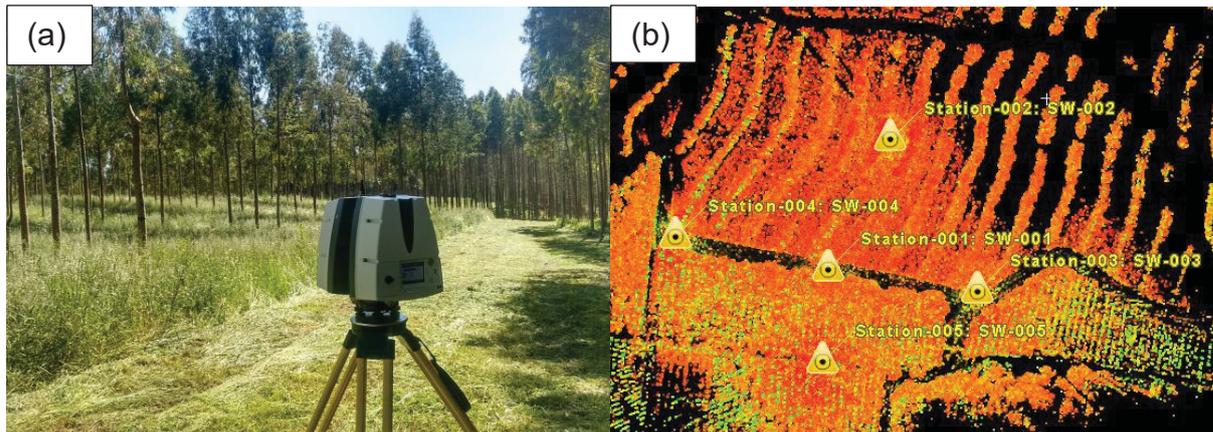
O equipamento utilizado na aquisição dos dados foi o TLS modelo Leica ScanStation P40, com uma resolução na varredura *laser* de 6,3 mm, gerando aproximadamente 40 milhões de pontos em cada posição coletada (10.054x4.050 pixels), para a resolução utilizada. No total foram realizados 5 giros de 360° (no eixo horizontal) em 5 posições distintas, realizando assim, varredura múltipla, produzindo em torno de 200 milhões de pontos (FIGURA 8), sem apoio de alvos. Apesar da varredura ser múltipla, no momento da extração das métricas foi utilizada a varredura simples.

O TLS apresenta o sistema de varredura panorâmico, ou seja, os dados são coletados por meio de uma varredura horizontal e vertical, permitindo uma varredura completa de 360° no eixo horizontal e 290° no eixo vertical, sendo limitado apenas pela base do instrumento. Logo, foram capturadas 266 imagens de 4 Mpixel, formando um mosaico de 700 Mpixels, com resolução de 1.920x1.920 pixels, que auxiliaram na extração das métricas das árvores.

O ajustamento no pré-processamento dos dados foi realizado por meio do método dos mínimos quadrados (MMQ), considerando as acurácias nominais do equipamento, sendo elas a acurácia/exatidão linear de 1,2mm+10ppm,

acurácia/exatidão angular de 8" e a acurácia/exatidão do modelo 3D de 3 mm a 50 metros, e 6 milímetros a 100 metros. O pré-processamento dos dados proporcionou a união das nuvens correspondentes aos 5 giros e a filtragem dos pontos.

FIGURA 8 – LASER SCANNER LEICA SCANSTATION P40 E SEU POSICIONAMENTO EM CAMPO PARA A COLETA DE DADOS



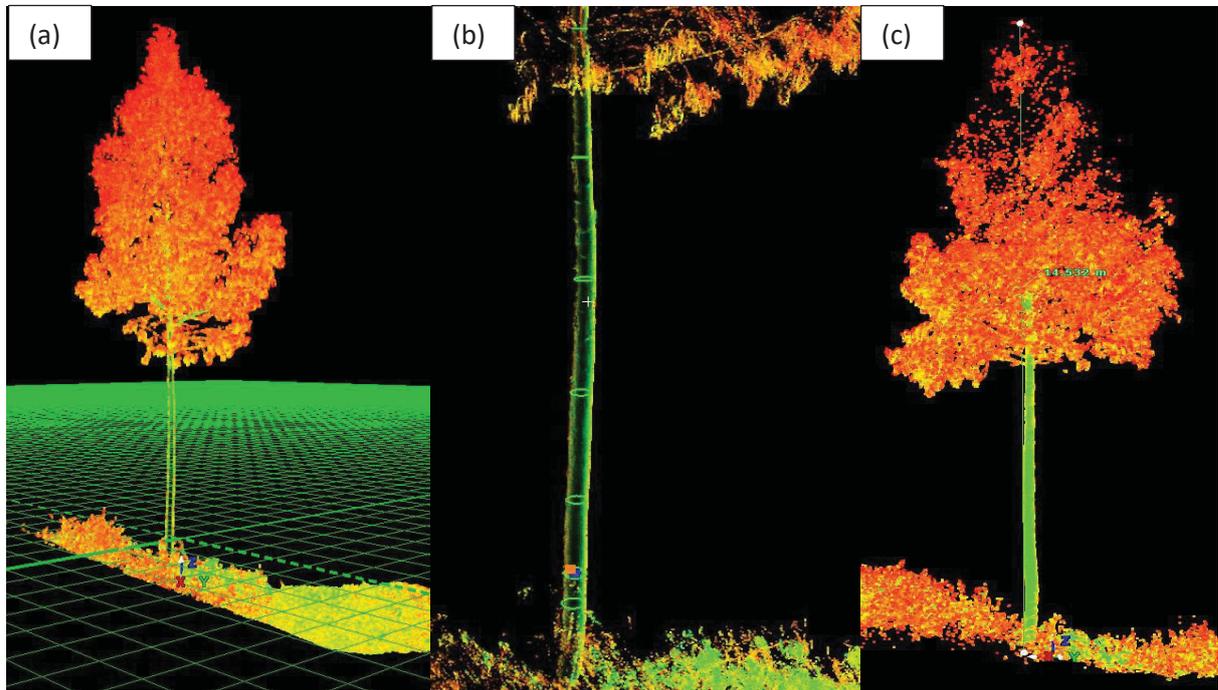
FONTE: A autora (2018).

a) demonstração do TLS coletando os dados na área de estudo; b) posicionamento dos 5 giros na área de estudo, com menor densidade de pontos nas áreas mais afastadas do equipamento

No processamento foi realizada a extração das métricas de diâmetros e altura total (h) por varredura simples, ou seja, foram extraídas as métricas de cada nuvem individualmente, com extração vetorial da informação sobre um plano de corte, que é perpendicular ao eixo Z, que por sua vez foi estabelecido por um compensador em dois eixos. As métricas foram extraídas manualmente, realizadas de acordo com as etapas que seguem: 1) individualização do objeto de interesse considerando altura zero na base da árvore; 2) elevação do plano de corte à altura de 1,30 m, 2m, 4 m e 6 m e criação da circunferência com posterior extração da métrica diâmetro (FIGURA 9a e 9b); 3) medição da distância entre o ponto mais alto e mais baixo de cada árvore para obtenção da altura total (FIGURA 9c).

O método utilizado para a extração dos diâmetros é chamado de *simple circle fitting method*, em que foi realizado um corte (sem espessura) no plano de interesse (1,30 m, 2m, 4 m e 6 m) com posterior criação da circunferência sobre os pontos correspondentes ao fuste. Esse método é descrito por Bu e Wang (2016) e foi utilizado por Calders et al. (2015) e por Bienert et al. (2006). O *software* utilizado para o processamento foi o Cyclone 9.2.1.

FIGURA 9 – DEMONSTRAÇÃO DAS ETAPAS DO PROCESSAMENTO PARA EXTRAÇÃO DAS MÉTRICAS DE DIÂMETROS E h OBTIDOS POR TLS PARA *EUCALYPTUS BENTHAMII* LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI – PINHAIS.



FONTE: A autora (2018).

a) individualização da árvore; b) plano de corte a diferentes alturas e extração dos diâmetros; c) extração da altura

3.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS

3.4.1 Estimativa do volume individual

O cálculo do volume individual foi realizado com a equação de Schumacher-Hall ajustada por Figueiredo et al. (2014) apresentada na equação 1. Essa equação foi desenvolvida para um povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden, localizado em Telêmaco Borba – PR e obteve coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj.) de 0,989 e erro padrão da estimativa em porcentagem ($Syx\%$) de 8,26%.

$$\ln v = 0,000018 + 1,77298 * \ln dap + 1,37336 * \ln h \quad (1)$$

onde:

\ln = logaritmo neperiano;
 v = volume (m^3);
 dap = diâmetro à 1,30 m de altura (cm);
 h = altura total (m).

3.4.2 Estimativa da Biomassa Seca (BS) Individual

Para a estimativa da biomassa seca acima do solo individual, foi realizado o ajuste de uma equação. Para tanto, foram utilizadas 22 árvores quantificadas diretamente pela equipe do projeto NITA e 24 árvores quantificadas diretamente pela equipe do BIOFIX (Centro de Excelência em Pesquisa sobre Fixação de Carbono na Biomassa).

As 22 árvores que foram abatidas e quantificadas as BS individual pela equipe do NITA foram oriundas de um desbaste empregado na área. Esse desbaste foi realizado para promover abertura no sistema iLF proporcionando melhoria e luminosidade para a lavoura integrada com os plantios. Durante o processo de desbaste foi realizada a quantificação de biomassa seca acima do solo em 11 árvores do sistema convencional e em 11 árvores do sistema iLF, totalizando 22 indivíduos com 5 anos de idade, que tiveram seus componentes divididos em: folhas, galhos finos, galhos grossos e fuste, com o peso fresco medido em campo.

Os dados provenientes das 24 árvores quantificadas pela equipe do BIOFIX correspondiam as espécies *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden (6 indivíduos), *Eucalyptus saligna* Smith (7 indivíduos) e *Eucalyptus dunnii* (11 indivíduos), com idades variando entre 8 e 20 anos localizados nos municípios de São Nicolau, Barra Mansa e Caeté.

Na TABELA 3 estão apresentadas as estatísticas descritivas das variáveis: dap, altura total e biomassa seca acima do solo (BS) das árvores amostradas provenientes do desbaste no projeto NITA e do banco de dados do BIOFIX.

De posse dessas 46 árvores, procedeu-se o ajuste de 5 modelos para estimativa da variável dependente biomassa seca acima do solo individual utilizando como variáveis independentes o dap, a altura total e suas combinações. Os modelos testados estão apresentados na TABELA 4.

TABELA 3 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS dap, h E BS DAS 46 ÁRVORES DE ESPÉCIES DE *EUCALYPTUS* UTILIZADAS NA MODELAGEM DE BIOMASSA SECA ACIMA DO SOLO

	dap (cm)	h (m)	BS (kg)
Média	18,65	25,32	217,78
Erro padrão	0,87	1,37	31,02
Mediana	17,96	23,60	161,05
Desvio padrão	5,91	9,29	210,38
Variância	34,94	86,35	44258,90
CV (%)	31,69	36,70	96,60
Mínimo	7,00	10,90	14,45
Máximo	34,06	43,60	949,47

dap = diâmetro à 1,30m de altura (cm); h = altura total (m); BS = biomassa seca individual acima do solo (kg); CV (%) = coeficiente de variação em porcentagem.

TABELA 4 – MODELOS UTILIZADOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO DE *EUCALYPTUS*

Modelo	Modelo em sua forma linear	Autor
1	$BS = \beta_0 + \beta_1 * (dap^2 * h)$	Spurr
2	$\ln BS = \beta_0 + \beta_1 * \ln (dap * h)$	-
3	$\ln BS = \beta_0 + \beta_1 * \ln dap^2$	-
4	$BS = \beta_0 + \beta_1 * h + \beta_2 * dap^2 + \beta_3 * (dap^2 * h)$	Stoate
5	$BS = \beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 * dap^2 + \beta_3 * dap * h + \beta_4 * (d^2 * h) + \beta_5 * h$	Meyer

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ = coeficientes dos modelos; ln = logaritmo neperiano; BS = biomassa seca individual acima do solo (kg); dap = diâmetro à 1,30m de altura (cm); h = altura total (m).

Para avaliação da qualidade dos modelos ajustados para estimativa de biomassa seca acima do solo, foram utilizados alguns critérios estatísticos. O coeficiente de determinação ajustado (equação 2), varia de 0 a 1 e indica o nível de explicação que as variáveis independentes de um modelo oferecem para esclarecer as variações ocorrida na variável dependente (SILVA et al., 2008).

$$R^2_{aj.} = 1 - \left[(1 - R^2) \frac{(n-1)}{(n-p-1)} \right] \quad (2)$$

onde:

R^2 = coeficiente de determinação;
 $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado;
 n = número de observações;
 p = número de coeficientes.

O erro padrão da estimativa, absoluto e em porcentagem, é apresentado nas equações 3 e 4 e informam, em média, o quanto o valor estimado está próximo ao observado.

$$Syx = \sqrt{\frac{SQres}{n-p}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \quad (3)$$

$$Syx\% = \frac{Syx}{\bar{y}} * 100 \quad (4)$$

onde:

Syx = erro padrão da estimativa absoluto;
 SQres = soma dos quadrados dos resíduos;
 y_i = BS observada, por indivíduo, em kg;
 \hat{y}_i = BS estimada, por indivíduo, em kg;
 n = número de observações;
 p = número de coeficientes;
 \bar{y} = média da BS, em kg.

Para eliminar a discrepância logarítmica, os valores estimados pelas equações logaritmizadas foram corrigidos através da multiplicação do BS estimada de cada árvore pelo Fator de Meyer (equação 5). Para as modelos logarítmicos 2 e 3 (TABELA 4) o Syx e o R^2 aj. foram recalculados para unidades aritméticas.

$$FM = e^{0,5 * Syx^2} \quad (5)$$

onde:

FM = fator de correção de Meyer
 Syx = erro padrão da estimativa absoluto.

O último critério utilizado para análise do desempenho das equações foi a análise gráfica dos resíduos (em porcentagem) em função da variável de interesse (peso). O valor de cada resíduo, foi calculado a partir da equação 6:

$$resíduo \% = \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{y_i} * 100 \quad (6)$$

onde:

y_i = BS observada, por indivíduo, em kg;
 \hat{y}_i = BS estimada, por indivíduo, em kg.

Após a avaliação dos critérios estatísticos e da análise gráfica dos resíduos foi escolhido o modelo que apresentou os melhores resultados para estimar a biomassa seca acima do solo para os indivíduos que tiveram as métricas obtidas pelo inventário tradicional e extraídas pelo TLS para o sistema de plantio convencional e para o sistema iLF.

3.4.3 Análise estatística das métricas dap, h, v e BS

Após a extração das métricas da nuvem TLS e, da geração das estimativas da BS e do volume, as mesmas foram comparadas com as mensurações provenientes do inventário tradicional, por meio de análise multivariada no MATLAB R2018b. Mallo (1985) define a análise multivariada como um ramo da estatística que estuda, elabora e interpreta material estatístico sobre a base de um conjunto de variáveis que podem ser qualitativos, quantitativos ou ainda uma união entre os dois tipos. Esse tipo de análise consiste na avaliação simultânea de mais do que duas variáveis, assim atua com as múltiplas variáveis estatísticas, não se limitando ao número de variáveis ou observações (HAIR JUNIOR et al., 2009).

Como primeira análise, avaliou-se a não diferença estatística entre os valores das variáveis: dap, altura total, volume e BS, obtidos pelo inventário florestal tradicional (campo) em comparação as métricas extraídas pelo TLS, para o sistema convencional e para o sistema iLF. Para tanto, foi realizado uma inferência acerca dos vetores de média pareados, por meio do teste T^2 de Hotelling (JOHNSON e WICHERM, 1998) (equação 7), sendo esse teste análogo ao teste *t-student* para amostras pareadas utilizado em análises univariadas.

$$T^2 = n (\underline{\bar{D}} - \underline{\delta})' S_d^{-1} (\underline{\bar{D}} - \underline{\delta}) \quad (7)$$

onde:

$T^2 = T^2$ de Hotelling

$$\underline{\bar{D}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \underline{D}_j,$$

$$d_{1j} = X_{11j} - X_{21j}$$

$$d_{2j} = X_{12j} - X_{22j}$$

⋮

$$d_{pj} = X_{1pj} - X_{2pj}$$

$$\underline{D}'_j = [\underline{d}_1 \quad \underline{d}_2 \quad \cdots \quad \underline{d}_p]$$

$$S_d = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\underline{D}_j - \underline{\bar{D}})(\underline{D}_j - \underline{\bar{D}})'$$

$n = \text{número de amostras}$

O resultado a uma probabilidade de 99% foi comparado com a distribuição de $F_{p,n-p}(\alpha)$ (equação 8).

$$T^2 \geq \frac{(n-1)p}{n-p} F_{p,n-p}(\alpha) \quad (8)$$

3.4.4 Análise estatística para as métricas de diâmetros a diferentes alturas

Na segunda análise estatística, foram comparados os valores das métricas de diâmetros a diferentes alturas obtidos pela cubagem parcial em campo mensurados com o Criterion RD1000 com as métricas extraídas pelo TLS. Como as mensurações com o Criterion aconteceram em ocasião diferente do restante da coleta de dados, estes se tratam de amostras independentes, ou seja, as árvores medidas com o Criterion podem não ser as mesmas que tiveram suas métricas extraídas com o TLS. Os diâmetros nas alturas de 1,3 m, 2 m, 4 m e 6 m foram utilizados nas análises, para os dois sistemas. A ferramenta utilizada na análise foi o *Profile Analysis*, esse procedimento pode ser utilizado quando as observações em um mesmo elemento são correlacionadas (dados de cubagem) e a variável mensurada é tomada na mesma escala de medida. Essa análise de perfil é baseada em três hipóteses. A primeira avalia se os grupos são paralelos entre os pontos de observações. Para tanto é realizada a comparação dos dois perfis sob a hipótese do paralelismo, definido por meio das inclinações (FIGURA 10) e expresso pela equação 9. O teste de T^2 foi calculado pela equação 10.

$$H_{01}: C\mu_1 = C\mu_2 \quad (9)$$

$$T^2 = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} (\bar{y}_1 - \bar{y}_2)' C' [CS_{pl} C']^{-1} C (\bar{y}_1 - \bar{y}_2) \quad (10)$$

onde:

$n_1 = \text{numero de observações com o TLS}$

$n_2 = \text{número de observações com o criterion}$

$\bar{y}_1 = \text{média obtida com o TLS}$

$\bar{y}_2 = \text{média obtida com o criterion}$

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

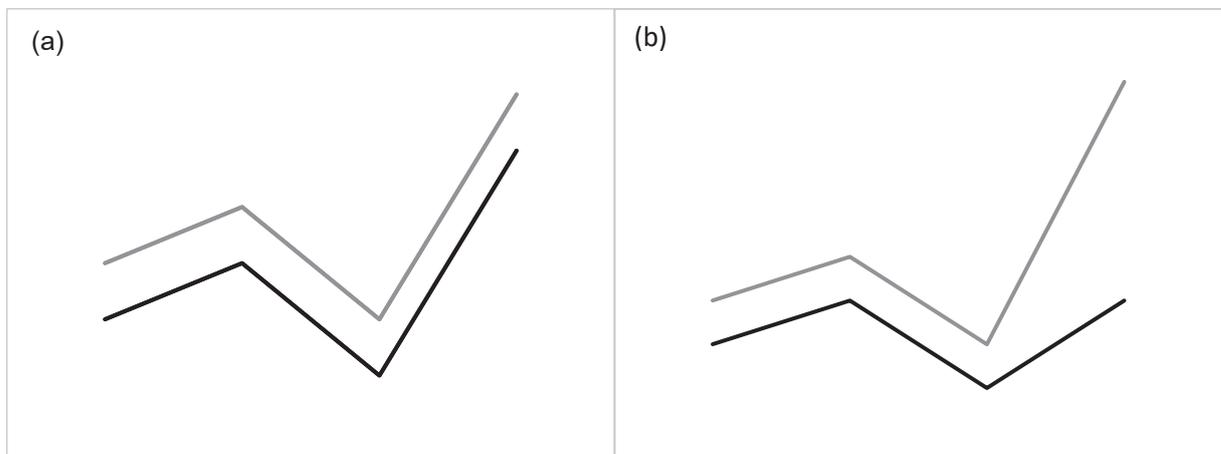
$$S_{pl} = \frac{1}{n_1 + n_2 - 2} (W_1 + W_2)$$

$$W_1 = (n_1 - 1) S_1$$

$$W_2 = (n_2 - 1) S_2$$

$$S = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})'$$

FIGURA 10 – PRIMEIRA HIPÓTESE EMPREGADA NO *PROFILE ANALYSIS*, AVALIANDO O PARALELISMO ENTRE OS PONTOS DE OBSERVAÇÕES



FONTE: A autora (2018) adaptado de RENCHER (2002).

a) a hipótese é verdadeira; b) a hipótese é falsa

Os dois perfis são paralelos se as duas inclinações de cada segmento forem as mesmas (FIGURA 10a). Caso a hipótese H_{01} seja rejeitada poder ser calculado qual variável mais contribuiu para o não paralelismo entre as curvas com a equação 11.

$$a = (CS_{pl}C')^{-1}C(\bar{y}_1 - \bar{y}_2) \quad (11)$$

A segunda hipótese avalia se os grupos são coincidentes em pontos de observações (FIGURA 11), é expressa pela equação 12. O teste de t pode ser calculado pela equação 13.

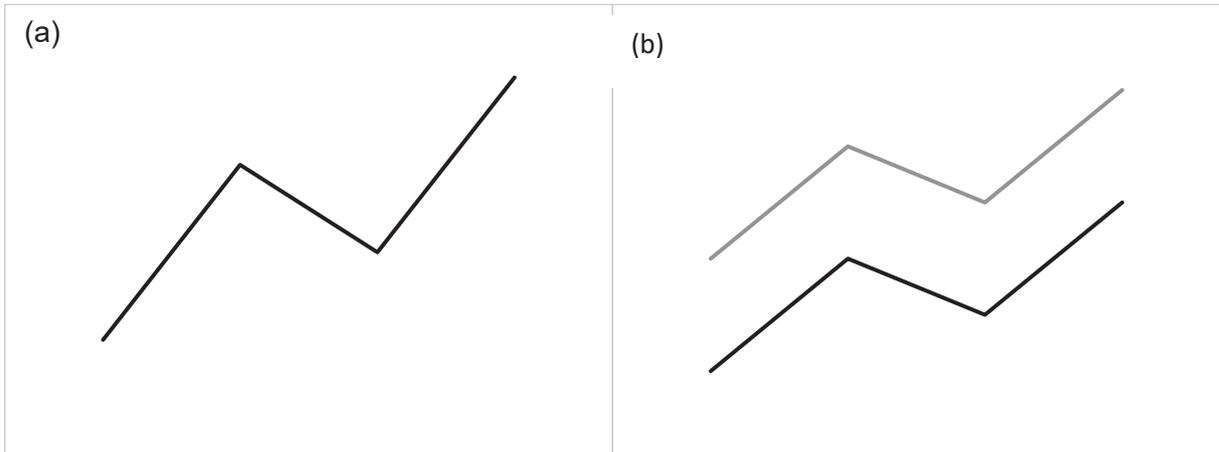
$$H_{02}: j'\mu_1 = j'\mu_2 \quad (12)$$

$$t = \frac{j'(\bar{y}_1 - \bar{y}_2)}{\sqrt{j'S_{pl}j\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad (13)$$

onde:

$$j = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

FIGURA 11 – SEGUNDA HIPÓTESE EMPREGADA NO *PROFILE ANALYSIS*, AVALIANDO A COINCIDÊNCIA ENTRE OS PONTOS DE OBSERVAÇÕES



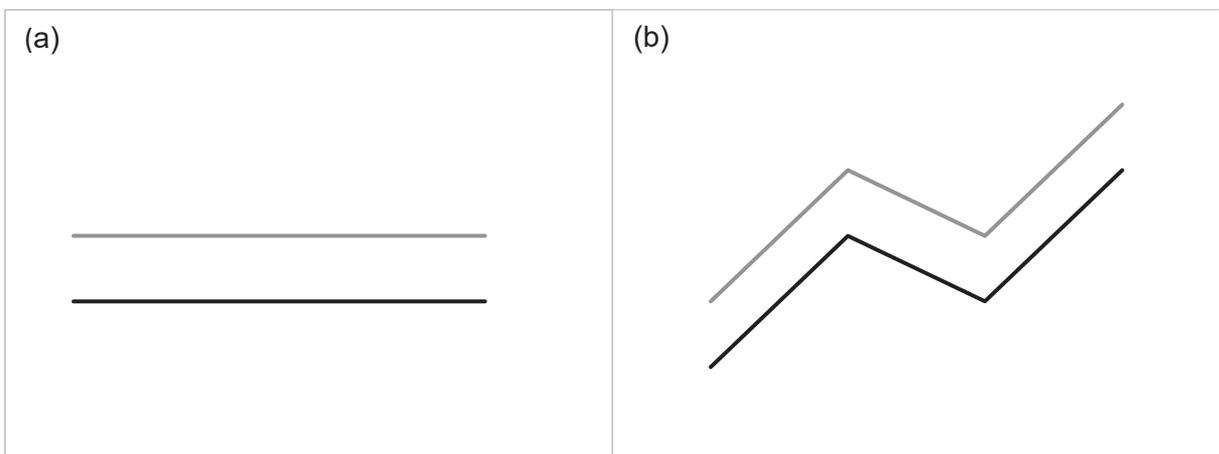
FONTE: A autora (2018) adaptado de RENCHER (2002).
a) a hipótese é verdadeira; b) a hipótese é falsa

A terceira hipótese avalia se os perfis são paralelos ao eixo das abscissas ao longo dos pontos de observações (FIGURA 12), e para testar essa hipótese foi realizado o cálculo conforme equação 14. Posteriormente foi calculado o valor de T^2 conforme equação 15.

$$H_{03}: \frac{1}{2} C (\mu_1 + \mu_2) = 0 \quad (14)$$

$$T^2 = (n_1 + n_2)(C\bar{y})' (CS_{pl}C')^{-1}C\bar{y} \quad (15)$$

FIGURA 12 – TERCEIRA HIPÓTESE EMPREGADA NO *PROFILE ANALYSIS*, AVALIANDO SE OS PERFIS SÃO PARALELOS AO EIXO DAS ABICISSAS AO LONGO DOS PONTOS DE OBSERVAÇÕES



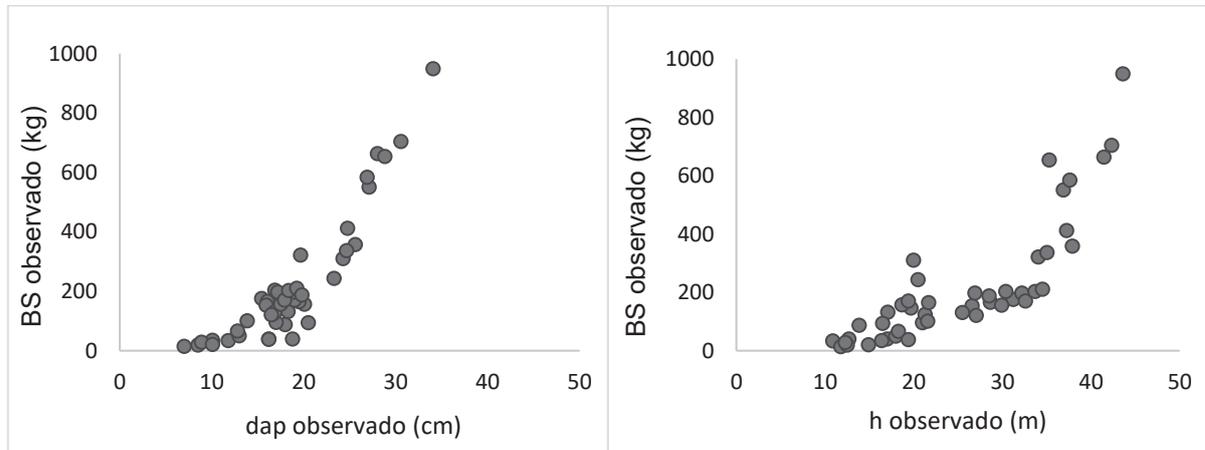
FONTE: A autora (2018) adaptado de RENCHER (2002).
b) a hipótese é verdadeira; b) a hipótese é falsa

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO PARA ESTIMATIVA DE BS INDIVIDUAL

A relação entre as variáveis dap (cm) com a biomassa seca acima do solo (BS em kg), bem como da altura total (m) com a BS (kg), provenientes dos dados disponibilizados pelo projeto NITA e pelo BIOFIX estão demonstradas na FIGURA 13. É possível observar os valores crescentes para a variável biomassa seca acima do solo individual com o aumento das métricas das variáveis dap e altura, relação essa já conhecida. A relação entre o dap e a BS apresentam uma curva com inclinação mais acentuada quando comparada com a curva da relação entre a altura e a BS em que possui uma inclinação suave nas menores alturas, passando a ser acentuada somente nas alturas superiores a 35 metros.

FIGURA 13 – RELAÇÃO ENTRE A BIOMASSA SECA ACIMA DO SOLO E AS VARIÁVEIS dap E h DOS DADOS DE *EUCALYPTUS* PROVENIENTES DO PROJETO NITA E DO BANCO DE DADOS DO BIOFIX



FONTE: A autora (2018).

Essa relação apresentada é esperada em uma base de dados homogêneas, pois a biomassa seca acima do solo é fortemente correlacionada com o dap (TABELA 5), portanto, pequenos aumentos no dap geram aumentos relevantes na biomassa seca acima do solo (HIGUCHI et al., 1998; CROW; SCHLAEGEL, 1988). Por existir uma forte correlação também entre as variáveis dap e h é que as curvas acima apresentadas possuem tendências semelhantes.

Está apresentada na TABELA 5 as correlações entre as variáveis, justificando o uso do dap e da altura total como variáveis independentes nos modelos para ajuste de equações na estimativa da variável dependente biomassa seca individual acima do solo (BS). Modelos para estimativa de biomassa seca acima do solo individual com a variável dap e altura total foram demonstrados e explicados por Spurr, 1952; Veiga, 1981; Crow e Schalaegel, 1988; Santos, 1996 e Higuchi, 1998. Recentemente trabalhos envolvendo as variáveis dap e altura total na modelagem de BS foram desenvolvidos por Abreu et al. (2016) para a espécie *Anadenanthera colubrina* var. Cebil (GRISEB), por Sanquetta et al. (2014a) para a espécie *Acacia mearnsii* de Wild, e por Vieira et al. (2015) para o híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*, demonstrando boas correlações entre as variáveis dependentes e a variável independente.

TABELA 5 – CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS INDEPENDENTES (dap E h) E DEPENDENTE (BS) UTILIZADAS NOS MODELOS PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA SECA INDIVIDUAL ACIMA DO SOLO PARA *EUCALYPTUS*

	dap (cm)	h (m)	BS (kg)
dap (cm)	1,00		
h (m)	0,76**	1,00	
BS (kg)	0,89**	0,82**	1,00

dap = diâmetro à 1,30m de altura (cm); h = altura total (m); BS = biomassa seca individual acima do solo (kg); **significativos ao nível de 99% de probabilidade

Os coeficientes resultantes dos ajustes dos 5 modelos, assim como as respectivas estatísticas de ajuste para a estimativa de biomassa seca acima do solo obtidas são apresentadas na TABELA 6. O modelo logaritmo 3 apresentou os piores resultados, com menor valor para o R^2 aj. e o maior valor para o Syx absoluto e relativo (Syx %). Os modelos 1 e 4 apresentaram valores muito próximos para as três estatísticas de ajuste empregadas.

TABELA 6 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DO AJUSTE DE EQUAÇÕES PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA SECA ACIMA DO SOLO PARA PLANTIOS DE *EUCALYPTUS*

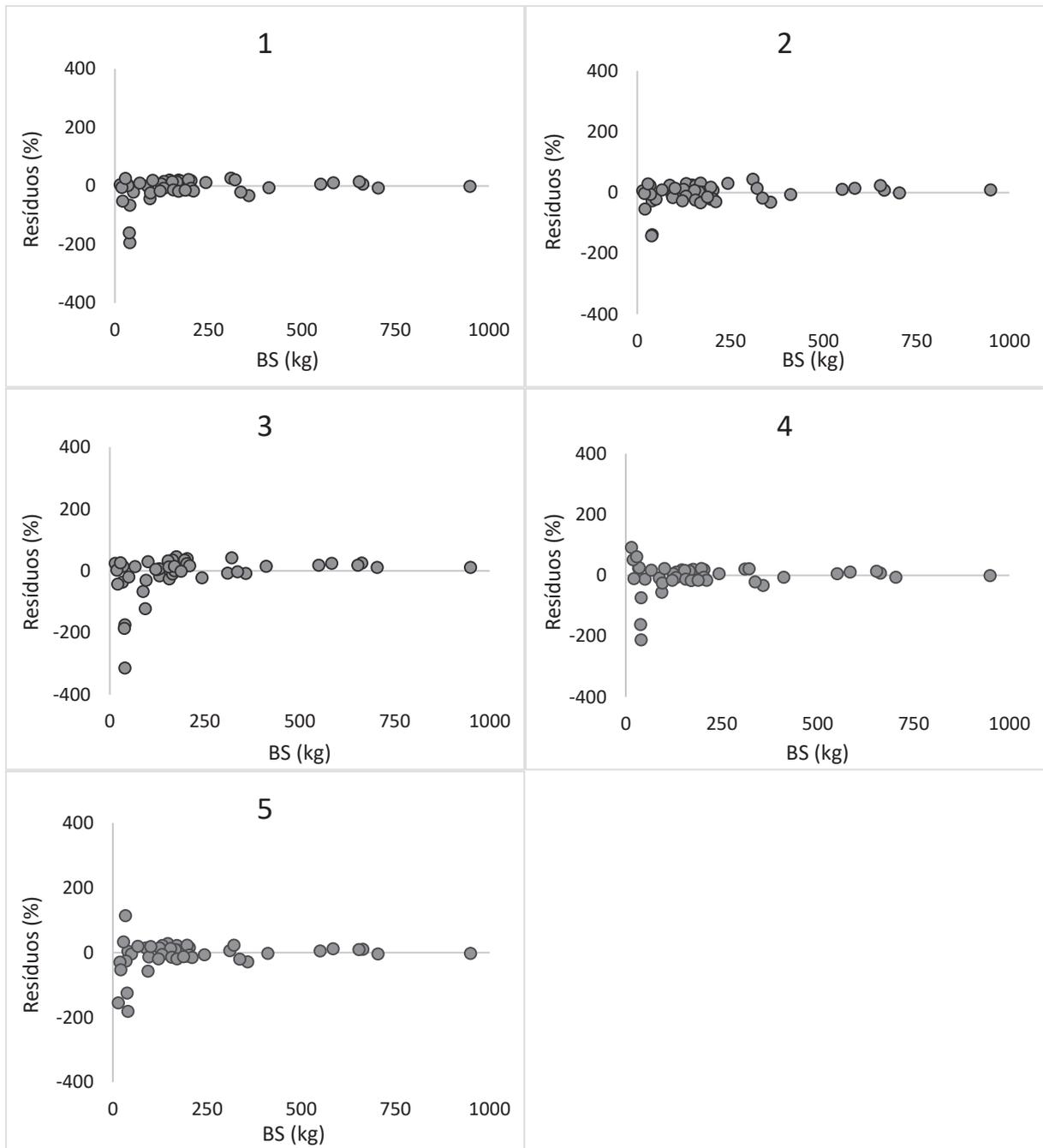
Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R ² aj	Syx (kg)	Syx (%)
1	2,8212	0,019					0,961	41,67	19,1
2	-3,7447	1,438					0,942	49,17	22,6
3	-2,9637	1,375					0,923	57,00	26,2
4	-16,927	0,287	0,104	0,016			0,960	42,11	19,3
5	82,8746	-31,473	1,427	-0,335	0,0065	10,867	0,964	39,72	18,2

β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , e β_5 = coeficientes ajustados para os modelos; R²aj = coeficiente de determinação ajustado; Syx = Erro padrão da estimativa em kg; Syx (%) = Erro Padrão da estimativa em porcentagem

As distribuições dos resíduos em porcentagem para os 5 modelos testados estão demonstradas na FIGURA 14. O modelo 3 apresenta tendenciosidade na linha estimativa dos resíduos, demonstrando as maiores dispersões para a estimativa de BS. De uma maneira geral, todos os modelos testados apresentaram dificuldades em modelar a BS para indivíduos de menor porte, ou seja, apresentaram maiores dispersões no início da linha estimativa.

O ajuste do modelo 5, $BS = 82,8756 - 31,473 * dap + 1,427 * dap^2 - 0,335 * (dap * h) + 0,0065 * (dap^2 * h) + 10,867 * h$, foi o que apresentou os melhores resultados, com o maior R²aj. e o menor erro absoluto (Syx) e em porcentagem (Syx %). Porém ao analisar o gráfico de resíduos, o modelo 2, apresenta a melhor distribuição no início da linha estimativa, onde se encontram árvores com menores valores para as métricas dap e h e, portanto, com menores valores de métricas de BS. Como os dados utilizados nesse trabalho são de indivíduos com apenas 4 anos de idade, indicando árvores de menores dimensões diante dos indivíduos utilizados no ajuste do modelo, a equação 2 ($\ln BS = -3,7447 + 1,438 * \ln (dap * h)$), é a mais adequada para a estimativa da BS para os dados em questão.

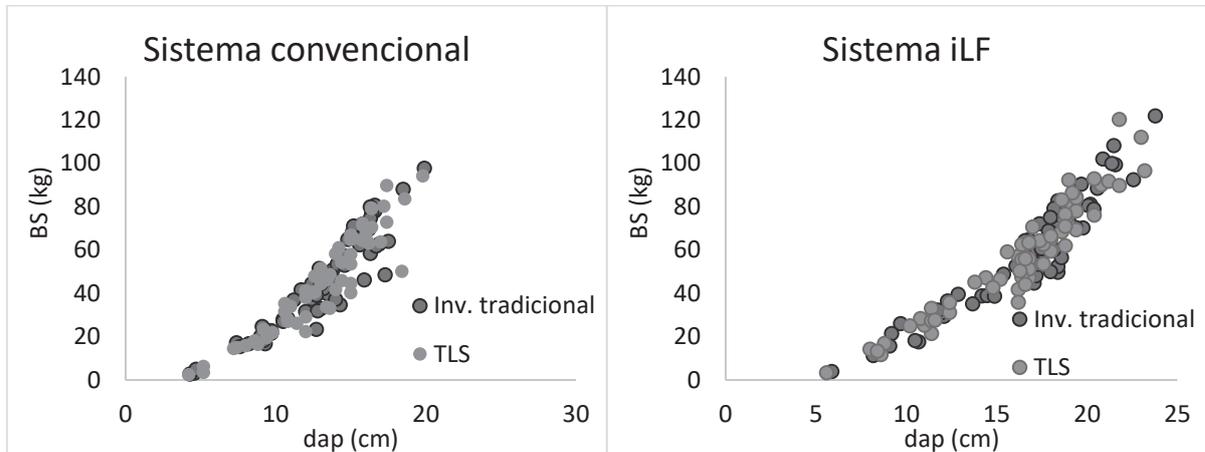
FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS OBTIDOS A PARTIR DE EQUAÇÕES UTILIZADAS NA ESTIMATIVA DE BIOMASSA SECA ACIMA DO SOLO EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS*



FONTE: A autora (2018).

Após a aplicação da equação 2 para a estimativa de BS por meio das variáveis dap e altura total obtidas pelo inventário tradicional e pelo TLS, foram elaboradas figuras para demonstrar a relação entre a métrica dap e a BS estimada para o sistema convencional e para o sistema iLF (FIGURA 15).

FIGURA 15 – RELAÇÃO ENTRE A MÉTRICA DAP OBTIDA PELO INVENTÁRIO TRADICIONAL E PELO TLS COM A BS ESTIMADA PARA O SISTEMA CONVENCIONAL E PARA O SISTEMA iLF EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS BENTHAMII* LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI – PINHAIS



FONTE: A autora (2018).

É possível observar tendência semelhante entre as formas de obtenção dos dados para os dois sistemas analisados. Para o sistema iLF, é possível observar maiores valores individuais estimados de BS, porém como esse sistema possui maiores valores para as métricas da variável independente dap quando comparado ao sistema convencional, esse resultado já era esperado. Na FIGURA 15 também é possível observar que a equação escolhida para estimativa da BS foi satisfatória, pois não apresentou nenhuma tendência incompatível com o esperado.

4.2 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS

Na FIGURA 16 está apresentada a relação e a correlação das métricas das variáveis obtidas pelo inventário tradicional com as métricas das variáveis obtidas pelo TLS, para o sistema convencional e para o sistema iLF.

Para as métricas da variável dap no sistema convencional percebe-se uma relação linear, com uma correlação de 0,99 entre os dois métodos de obtenção. Os maiores valores ficaram próximos dos 20 cm. Para o sistema iLF a relação também foi linear, porém a correlação foi um pouco menor com valor de 0,96. Os maiores valores de dap estão próximos dos 25 cm e ocorreu também uma maior variabilidade entre os valores dessa variável para o sistema iLF, fato que pode ser explicado pelo maior espaçamento fornecido por esse tipo de sistema e pela influência que a densidade de plantio tem sobre o crescimento dessa variável. Com o maior

espaçamento fornecido para essas plantas a forma das árvores tende a ser menos cilíndrica, e pode não ter sido abrangida pelo *simple circle fitting method* utilizado na extração dos dados obtidos com o TLS nesse trabalho. Pode-se perceber que entre as variáveis avaliadas, o dap foi a que apresentou menor variação em relação ao inventário florestal tradicional e as métricas obtidas com o TLS.

Para as métricas da variável altura no sistema convencional a dispersão dos dados foi a maior entre todas as variáveis, com correlação de apenas de 0,53. A dificuldade para medição da variável altura de uma árvore pertencente a um povoamento, sempre foi conhecida no meio florestal (FIGUEIREDO FILHO, 1983) e o resultado acima pode ser justificado pela dificuldade de visualização da base e do ápice dos indivíduos desse sistema com o clinômetro; pela dificuldade de encontrar o ponto mais baixo de cada árvore (altura zero) na extração dos dados obtidos com o TLS; ou ainda pode ter influência da declividade presente na área de estudo. Buck (2016) em seu trabalho também para povoamentos de *Eucalyptus* com 4 anos de idade, realizou a extração da variável altura pelo método automático e semiautomático. No método automático, a correlação foi praticamente inexistente, apresentando um valor de R^2 de 0,053, para a validação cruzada, enquanto que pelo método semiautomático o R^2 foi de 0,84 para a validação cruzada, ressaltando bons resultados para o método que inclui a determinação do ápice da árvore de forma manual.

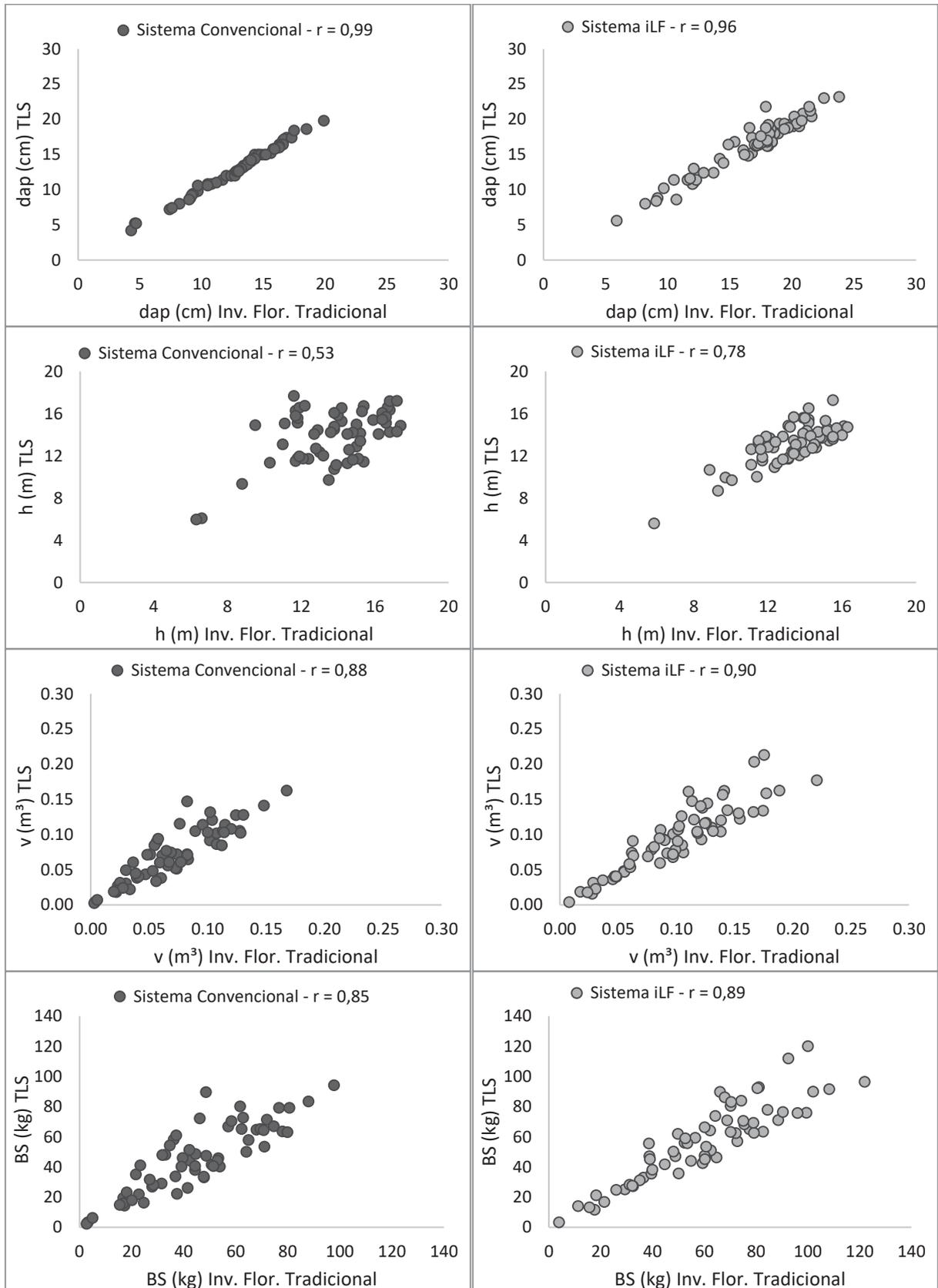
Para o sistema iLF a correlação da métrica altura entre os métodos de obtenção foi um pouco maior, quando comparado ao sistema convencional, atingindo o valor de 0,78. A menor dispersão encontrada no sistema iLF, pode ser justificada pela facilidade na medição com o clinômetro durante o inventário florestal tradicional e também com a extração das métricas de altura total pelo TLS quando comparado ao sistema convencional. A melhor visualização da base e do ápice das árvores diminui a ocorrência de erros de medição, mesmo que sejam em centímetros, resultando em uma maior correlação e menor dispersão entre os métodos de obtenção.

Para o sistema convencional e para o sistema iLF com 4 anos de idade, os maiores valores encontrados para a métrica altura são semelhantes, demonstrando haver pouca diferença de crescimento para essa variável entre os sistemas. Apesar do sistema iLF proporcionar um maior espaço para o desenvolvimento das árvores, esse resultado comprova que a variável altura sofre pouca interferência da densidade

inicial de plantio, conforme abordado por STAGE (1975), e apresentado também por CRECHI (1996). Essa condição pode mudar com o aumento da idade e com a ocorrência de competição por luz, e com isso a árvore se desenvolver em altura, alterando o resultado de suas métricas. Resultados diferentes foram encontrados por Oliveira et al. (2015) em que ao avaliarem um sistema iLPF e um sistema convencional com *Eucalyptus*, constataram que a altura total média observada no sistema iLPF foi superior a altura total média observada no sistema convencional. Porém nesse mesmo trabalho as variáveis foram observadas aos 13, 18 e 25 meses e a diferença de altura média total entre os sistemas foi diminuindo conforme o aumento da idade, sugerindo que talvez ao atingirem 4 anos de idade também não encontrem diferenças para o crescimento da métrica altura entre os sistemas.

Para a relação dos valores da variável estimada volume, no sistema convencional, a correlação entre os valores obtidos pelo inventário tradicional e pelo TLS foi de 0,88. Como a variável volume foi estimada com base nos valores de dap e h, apresentou um comportamento semelhante com a relação para as métricas das variáveis dap. No sistema iLF, a métrica do volume apresentou uma correlação um pouco maior que no sistema convencional, devido a variável altura já ter apresentado uma maior correlação e menor dispersão para esse sistema e ser utilizada em sua estimativa. O mesmo ocorreu para as métricas da variável BS estimada, que apresentou uma maior correlação para o sistema iLF e maior dispersão para o sistema convencional.

FIGURA 16 - RELAÇÃO ENTRE AS MÉTRICAS DAS VARIÁVEIS OBTIDAS PELO INVENTÁRIO TRADICIONAL E PELO TLS PARA OS SISTEMAS DE PLANTIO CONVENCIONAL E iLF DE *EUCALYPTUS BENTHAMII* LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI - PINHAIS



Fonte: A autora (2018).

Em síntese, o sistema iLF apresentou maiores valores para as métricas de dap, resultando então em maiores valores estimados para as métricas de volume e BS quando comparado ao sistema convencional. A métrica da variável altura como comentado anteriormente apresentou pequenas diferenças entre os sistemas.

Na TABELA 7 estão apresentados os resultados obtidos pela estatística descritiva para as métricas das variáveis dap, altura total, volume e BS obtidas pelo inventário tradicional e pelo TLS para o sistema convencional e para o sistema iLF.

TABELA 7 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS VARIÁVEIS: dap, h, v E BS OBTIDAS PELO INVENTÁRIO TRADICIONAL E PELO TLS PARA O SISTEMA CONVENCIONAL E PARA O SISTEMA iLF LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI – PINHAIS

	Sistema Convencional							
	dap (cm)	dap (cm)	h (m)	h (m)	v (m ³)	v (m ³)	BS (kg)	BS (kg)
Média	13,08	13,10	13,9	13,88	0,073	0,072	45,38	46,14
Erro padrão	0,43	0,44	0,32	0,32	0,004	0,005	2,82	2,86
Mediana	13,5	13,40	14,38	14,31	0,071	0,071	44,38	45,86
Desvio padrão	3,38	3,41	2,47	2,50	0,037	0,038	22,02	22,31
Variância	11,45	11,64	6,08	6,26	0,001	0,001	484,75	497,94
CV (%)	25,83	26,04	17,96	18,01	53,11	52,77	48,51	48,63
Mínimo	4,3	4,20	6,30	5,97	0,003	0,003	2,72	2,44
Máximo	19,9	19,80	17,40	17,68	0,168	0,162	97,76	94,29

	Sistema iLF							
	dap (cm)	dap (cm)	h (m)	h (m)	v (m ³)	v (m ³)	BS (kg)	BS (kg)
Média	16,64	16,24	13,32	13,18	0,100	0,096	59,67	57,41
Erro padrão	0,45	0,51	0,24	0,25	0,006	0,006	3,19	3,29
Mediana	17,89	16,80	13,60	13,44	0,102	0,094	60,46	59,50
Desvio padrão	3,81	3,81	1,95	1,87	0,047	0,047	25,48	25,68
Variância	14,50	14,54	3,79	3,50	0,002	0,002	649,36	659,57
CV (%)	22,51	23,46	14,62	14,24	46,04	48,95	42,70	44,78
Mínimo	5,91	5,60	5,85	5,60	0,004	0,004	3,84	3,36
Máximo	23,80	23,20	16,30	17,29	0,223	0,213	121,94	120,26

 Métrica oriunda do Inventário florestal tradicional

 Métrica oriunda do TLS

dap = diâmetro individual à 1,30 m de altura em cm; h = altura total individual em m; v = volume individual com casca em m³; BS = biomassa seca individual acima do solo em kg; CV (%) = coeficiente de variação em porcentagem.

As variâncias resultaram em altos valores para a métrica BS, tanto para o sistema convencional quanto para o sistema iLF, porém ao analisar os coeficientes de variação em porcentagem (CV %) é possível perceber que foram menores que os

coeficientes de variação das métricas dos volumes. O coeficiente de variação envolve o erro padrão e a média em seus cálculos e são utilizados para comparar variáveis de diferentes naturezas e expressar a precisão dos dados, quanto menor seu valor, maior é a homogeneidade dos dados (PIMENTEL GOMES, 1985; GARCIA, 1989). Segundo a classificação de Pimentel Gomes (1985) os CV (%) desse trabalho, estão entre médios e muito altos, tanto para o sistema convencional quanto para o sistema iLF. Os maiores coeficientes de variação foram encontrados para a variável volume, sendo superiores à 50% no sistema convencional. Uma alternativa para reduzir esses valores poderia ser a cubagem rigorosa de algumas árvores, para assim obter o ajuste de uma equação própria para a área de estudo, estimando os valores dos demais indivíduos.

Para o sistema iLF todas as métricas obtidas pelo inventário tradicional foram ligeiramente superiores quando comparadas as métricas obtidas pelo TLS. Os coeficientes de variação, porém, não mantiveram um padrão ao comparar o método de obtenção das variáveis, apenas foram menores em todos os casos para o sistema iLF ao ser comparados com o sistema convencional. Esses valores diferiram dos encontrados na literatura, em que os valores obtidos pelo TLS superestimaram métricas dendrométricas. Almeida (2017) encontrou em seu trabalho uma superestimativa do dap pelo TLS para indivíduos de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. Silva (2011) ao utilizar o método de distância máxima observou uma superestimativa na obtenção da área transversal de indivíduos de *Pinus* spp., enquanto que Buck (2016) encontrou superestimativas para a altura e subestimativas do volume para as primeiras toras quando comparado ao método de Smalian para *Eucalyptus* spp.

Ao abordar somente a variável altura, seu menor coeficiente de variação encontrado no sistema iLF para os dois métodos de obtenção das métricas, pode estar associado ao maior espaçamento característico desse sistema de implantação, que possibilita uma melhor visualização do ápice e da base das árvores e por consequência diminui a possibilidade de ocorrência de erros durante a medição.

Com os dados das variáveis dap, altura total, volume estimado e BS estimada foi realizado uma inferência acerca dos vetores de média pareados e seus resultados são apresentados na TABELA 8. É possível verificar que tanto para o sistema convencional quanto para o sistema iLF, os valores de T^2 de Hotelling foram inferiores aos valores de F, indicando não haver diferença estatística entre as métricas obtidas pelo inventário tradicional e pelo TLS, ao nível de 99% de significância.

TABELA 8 – RESULTADO DA INFERÊNCIA DAS VARIÁVEIS MENSURADAS NO INVENTÁRIO TRADICIONAL E PELO TLS PARA *EUCALYPTUS BENTHAMII* LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI - PINHAIS

	F	T ² Hotelling
Sistema convencional	15,4419	7,2568 ^{ns}
Sistema iLF	15,3260	12,8319 ^{ns}

F = valor de F; ns = não significativo ao nível 1% de probabilidade.

Juntamente com o resultado do T² de Hotelling foi possível extrair da análise realizada no Matlab as matrizes de variância e covariância das diferenças e a matriz das diferenças médias. Nas equações 16 e 17, respectivamente, estão expressas a matriz de covariância das diferenças e a matriz das diferenças médias, entre os valores obtidos pelo inventário tradicional e pelo TLS para o sistema convencional.

$$\begin{bmatrix} 0,1063 & -0,0125 & 0,0005 & 0,2385 \\ -0,0125 & 5,6861 & 0,0412 & 27,2776 \\ 0,0005 & 0,0412 & 0,0003 & 0,2140 \\ 0,2385 & 27,2776 & 0,2140 & 140,3486 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} -0,0033 & -0,1485 & -0,0002 & -0,7567 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Nas equações 18 e 19, respectivamente, estão expressas a matriz de covariância das diferenças e a matriz das diferenças médias, entre os valores obtidos pelo inventário tradicional e pelo TLS para o sistema iLF.

$$\begin{bmatrix} 1,1049 & 0,2611 & 0,0145 & 7,4251 \\ 0,2611 & 1,6395 & 0,0205 & 12,3866 \\ 0,0145 & 0,0205 & 0,0004 & 0,2301 \\ 7,4251 & 12,3866 & 0,2301 & 131,323 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} 0,3866 & 0,1452 & 0,0046 & 2,5556 \end{bmatrix} \quad (19)$$

A matriz de covariância das diferenças não apresentou valores concisos para o sistema convencional ou iLF, enquanto que na matriz das diferenças médias, é possível observar os maiores valores para o sistema iLF, corroborando com o resultado do T^2 de Hotelling, que utiliza essas matrizes em seu cálculo e apresentou maior valor (12,8319) para sistema iLF. A métrica que teve maior contribuição na diferença das matrizes apresentadas para os dois sistemas foi a biomassa seca acima do solo, sendo possível observar os maiores valores apresentados.

As métricas para a variável dap não apresentaram diferenças estatísticas entre os métodos de obtenção inventário tradicional e TLS, tanto para o sistema convencional, quanto para o sistema iLF, portanto o método manual para extração dessa métrica se mostrou eficiente. Apesar de não apresentarem diferenças estatísticas significativas, a dissemelhança média foi de 0,03 cm para o sistema convencional e de 0,40 cm para o sistema TLS. Simonse (2003) utilizou um *laser* por diferença de fase, e desenvolveu um algoritmo para identificação de indivíduos e para extração de dap em seu trabalho, encontrando diferenças médias de 1,7 cm para o dap. A filtragem de troncos e sua modelagem também foi estudada por Almeida (2017), em que o algoritmo para modelagem do tronco obteve êxito até 50% da altura total das árvores. Bienert et al. (2006) utilizaram um procedimento muito semelhante ao utilizado nesse trabalho para a obtenção dos diâmetros a altura do peito e encontrou um erro médio de 1,5 cm.

O fato da maior dissemelhança média entre o dap ser proveniente do resultado do sistema iLF pode ser explicado pelo espaçamento (densidade) inicial de plantio. Nesse sistema cada árvore possui área média de espaçamento de 28 m², ou seja, a competição por espaço entre as árvores é mínima, resultando em uma maior conicidade (NOGUEIRA et al., 2008) e deformações do fuste. Esses fatores podem não ter sido completamente explicados pelo método de extração aplicado no TLS (*simple circle fitting method*), resultando em valores diferentes do inventário tradicional, que ao utilizar a fita métrica abrange todas as características métricas da circunferência do fuste.

As métricas da variável altura total obtidas pelo inventário tradicional e pelo TLS não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si, para os dois sistemas de implantação. Silva (2011) ao avaliar espécies de pinus com diferentes idades, encontrou que os métodos para obtenção da altura total também não apresentaram diferenças significativas, apesar de que em seu trabalho as métricas

obtidas com o TLS foram maiores que as obtidas pelo hipsômetro Vertex III enquanto que nesse trabalho as métricas obtidas pelo inventário tradicional foram ligeiramente superiores as métricas obtidas pelo TLS.

Buck (2016) também realizou um trabalho com *Eucalyptus*, inclusive com idades próximas a idade de coleta desse povoamento, e empregou um método automático e outro semiautomático para extração das métricas de altura. Para o povoamento de 4 anos, com o método automático as alturas só conseguiram ser filtradas até 53% da altura total dos indivíduos, o autor associou que a influência de galhos e folhas das árvores e das copas vizinhas diminuíram a densidade de pontos no ápice da árvore, e que como esse filtro foi desenvolvido para aplicação em varreduras múltiplas, não obteve bons resultados para a varredura simples, que tem como característica um menor recobrimento da árvore. Com o método semiautomático, os resultados tiveram maior precisão com um R^2 de 0,84 para os indivíduos com 4 anos de idade.

Martins Neto et al. (2013) também encontraram dificuldades para obter a métrica de altura total em árvores pouco distantes do posicionamento do equipamento TLS em campo, devido a presença dos galhos na copa. Henning e Radtke (2006), Lingnau et al. (2009), Hopkinson (2004), Van Der Zande et al. (2006) e Gatzolis et al. (2010) também relataram problemas semelhantes a visualização da copa e dificuldades na obtenção das métricas de alturas totais.

Nesse trabalho não foi encontrado dificuldades para extração das métricas de altura total nos indivíduos, diferindo dos autores citados acima. O equipamento TLS utilizado em campo representou as árvores integralmente. Esse ganho pode estar associado a abertura angular vertical de 290° do equipamento e distância máxima de alcance de até 270m ou ainda pela facilidade na visualização das árvores, principalmente no sistema iLF. Porém é válido ponderar que na fase de coleta dos dados os dois sistemas possuíam 4 anos de idade, e que talvez para um povoamento próximo da idade de rotação (7 anos) o TLS utilizado não conseguisse recobrir com qualidade o ápice dos indivíduos em uma varredura simples.

Ainda, para o sistema iLF, essa dificuldade pode não ser encontrada mesmo que atinja idades avançadas, pois o espaçamento entre os indivíduos permite uma boa visualização de toda a árvore, e o crescimento em altura não a tornaria uma floresta fechada. A dificuldade encontrada mais comum seria a individualização das

árvores, principalmente pela agregação das copas, porém essa complexidade também seria encontrada no sistema convencional.

Durante a coleta de dados com o TLS, deve-se tomar cuidado com a velocidade e presença de vento, principalmente ao se tratar do sistema iLF que por ser menos denso, pode sofrer maior influência dessa variável climática. Buck (2016) ao extrair as métricas de altura total, percebeu que a partir de 50% da altura total da árvore, já ocorria a influência do vento na nuvem de pontos, ocasionando deslocamento de alguns elementos da árvore, sendo estas digitalizados em outras posições, e limitando a representatividade dos fustes. Dassot (2011) ainda afirma que o vento constitui o fator mais incomodo para o levantamento dos alvos e que as condições meteorológicas devem ser consideradas cuidadosamente para a obtenção de uma nuvem de pontos de qualidade.

Para complementar os resultados, foi realizado uma simulação de qual seria a alteração nos valores de volume e BS em porcentagem, caso a extração das métricas com o TLS fosse erroneamente maior em 1 cm para o dap (TABELA 9) e 1 m para a altura total (TABELA 10).

TABELA 9 – SIMULAÇÃO DA MUDANÇA EM % PARA O VOLUME (v) E BIOMASSA SECA ACIMA DO SOLO (BS) COM O AUMENTO DE 1 CM NAS CLASSES DE dap PARA O SISTEMA CONVENCIONAL E PARA O SISTEMA iLF

Sistema Convencional			Sistema iLF		
dap + 1 cm	% v	% BS	dap + 1 cm	% v	% BS
5,1 - 6	29,42	24,96	6,1 - 7	-25,54	20,22
7,1 - 8	19,36	16,49	9,1 - 10	6,44	14,63
9,1 - 10	16,66	14,67	10,1 - 11	12,76	13,51
10,1 - 11	15,89	12,67	11,1 - 12	7,71	12,19
11,1 - 12	14,39	12,18	12,1 - 13	11,74	11,07
12,1 - 13	13,44	11,21	13,1 - 14	11,32	10,63
13,1 - 14	12,15	10,32	14,1 - 15	10,61	9,66
14,1 - 15	11,61	9,80	15,1 - 16	9,90	9,16
15,1 - 16	11,51	9,26	16,1 - 17	10,20	8,68
16,1 - 17	9,87	8,58	17,1 - 18	10,19	8,11
17,1 - 18	9,55	8,14	18,1 - 19	9,50	7,66
18,1 - 19	8,66	7,74	19,1 - 20	9,39	7,35
19,1 - 20	8,91	7,31	20,1 - 21	9,13	6,94
20,2 - 21	8,86	6,83	21,1 - 22	8,74	6,65
			22,1 - 23	8,95	6,35
			23,1 - 24	8,04	6,06
			24,1 - 25	8,21	5,77

As mudanças em 1 cm nos valores de dap no sistema convencional geram aumentos decrescentes em porcentagem conforme o aumento das dimensões dos indivíduos tanto para o volume quanto para a BS. O maior aumento de v e BS é observado na primeira classe diamétrica, com valores superiores a 20%. No sistema iLF, para a variável volume a mudança é negativa para a primeira classe diamétrica e positiva para as demais classes. Para a variável BS os aumentos foram decrescentes conforme o aumento dos valores das classes diamétricas.

TABELA 10 – SIMULAÇÃO DA MUDANÇA EM % PARA O VOLUME (v) E BIOMASSA SECA ACIMA DO SOLO (BS) COM O AUMENTO DE 1 M NAS CLASSES DE h PARA O SISTEMA CONVENCIONA E PARA O SISTEMA iLF

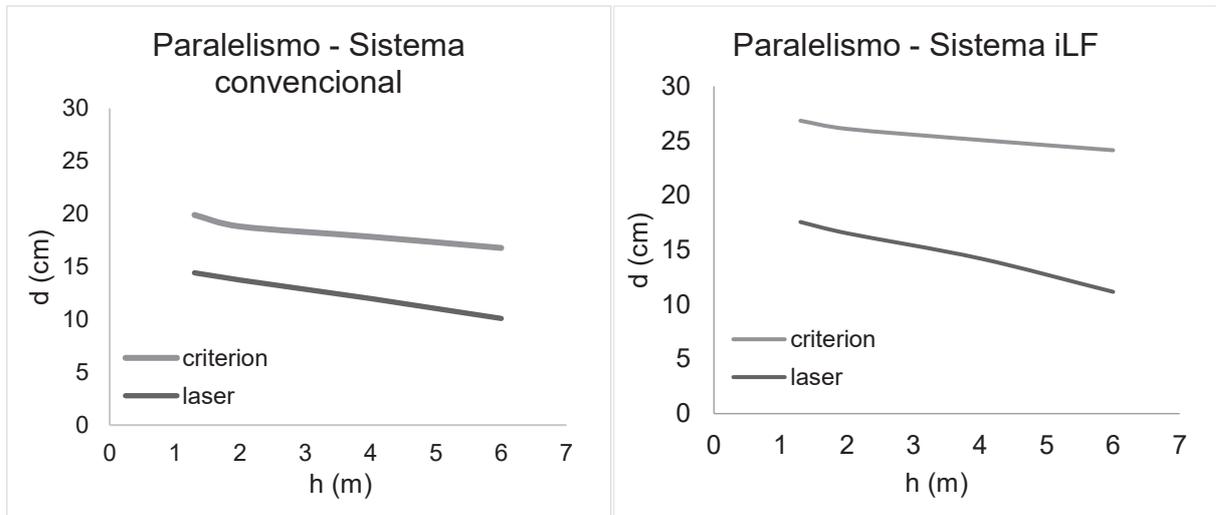
Sistema convencional			Sistema iLF		
h + 1 m	% v	% BS	h + 1 m	% v	% BS
7,1 - 8	18,24	18,74	6,1 - 7	-33,50	20,32
9,1 - 10	11,82	14,35	9,1 - 8	-1,42	14,28
10,1 - 11	12,06	13,42	10,1 - 11	5,61	13,43
11,1 - 12	11,07	12,14	11,1 - 12	3,50	12,77
12,1 - 13	10,42	10,69	12,1 - 13	9,87	11,28
13,1 - 14	9,39	10,44	13,1 - 14	8,66	10,53
14,1 - 15	8,63	9,65	14,1 - 15	9,13	9,78
15,1 - 16	8,49	9,10	15,1 - 16	9,22	9,19
16,1 - 17	8,13	8,69	16,1 - 17	9,24	8,63
17,1 - 18	7,43	8,10	17,1 - 18	9,02	8,27
18,1 - 19	7,31	7,80			

O aumento de 1 m nas alturas totais apresentou menores alterações em porcentagem para o volume e BS quando comparado ao aumento de 1 cm no dap. Os valores em porcentagem foram decrescentes conforme o aumento das dimensões dos indivíduos para o sistema convencional. É importante salientar que esses valores são baseados nas novas estimativas geradas pelas equações anteriormente utilizadas para estimativa de volume e biomassa seca acima do solo.

4.3 ANÁLISE DO AFILAMENTO PARCIAL DAS ÁRVORES

Para verificar as diferenças entre os diâmetros parciais a diferentes alturas mensurados com o Criterion e extraídos pelo TLS foi aplicado a ferramenta *Profile analysis* avaliada sobre 3 hipóteses. A primeira hipótese leva em consideração o paralelismo entre as curvas e está apresentado na FIGURA 17.

FIGURA 17 – PARALELISMO ENTRE AS MEDIDAS DE DIÂMETROS A DIFERENTES ALTURAS PELO CRITERION E PELO TLS PARA O SISTEMA CONVENCIONAL E PARA O SISTEMA ILF LOCALIZADOS NA FAZENDA CANGUIRI – PINHAIS



FONTE: A autora (2018).

d = diâmetro à diferentes alturas (cm); h = altura relativa (m)

Como observado, é possível verificar que as curvas não possuem paralelismo entre si para nenhum dos métodos de implantação e que as maiores diferenças nas medições de diâmetros em diferentes alturas se encontram para o sistema iLF. Na TABELA 11 é possível verificar que a hipótese de paralelismo entre as curvas foi rejeitada nos dois métodos de implantação, pois o T^2 calculado foi maior que o T^2 tabelado.

TABELA 11 – RESULTADOS DAS TRÊS HIPÓTESES TESTADAS COM A FERRAMENTA *PROFILE ANALYSIS*, PARA OS DOIS SISTEMAS AVALIADOS.

Sistema convencional		
Fonte de variação	T^2 calculado	T^2 tabelado
h 01 = Sistema x posição	37,629	6,413
h 02 = Sistema	10,813	1,996
h 03 = Posição	607,207	6,413
Sistema iLF		
Fonte de variação	T^2 calculado	T^2 tabelado
h 01 = Sistema x posição	53,521	6,564
h 02 = Sistema	14,359	2,014
h 03 = Posição	388,091	6,564

FONTE: A autora (2018).

Adicionalmente, após a rejeição da hipótese 1 (h_{01}), foi calculado qual segmento teve maior contribuição para a ocorrência do não paralelismo entre as curvas (TABELA 12), ou seja, indicou quais diferenças de inclinação contribuíram para a rejeição de h_{01} na presença dos outros componentes.

No plantio convencional o primeiro segmento, correspondente a região da curva entre 1,3 e 2 m teve a maior contribuição para a rejeição de h_{01} , enquanto que para o sistema iLF o segundo segmento, correspondente a região da curva entre 2 e 4 m foi o que mais contribuiu para o não paralelismo entre as curvas.

TABELA 12 – RESULTADO DA ANÁLISE DO SEGMENTO COM MAIOR CONTRIBUIÇÃO NO NÃO PARALELISMO ENTRE AS CURVAS DE DIÂMETROS A DIFERENTES ALTURAS OBTIDOS PELO CRITERION E PELO TLS PARA O SISTEMA CONVENCIONAL E PARA O SISTEMA iLF

Segmento (m)	Sistema convencional	Sistema iLF
	a	A
1,3 - 2	-0,714	1,506
2,0 - 4,0	1,638	1,154
4,0 - 6,0	0,732	1,489

FONTE: A autora (2018).

Na TABELA 11 também é possível verificar os valores resultantes para as hipóteses 2 e 3 (h_{02} e h_{03}), em que os valores calculados foram maiores que os tabelados, indicando rejeição das hipóteses. O *Profile analysis* por meio de seus testes demonstrou que os diâmetros em diferentes alturas, medidos com o Criterion e obtidos pelo TLS para o mesmo sistema de implantação, não possuem paralelismo, não são coincidentes, e não são paralelos ao eixo das abscissas ao longo dos pontos de observações, ou seja, se diferem estatisticamente.

Esses resultados podem ser explicados pela dificuldade encontrada durante a obtenção das métricas de diâmetros a diferentes alturas pelo equipamento Criterion, em que o componente lavoura do sistema iLF já havia sido implantado, impedindo a visualização com clareza da base dos indivíduos. Outro aspecto envolvido é que a coleta em campo para a obtenção dessas métricas só pode se viabilizar 4 meses após a obtenção dos dados com o TLS, e como a espécie estudada possui um rápido

crescimento, apresentaram diferenças estatísticas entre os métodos de obtenção com possível contribuição do fator tempo.

Nesse trabalho um resultado para análise de afilamento do tronco ou mesmo de volume por seção avaliada, só poderia ser realizado com a confirmação do fator tempo como justificativa da diferença estatística entre os métodos de medição, e então ser realizada tais análises somente com os dados obtidos com o Criterion ou então somente com os dados obtidos pelo TLS. Porém outros trabalhos que objetivaram avaliar a precisão das métricas de diâmetros a diferentes alturas foram desenvolvidos por outros autores. Como o trabalho elaborado por Martins Neto et al. (2013) em que conseguiram resultados satisfatórios até 55% da altura total, por meio do desenvolvimento de um filtro automático.

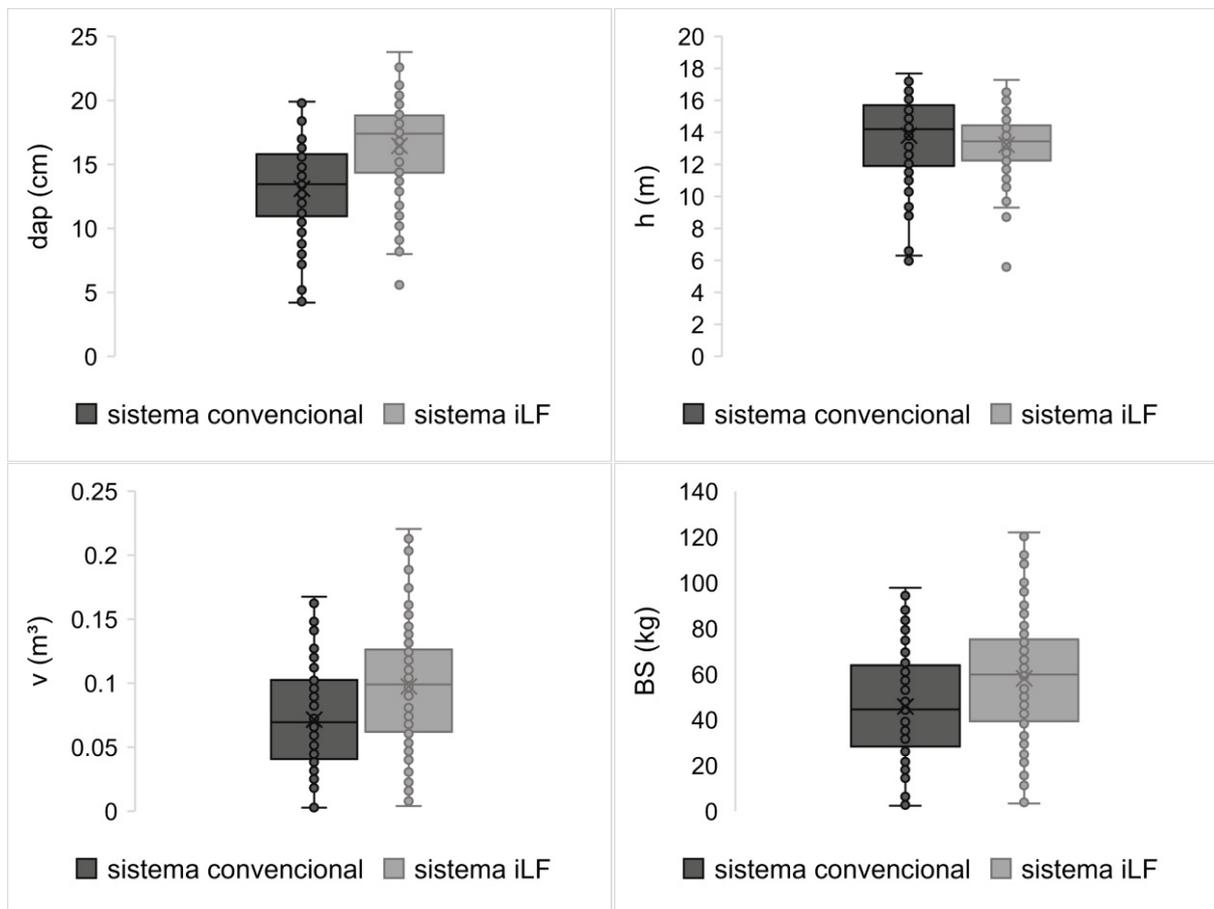
Silva et al. (2011), empregaram em seu trabalho dois métodos para a obtenção de diâmetros a diferentes alturas, e observaram que o mesmo método não se mostrou eficaz ao longo de todo o perfil da árvore, sendo que até uma altura da árvore o método 1 foi melhor, enquanto para uma outra porção do tronco, o método 2 foi mais satisfatório, apesar desses resultados, os autores conseguiram modelar todo o perfil do indivíduo avaliado. O método 1 de distância máxima busca encontrar um valor para o diâmetro próximo ao valor máximo que poderia ser encontrado pelo método tradicional com suta. O método 2 encontra os diâmetros através da minimização do desvio padrão da distância euclidiana entre um centro hipotético e os pontos que definem a fatia pelo Simplex. Cabe ressaltar que a árvore analisada, era um indivíduo isolado, não possuindo a complexidade encontrada em uma floresta.

Teixeira, Fonseca e Chaves (2014) desenvolveram um algoritmo para extração de métricas ao longo do perfil do tronco em que utilizaram o método de clusterização DBSCAN para identificar os conglomerados de pontos e associar a elipses. Os autores obtiveram bons resultados, porém esse algoritmo precisa ser melhor estudado e testado em outras situações.

4.4 PRODUÇÃO FLORESTAL NO SISTEMA CONVENCIONAL E NO SISTEMA iLF

Os sistemas de implantação foram comparados entre si, com os dados obtidos pelo inventário tradicional e com o TLS para as variáveis dap, h, v e BS, conforme demonstrado na FIGURA 18.

FIGURA 18 – DIFERENÇA DE CRESCIMENTO ENTRE OS SISTEMAS CONVENCIONAL E iLF PARA AS MÉTRICAS DAS VARIÁVEIS dap, h, v E BS OBTIDOS POR MEIO DE GRÁFICOS DO TIPO BOX-PLOT



FONTE: A autora (2018).

Como já era esperado os valores médios das métricas individuais foram superiores para o sistema de implantação iLF, com exceção da variável altura que não obteve diferença entre os sistemas de implantação. A menor densidade de plantio permite um maior crescimento individual das árvores em diâmetro, e por consequência em volume e BS. Porém deve-se levar em consideração que ao avaliar esses valores por hectare os resultados de maior crescimento passam a ser para o sistema convencional, visto que a densidade de plantio, ou número de árvores por hectare possui influência direta nos valores de volume e estoque de biomassa seca por hectare.

Sales et al. (2016) realizaram um trabalho comparando a produtividade de um sistema iLPF com renque de duas linhas de plantio e um sistema convencional de *Eucalyptus* com 1.111 árvores por hectare (espaçamento de 3 x 3 m) em diferentes idades, aos 4 anos eles encontraram valor médio de 17,45 cm de dap para o sistema

iLPF e de 17,21 cm para o sistema convencional com *Eucalyptus*, esses valores foram superiores aos encontrados por esse trabalho, e não apresentaram diferenças estatísticas entre os sistemas de implantação. Já Oliveira et al. (2015) ao avaliarem um sistema convencional de *Eucalyptus* com um sistema iLPF aos 25 meses de idade, obtiveram resultados semelhantes a esse estudo em que o dap médio para o sistema iLPF foi superior ao sistema convencional somente com *Eucalyptus*.

Para a variável volume no sistema convencional, o valor médio individual foi de 0,0725 m³, considerando uma sobrevivência de 95 % com 1.583 árvores por hectare, o volume por hectare para o sistema convencional seria de 114,76 m³. ha⁻¹. Para o sistema iLF o volume médio individual é de 0,098m³, e considerando uma sobrevivência de 95 % com 339 árvores por hectare, o volume por hectare para o sistema iLF é 33,22 m³.ha⁻¹, valor 74,06% menor que o encontrado para o sistema convencional. Oliveira et al. (2015) encontraram um volume por hectare de 29,82 m³ em um sistema iLPF com consórcio de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Acacia mangium* Wild., com a mesma densidade de plantio que o sistema iLF desse estudo, porém com idade de apenas 25 meses.

A BS média por indivíduo para o sistema convencional é 45,76 kg, ao extrapolar esse valor por ha, considerando uma sobrevivência de 95% com 1.583 árvores o estoque de biomassa seca para o sistema convencional é de 72,44 t.ha⁻¹. No sistema iLF a BS média por indivíduo é 58,54 kg, valor superior à média por indivíduo do plantio convencional porém ao considerar sobrevivência de 95% e 339 indivíduos o estoque de biomassa seca para esse sistema é de 19,84 t.ha⁻¹, valor 72,6% inferior ao sistema convencional.

Ao avaliar a produtividade florestal apenas, pode-se afirmar que o sistema convencional é mais rentável, no entanto, deve-se levar em consideração que o sistema iLF possui ainda o ganho financeiro obtido com a produção da lavoura, que não foi abordado nesse estudo.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No sistema iLF, a melhor visualização das árvores, proporcionada pelo maior espaçamento de implantação quando comparado ao sistema convencional, facilitou a extração das métricas para as todas as variáveis, obtendo menores variações entre os dados.

Os métodos de extração de métricas do inventário tradicional e *laser scanner* terrestre (TLS) não diferiram entre si, para as variáveis dap, h, v e BS, tanto para o sistema convencional quanto para o sistema iLF, para *Eucalyptus* aos 4 anos de idade.

Os diâmetros parciais à diferentes alturas apresentaram diferenças significativas entre as coletas do TLS e do Criterion RD 1000, não podendo-se afirmar qual dois é o mais preciso uma vez que as árvores não foram abatidas para a cubagem rigorosa. Recomenda-se que trabalhos futuros realizem a determinação direta da forma da árvore visando a possibilidade de conclusão sobre a precisão das técnicas testadas.

A hipótese inicial do trabalho, indicando que os métodos de extração de métricas florestais do inventário tradicional e do *laser scanner* terrestre (TLS) não apresentariam diferenças significativas, foi confirmada.

Recomenda-se para futuros trabalhos testar a influência de outros modelos de implantação sobre a extração de métricas florestais, além de testar se a varredura múltipla obtém resultados superiores quando comparado a varredura simples. Ainda se a varredura múltipla for empregada, avaliar a distância ótima entre o posicionamento do equipamento em campo para obtenção dos dados, visto que os diferentes sistemas de implantação possuem densidades diferentes de indivíduos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J. C.; DA SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C.; JUNIOR, F. T. A. Setting linear and nonlinear mathematical models for biomass estimate and nutrients in *Anadenanthera colubrina* var. *cebil* in the semiarid region of Pernambuco. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 739-750, 2016.
- ALIXANDRINI, M. J. **Estimativa da altura da vegetação utilizando dados *airborne laser scanner***. 2005. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- ALMEIDA, G. J. F. **Uso do *laser scanner* terrestre na estimativa de parâmetros biométricos em povoamentos florestais**. 2017. 50 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2017.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, G. V. M. **Estimativa de variáveis florestais com perfilamento a *laser* (LiDAR)**. 2010. 111 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- AMARAL, D. D.; CORDEIRO, L. A. M.; GALERANI, P. R. Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para Consolidação da Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – Plano ABC. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 6, p. 1266-1274, 2012.
- ANDRADE, M. C. R. **Proposta de redução de custos em inventários florestais por meio do uso de técnicas de geoprocessamento**. São José dos Campos: INPE, 2013, p. 3-4.
- ARNEY, D. J.; PAINE, D. P. Tree and stand volumes using height accumulation and telescopic Spiegel-relaskop. **Forest Science**, v. 18, n.2, p. 159-168, 1972.
- ASCHOFF, T.; THIES, M. SPIECKER, H. Describing forest stands using terrestrial laser-scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 35, n. 5, p. 237-241, 2004.

ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; MEDEIROS, J. C.; MADARI, B. F.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n.4, p. 309-316, 2015.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n.10, p. i-xii, 2011.

BALTSAVIAS, E. P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 83-94, 1999.

BARBER, D.; MILLS, J.; BRYAN, P. Laser scanning and Photogrammetry: 21st Century Metrology. In: CIPA 2001 INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 2001, Germany. **Anais...** Germany: Surveying and Documentation of Historic Buildings – Monuments – Sites Traditional and Modern Methods, Proceedings, 2001.

BEBERT, M. L. D. G. **Potencial do LiDAR terrestre como ferramenta para o manejo de florestas naturais**. 36 f. Monografia (Especialização em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016.

BEHLING, M.; WRUCK, F. J.; ANTONIO, D. B. A.; MENEGUCI, J. L. P.; PEDREIRA, B. C.; CARNEVALLI, R. A.; CORDEIRO, L. A. M.; GIL, J.; FARIAS NETO, A. L.; DOMIT, L. A. Integração Lavoura Pecuária Floresta (iLPF). In: Boletim de pesquisa de soja, 2013/2014. **Integração Lavoura Pecuária Floresta**. Fundação MT: Ademar Galhardi Junior, Fabiano Siqueri, Julianne Caju, Sílvia Camacho, 2014. p. 306-325.

BIENERT, A.; MAAS, H.; SCHELLER, S. Analysis of the information content of terrestrial laser scanner point clouds for the automatic determination of forest inventory parameters. In: WORKSHOP ON 3D REMOTE SENSING IN FORESTRY, Vienna, 2006. p. 1-7.

BORDIN, F.; TEIXEIRA, E. C.; ROLIM, S. B. A.; TOGNOLI, F. M. W.; VERONEZ, M. R.; SILVEIRA JUNIOR, L. G.; SOUZA, C. F. N. Methodology for acquisition of intensity data in forest targets using terrestrial laser scanner. **IERI Procedia**, v. 5, p. 238-244, 2013.

BRASIL, 2009. Instrução Normativa n.º 4, de 8 de setembro de 2009. **Diário oficial da união**, 09.09.2009.

BRASIL. 2010. **Resolução CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE) n.º 425**, de 25 de maio de 2010.

BRASIL. **Informação adicional sobre a iNDC - apenas para fins de esclarecimento**. 10 p. set. 2015.

BU, G.; WANG, P. Adaptive circle-ellipse fitting method for estimating tree diameter based on single terrestrial laser scanning. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 10, n. 2, 2016.

BUCK, A. L. B. **Modelagem de dados laser scanner terrestre para estimativa do volume em plantios clonais de *Eucalyptus* spp.** 2016. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

BUCK, A. L. B.; SILVA, M. N.; LINGNAU, C.; MACHADO, A. M. L.; MARTINS NETO, R. P. Um algoritmo para filtragem do tronco em nuvem de pontos laser terrestre de árvores de *Pinus* spp. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 4, p. 816 - 829, 2014.

BUCK, A. L. B. **Análise de métodos de filtragem em dados laser scanner terrestre aplicados à modelagem tridimensional do tronco de *Pinnus* spp.** 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

CALDERS, K.; NEWNHAN, G.; BURT, A.; MURPHY, S.; RAUMONEN, P.; HEROLD, M.; CULVENOR, D.; AVITABILE, V.; DISNEY, M.; ARMSTON, J.; KAASALAINEN, M. Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 6, n. 2, 198-208, 2015.

CASTRO, F. C. E.; CENTENO, T. M. Segmentação de imagens geradas por perfilamento a laser para delimitação de árvores individuais em uma área de reflorestamento de eucaliptos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2005. p. 737-744.

CELES, C. H. S. **Estoque de carbono e quantificação da incerteza propagada combinando inventário florestal e sensoriamento remoto**. 120 f. 2017. Tese

(Doutorado em Ciência de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2017.

CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3645-3652.

CESARO, A.; ENGEL, O. A.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Comparação dos métodos de amostragem de área fixa, relascopia, e de seis árvores, quanto a eficiência, no inventário florestal de um povoamento de *Pinus sp.* **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.4, n.1, p. 97-108, 1994.

CHIES, D. **Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L.** 2005. 123p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. Integração lavoura-pecuária-floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde. **Ed. Embrapa**, Brasília, DF, p. 393, 2015.

CRECHI, E. H. **Efeitos da densidade da plantação sobre a produção, crescimento e sobrevivência de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** em Misiones, Argentina. 1996. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

CROW, T. R.; SCHLAEGEL, B. E. A guide to using regression equations for estimating tree biomass. **Northern Journal of Applied Forestry**, United States, v. 5, n. 1, 1988.

DASSOT, M.; CONSTANTE, T.; FOURNIER, M. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges. **Annals of Forest Science**, v. 68, n. 5, p. 959-974, 2011.

DUPRAZ, C.; LIAGRE, F. Agroforesterie: des arbres et des cultures. **France Agricole**, Paris, p. 413, 2008.

EMBRAPA AGROSSILVIPASTORIAL. ILPF em números. 2016. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/158636/1/2016-cpamt-ilpf-em-numeros.pdf>>. Acesso em: 08 de outubro de 2018.

FIGUEIREDO FILHO, A. **Estudos de modelos matemáticos para estimar o volume por unidade de área em uma floresta tropical úmida na Amazônia Brasileira**. Curitiba, 1983. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, 1983.

FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S. A.; MIRANDA, R. O. V.; RETSLAFF, F. A. S. **Compêndio de equações de volume e de afilamento de espécies florestais plantadas e nativas para as regiões geográficas do Brasil**. Curitiba: os autores, 2014. p. 306.

FREESE, F. 1962. **Elementary Forest Sampling**. Department of Agriculture, (S.e): USA. (Handbook, n. 232), p. 91, 1962.

FREITAS, A. G.; WICHERT, M. C. P. Comparação entre instrumentos de medição de diâmetro e altura com o Criterion 400. **Circular Técnica IPEF**, p. 6, 1998.

FRÖHLICH, C.; METTENLEITER, M. Terrestrial laser scanning – new in 3D surveying. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Freiburg, v. 36, n. 8/W2, p. 7-13, 2004.

GARCIA, C. H. Tabelas para classificação do coeficiente de variação. **IPEF**, p. 11, 1989.

GATZIOLIS, D.; POPESCU, S.; SHERIDAN, R.; KU, N. Evaluation of terrestrial lidar technology for the development of local tree volume equations. **Proceedings of SilviLaser**, p. 197-205, 2010.

GHOLZ, H. L. **Agroforestry**: realities, possibilities and potentials. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1987. p. 7 – 20.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231-244, 2010.

GORDON, S.; LICHTI, D.; STEWART, M. Application of a high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements, The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Proceedings. Orange, California, USA, p. 23-32, 2001.

HAIR JUNIOR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAN, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.

HENNING J.G.; RADTKE P.J. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. **Forest Science**, v. 52, n. 1, p. 67–80, 2006.

HIGA, R. C. V.; PEREIRA, J. C. D. **Usos potenciais do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 4 p. (Embrapa Florestas. Comunicado Técnico, 100).

HIGUCHI, N. & CARVALHO JR, J. A. **Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia**. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQUESTRO DE CO₂ - UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p. 125-153.

HIGUCHI, N. SANTOS, J.; JARDIM, F. C. S. Tamanho de parcela amostral para inventários florestais. Anais do 4º Congresso Florestal Brasileiro. **Revista Silvicultura**, v. 28 p. 649-656, 1982.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; MONETTE, L.; BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação de floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. **Acta Amazônica**, v. 28, p. 153-165, 1998.

HOPKINSON, L.; CHASMER, L.; YOUNG-POW, C.; TREITZ, P. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. **Canadian Journal of Forest Research**, v.34, n.3, p. 573-583, 2004.

HUSCH, B. Planning a Forest Inventory. Rome: FAO Forest Products, 1971, p. 120.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1982. 402 p.

JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução: EPIPHANIO, J. C.; FORMAGGIO, A. R.; SANTOS, A. R.; RUDORFF, B. F. T.; ALMEIDA, C. M.; GALVÃO, L. S. São José dos Campos, SP: Editora Parêntese, 2009. p. 339.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. p. 210 – 216.

KÄSSMAYER, K.; FRAXE NETO, H. J. **A Entrada em Vigor do Acordo de Paris: o que muda para o Brasil?** Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, novembro/2016 (Texto para Discussão nº 215). Disponível em: <www.senado.leg.br/estudos>. Acesso em: 28 de agosto de 2018.

KRAMER, H.; AKÇA, A. Leitfaden für Dendrometrie und Bestandesinventur. Frankfurt a. M.; Sauerland, p. 251, 1982.

LEMMENS, M. Geo-information. **Forum American Bar Association**, p.101-121, 2011a.

LEMMENS, M. Terrestrial Laser Scanning. In: **Geo-information**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011b. p. 101-121.

LIANG, X.; KANKARE, V.; HYYPPÄ, J.; WANG, Y.; KUKKO, A.; HAGGRÉN, H.; YU, X.; KAARTINEN, H.; JAAKKOLA, A.; GUAN, F.; HOLOPAINEN, M.; VASTARANTA, M. Terrestrial laser scanning in forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 63-77, 2016.

LICHTI, D.; PFEIFER, N.; MAAS, H. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing theme issue —Terrestrial Laser ScanningII. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 63. p. 1-3, 2008.

LIM, K.; TREITZ, P.; GROOT, A.; ST-ONGE, B. Estimation of individual tree heights using LiDAR remote sensing. In: PROCEEDINGS OF THE TWENTY-THIRD ANNUAL CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 2001, QUEBEC. **Anais...** Québec: Canada, 2001. p. 243-250.

LINGNAU, C.; MACHADO, A. M. L.; BAVARESCO JÚNIOR, A. COLLA, F. L. 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.

LINGNAU, C.; SILVA, M. N.; SANTOS, D. S.; MACHADO, A.; LIMA, J. G. S. Mensuração de alturas de árvores individuais a partir de dados *laser* terrestre. **Ambiência**, v. 4, p. 85-96, 2008.

LITKEY, P.; LIANG, X.; KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J.; KUKKO, A.; HOLOPAINEN, M. Single-scan TLS methods for Forest parameter retrieval. In: SILVILASER 2008. Edinburgh UK. p. 295 – 304, 2008.

MAAS, H. G.; BIENERT, A.; SCHELLER, S.; KEANE, E. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 1579-1593, 2008.

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

MACHADO, M. Z. P. **Agricultura de baixa emissão de carbono: uma investigação sobre financiamento e potenciais benefícios**. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) – Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, 2016.

MACHADO, S. A.; CONCEIÇÃO, M. B.; FIGUEIREDO, D. J. Modelagem do volume individual para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa*. **Ciência Exatas e Naturais**, Curitiba, v. 4, n. 2, p. 185-196, 2002.

MALLO, F. **Análisis de Componentes Principales**. Leon: [s. n.], 1985, p. 523.

MÁRQUEZ, A. Un tratado sobre el escáner terrestre TLS. **Mecinca**, v. 1, n. 1, p. 1-30, 2010.

MARTINELLI, L. A.; MOREIRA, M. Z.; BROWN, I. F.; VICTORIA, R. L. **Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais: o exemplo de uma floresta situada no estado de Rondônia**. In: SEMINÁRIO EMISSÃO x SEQUESTRO DE CO₂ – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL. Rio de Janeiro: 1994, **Anais...** Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994, p. 197 – 221.

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 em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2016.

MARTINS NETO, R. P.; BUCK, A. L. B.; SILVA, M. N.; LINGNAU, C.; MACHADO, A. M. L.; PESCK, V. A. 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, 2013.

MELLO, J. M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004, 111 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

MELLO, J. M.; DINIZ, F. S.; OLIVEIRA, A. D.; SCOLFORO, J. R.; ACERBI JUNIOR, F. W.; THIERSCH, C. R. Métodos de amostragem e geoestatística para estimativa do número de fustes e volume em plantios de *Eucalyptus grandis*. **Floresta**, v. 39, n. 1, p. 157-166, 2009.

MOSCOVICH, F. A.; BRENA, D. A.; LONGHI, S. J. Comparação de diferentes métodos de amostragem de área fixa e variável, em uma floresta de *Araucaria angustifolia*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.9, n.1 p.173-191, 1999.

NAESSET, E. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Oslo, v.19, n.2, p.164-179, 2004.

NICOLETTI, M. F.; BATISTA, J. L. F.; CARVALHO, S. P. C.; CASTRO, T. N.; HESS, A. F. Exatidão de dendrômetros ópticos para determinação do volume de árvores em pé. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 25, n. 2, 9. 395-404, 2015.

NOGUEIRA, G. S.; LEITE, H. G.; REIS, G. G.; MOREIRA, A. M. Influência do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 855- 860, 2008.

OLIVEIRA, F. L. R.; CABACINHA, C, D, SANTOS, L. D. T.; BARROSO, D. G.; SANTOS JÚNIOR, A.; BRANT, M. C.; SAMPAIO, R. A. Crescimento inicial de eucalipto e acácia, em diferentes arranjos de integração lavoura-pecuária-floresta. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 277-233, 2015.

PADILHA, A. S. **Emprego de dados Laser Scanner Terrestre e de sensores embarcados em veículos aéreos não tripulados para a extração de variáveis dendrométricas**. 2017. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2017.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário Florestal**. Curitiba: Editorado pelos autores.1997. p. 316.

PESCK, V. A. **Aplicação da varredura laser terrestre em plantios clonais de *Eucalyptus spp.* para determinação do número de árvores e estudos**

diamétricos. 2015. 89 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

PFEIFER, N.; BRIESE, C. Laser scanning - Principles and applications. **3rd International Exhibition & Scientific Congress on Geodesy, Mapping, Geology, Geophysics, Cadaster GEO-SIBERIA**, p. 1-20, 2007.

PINKARD, E. A.; NEILSEN, W. A. Crow and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: implications for thinning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.172, p.215-227, 2001.

PIRES, J. M. **Uso do Lidar (*light detection and ranging*) para estimação da altura de árvores em povoamentos de eucalipto**. 2005. 39 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

POPESCU, S. C. LiDAR Remote Sensing. **Advances in Environmental Remote Sensing, Sensors, Algorithms, and Applications**, Ed: Qihao Weng, CEC Pres, Taylor-Francis series in Remote Sensing Applications, UK, p. 57-84, 2011.

REIS, T.; BORTOLOTTI, F.; LOPES, G. R.; BRAGA, L. **Desafios e oportunidades para avançar as Contribuições Nacionais no setor agropecuário e de florestas na América Latina: O caso do Brasil**. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM). 2017. Disponível em: <http://ipam.org.br/wp-content/uploads/2017/04/PCL_IPAM.pdf>. Acesso em: 02/10/2018.

RENCHER, A. C. **Methods of multivariate analysis**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2002. p. 142-145.

SALES, A.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M. Avaliação do crescimento diamétrico do eucalipto em diferentes idades e sistemas. In: Embrapa Amazônia Oriental-Artigo em anis de congresso (ALICE). In: ENCONTRO AMAZONICO DE AGRÁRIAS, 8., 2016, Belém, PA. **Anais...Belém, PA:[s.n.]**, 2016.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; DALLA CORTE, A. P.; SIMON, A.; PSCHIEDT, H.; RUZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Biomass and carbon stocks in black wattle stands of various ages in Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014a.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; ROGRIGUES, A. L.; WATZLAWICK, L. F. **Inventários florestais: Planejamento e execução**. 3. ed. Curitiba: Multi-graphic Gráfica e Editora, 2014b.

SANQUETTA CR. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: Imprensa Universitária da UFPR, 2002, p. 119-140.

SANTOS, J. DOS. **Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira**. 1996. 121 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

SCHAWLOW, A. L.; TOWNES, C. H. Infrared and Optical Masers. **Physical Review**, v. 112, n. 6, p. 1940-1949, 1958.

SERPE, E. L.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E. Coeficientes *downgrade* para sortimentos de toras de pinus. **Biofix Scientific Journal**, v.3, n. 1, p. 116-121, 2018.

SHINZATO, E. T. **Integração se dados *laser scanner* aerotransportado e imagens aéreas no inventário florestal para a estimativa volumétrica de madeira**. 2015. 85 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

SILVA, C. A. **Carbono na parte aérea de plantios de *Eucalyptus* spp. – em nível de árvore por amostragem destrutiva e para talhões inteiros após o ajuste de métricas LiDAR**. 2013. 152 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2013a.

SILVA, E. T. J. B. Veículos aéreos não tripulados: panorama atual e perspectivas para o monitoramento de atividades ilícitas na Amazônia. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, Foz do Iguaçu, 2013. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2013b.

SILVA, M. N. **Aplicação de *LASER scanner* terrestre para determinação de variáveis dendrométricas em *Pinus* spp.** 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SILVA, M. N.; BUCK, A. L. B.; LINGNAU, C.; MACHADO, A.; MIRANDA, B. P. Varredura com *laser* terrestre para determinação das variáveis dendrométricas da *Araucaria angustifolia*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 5509-5516.

SILVA, G. F.; LEITE, V. R.; CURTO, R. A. ; MÔRA, R. ; MARTINS, L. T. ; SANTOS, E. M. ; SOARES, C. P. B. . Cuidados com o uso do coeficiente de determinação na

análise do ajuste de modelos volumétricos. In: 4º SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE MANEJO FLORESTAL, 2008, Santa Maria. **Anais...**Santa Maria: UFSM, 2008, v. 4, p. 339-344.

SIMONSE, M.; ASCHOFF, T.; SPIECKER, H.; THIES, M. Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial Laser scanning. **Institute for Forest Growth**, p. 1-7, 2003.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. P. S.; AGOSTINHO L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2011. 272 p.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. P.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 276 p.

SOUZA NETO, A. C.; COELHO, M. O uso de drones na fiscalização do processo de abastecimento de navios no porto de Santos. IV Congresso Internacional de Desempenho Portuário. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n.1, p. 118-135, 2018.

SPURR, S.H. **Forest inventory**. New York: Ronald, 1952. 476p.

STAGE, A. R. Prediction of height increment for models of forest growth. **Res. Pap. (INT)**. USDA. For. Serv., Ogden, n.164, p. 1-20, 1975.

STAPE, J. L. **Utilização de delineamento sistemático tipo leque no estudo de espaçamentos florestais**. 1995. 104p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

STEENBOCK, W.; SILVA, R. O.; FROUFE, L. C. M.; SEOANE, C. E. Agrofloresta e sistemas agroflorestais no espaço e no tempo. **Agrofloresta, ecologia e sociedade**. Curitiba: Kairós, p. 39-60, 2013.

TAVARES, G. G.; SABINO, T. L. R.; FONSECA, L. G.; CHAVES, F. O.; COTRIM, B. Métodos computacionais para aproximação do diâmetro à altura do peito de árvores de regiões de mangue via escaneamento tridimensional a laser. In: XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 2016, Brasília. **Anais...CILAMCE: ABMEC**, 2016. p. 9- 16.

TEIXEIRA, P. H.; FONSECA, L. G.; CHAVES, F. O. Algoritmo para a reconstrução de árvores individuais a partir de dados de varredura tridimensional a *laser*. In:

SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 2014, Juiz de Fora. **Anais...Juiz de Fora**, MG: SIMMEC/EMMCOMP, 2014.

TIEDE, D.; HOCHLEITNER, G.; BLASCHKE, T. A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. In: ANAIS DO IAPRS, 2005, Vienna, Austria. **Anais...** Vienna, Austria: IAPRS. V. XXXVI, Part 3/W24, 2005. p. 9-14.

TOMMASELLI, A. M. G. Um estudo sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3D a curta distância. **GEODÉSIA Online-Revista da Comissão Brasileira de Geodésia**, v. 4, p. 1415-1111, 2003.

UBIALLI, J. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S. A.; ARCE, J. E. Comparação de métodos e processos de amostragem para estimar a área basal para grupos de espécies em uma floresta ecotonal da região norte matogrossense. **Acta amazônica**, v. 39, n. 2, p. 305-314, 2009.

VAN DER ZANDE, D.; HOET, W.; JONCKHEERE, I.; VAN AARDT, J.; COPPIN, P. Influence of measurement set-up of ground-based LiDAR for derivation of tree structure. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 141, n. 2, p 147-160, 2006.

VAUHKONEN, J.; MALTAMO, M.; MCROBERTS, R. E.; NAESSET, E. In: MALTAMO, M.; NAESSET, E. VAUHKONEN, J. Introduction to Forestry Applications of Airborne Laser Scanning. In: **Forestry applications of airborne laser scanning concepts and case studies**. Dordrecht, Netherlands: Springer Science, 2014, p.01-16.

VEIGA, R. A. de A. Uso de equações de volume em levantamentos florestais. In: SIMPÓSIO SOBRE INVENTÁRIO FLORESTAL, Piracicaba. **Anais...**Piracicaba: IPEF, 1981. p. 93-102.

WACK, R.; SCHARDT, M.; BARRUCHO, L.; LOHR, U.; OLIVEIRA, T. Forest inventory for eucalyptus plantations based on airborne laser scanner data. In: PROCEEDINGS OF THE ISPRS WORKING GROUP III/3 WORKSHOP 3D RECONSTRUCTION FROM AIRBORNE LASER SCANNER AND INSAR DATA. 2003. Dresden: ISPRS, 2003, 7 p.

WATT, P. J.; DONOGHUE, D. N. M. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 7, n. 1437 – 1446, 2005.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning-an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 68-82, 1999.

WUTKE, J. D. **Métodos para avaliação de um Sistema *Laser Scanner* Terrestre**. 2006. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

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

ZASADA, M.; STERENCZAK, K.; DUDEK, W. M.; RYBSKI, A. 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.

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