

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ADRIANE AVELHANEDA MALLMANN

AUTOMAÇÃO DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS COM *TERRESTRIAL LASER SCANNING*: UM ENFOQUE EM INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA

CURITIBA

2024

ADRIANE AVELHANEDA MALLMANN

AUTOMAÇÃO DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS COM *TERRESTRIAL LASER*
SCANNING: UM ENFOQUE EM INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA

Tese 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 Doutora em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Paula Dalla Corte

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Behling
Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta

CURITIBA

2024

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

Mallmann, Adriane Avelhaneda

Automação de inventários florestais com Terrestrial Laser Scanning: um enfoque em integração lavoura-pecuária-floresta / Adriane Avelhaneda Mallmann. - Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Paula Dalla Corte

Coorientadores: Prof. Dr. Alexandre Behling

Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 12/04/2024.

1. Levantamentos florestais. 2. Sistemas agroflorestais. 3. Florestas - Sensoriamento remoto. 4. Florestas - Medição. 5. Eucalipto - Medição. 6. Lasers. 7. Radar ótico. I. Dalla Corte, Ana Paula. II. Behling, Alexandre. III. Sanquetta, Carlos Roberto. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD - 634.9285

CDU - 528.8

634.0.58

Bibliotecária: Marilene do Rocio Veiga - CRB9/424



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **ADRIANE AVELHANEDA MALLMANN** intitulada: **AUTOMAÇÃO DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS COM TERRESTRIAL LASER SCANNING: UM ENFOQUE EM INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutora 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, 12 de Abril de 2024.

Assinatura Eletrônica
13/04/2024 09:50:55.0
ALEXANDRE BEHLING
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
15/04/2024 08:50:31.0
ANA PAULA DALLA CORTE
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
12/04/2024 21:17:27.0
JONATHAN WILLIAM TRAUTENMÜLLER
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
13/04/2024 09:40:49.0
SYLVIO PÉLLICO NETTO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
15/04/2024 09:28:18.0
ANDREA NOGUEIRA DIAS
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE)

Assinatura Eletrônica
15/04/2024 10:40:17.0
EMANUEL ARAÚJO SILVA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE
PERNAMBUCO)

AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos pais, João Adelar Mallmann e Maria Odete Avelhaneda Mallmann, expressei minha profunda gratidão. Suas vidas são um testemunho de simplicidade, honestidade e trabalho árduo. Mesmo sem terem tido a oportunidade de estudar, sempre se esforçaram para me proporcionar uma vida digna e educação. Obrigada pelo amor incondicional, pelo carinho, pelos conselhos, pelos ensinamentos, pela presença e por serem uma base forte na minha vida. Sei que é graças ao suor do trabalho diário de vocês que posso avançar em busca dos meus sonhos acadêmicos. Cada esforço, cada sacrifício, não passou despercebido. Por mais que eu me esforce, sei que jamais conseguirei retribuir tamanho amor e dedicação. Sou infinitamente grata por tudo que fizeram e ainda fazem por mim. Que essas palavras sejam um humilde reconhecimento da grandeza de vocês em minha vida.

Quero expressar minha profunda gratidão às psicólogas Greice Michael, Célia Maria Polak e Bárbara Kiapuchinski Hady. Ao longo dos anos, elas foram verdadeiros pilares na minha luta contra a depressão. Suas abordagens únicas, apoio constante e orientação me ajudaram a superar momentos difíceis que poderiam ter me paralisado e me impedido de avançar em busca dos meus objetivos. Agradeço por serem luzes em meu caminho e por dedicarem suas vidas a ajudar os outros.

Gostaria de estender minha gratidão aos meus queridos gatos, Lior e Laila. Eles são mais do que simples animais de estimação; são verdadeiros companheiros que me presenteiam todo dia com seu amor e presença. Em momentos de tristeza ou alegria, eles estão sempre ao meu lado, oferecendo conforto e apoio emocional. Agradeço por serem parte essencial da minha vida e por tornarem cada dia mais especial. A chegada deles na minha vida me transformou em um ser humano melhor, mais expressivo e cheio de amor para compartilhar.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos os professores que me apoiaram no início da minha jornada no ambiente acadêmico. Em especial, agradeço aos professores da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM): Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira, Prof. Dr. José Américo de Mello Filho, Prof. Dr. Manoel de Araújo Sousa Júnior e Prof. Dr. Eno Darci Saatkamp. Seu apoio e orientação foram fundamentais para o meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional.

Gostaria de expressar minha gratidão à minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Ana Paula Dalla Corte, e aos meus coorientadores, Prof. Dr. Alexandre Behling e Prof. Dr.

Carlos Roberto Sanquetta. Suas orientações, ensinamentos e confiança depositada em mim foram fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço por estarem ao meu lado durante a jornada acadêmica e por compartilharem seu conhecimento e experiência.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) agradeço a oportunidade de realizar os estudos necessários para a conclusão da minha tese de Doutorado. A dedicação e o apoio da equipe do PPGEF, principalmente do David Teixeira de Araujo e Reinaldo Mendes de Souza, foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Gostaria de expressar minha gratidão aos meus professores do PPGEF da UFPR. Cada um de vocês contribuiu de maneira significativa para a minha evolução pessoal e profissional ao longo desta jornada acadêmica.

Ao Laboratório BIOFIX - Centro de Excelência em Pesquisa de Biomassa e Carbono. Durante os 6 anos em que fiz parte e trabalhei nesse laboratório, aprendi muito. Agradeço a todos os colegas e mentores que tornaram essa jornada significativa e enriquecedora.

Ao pesquisador Rubén Manso da Forest Research (Reino Unido), por estar sempre disposto a ajudar e orientar.

Em especial, quero agradecer à Kauana Engel e ao Jonathan William Trautenmüller pelo apoio, incentivo e amizade, fundamentais para o meu crescimento. Espero que nossa parceria perdure e que continuemos a compartilhar conhecimento e experiências.

Agradeço pelas novas e antigas amizades que enriquecem minha vida. Em especial, agradeço à Iací Dandara Santos Brasil, Jimmy Javier Ocles Morales, Lucas Henderson Oliveira dos Santos, Letícia Siqueira Walter, Sarah Manso, Patrícia Cristina Pires, Fábio Rabuske, Franciele Alba, Claiton Nardini, Carla Talita Pertille, Rebecca Araújo Garcia, Darcy Maria da Conceição Laura dos Santos, Bruna Nascimento Vasconcellos, Natiele Caumo Mezacasa e Lucas Bielak Rezende. Suas amizades foram verdadeiros presentes, preenchendo meus dias com alegria, apoio e companheirismo.

Aos colegas que me ajudaram na coleta de dados em campo. Cada um de vocês desempenhou um papel fundamental na obtenção de informações necessárias para este trabalho. Agradeço a Kauana Engel, José Augusto Spiazzi Favarin, Iací Dandara Santos Brasil, Lucas Henderson Oliveira dos Santos, Iasmin Fernanda

Portela Pfutz, Eduarda Cristina Moraes dos Santos, Lucas Araujo Moura, Victor Hugo Gomes dos Passos e Letícia Pereira Corcuruto. Sua colaboração e dedicação foram essenciais para o sucesso deste projeto.

Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Anibal de Moraes pela atenção, cuidado e auxílio na coleta de dados na Fazenda Experimental Canguiri do Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA). Aos trabalhadores da Fazenda Experimental Canguiri, que me ajudaram no trabalho de campo: João José da Cruz, Luís Fernando Prestes dos Santos, Carlos Rodrigo dos Santos, Isak dos Santos, Ezequiel Souza Oliveira, meus sinceros agradecimentos. Ao motorista Leodir Mariano de Freitas que, além de nos levar até o local de coleta de dados, também nos ajudou no trabalho de campo.

Ao Wilson Holler da Embrapa Florestas, onde por meio da participação no projeto Saltus II, constituído pelo subprojeto denominado “Dinâmica de gases de efeito estufa e dos estoques de carbono em florestas naturais e plantadas: práticas silviculturais para mitigação e adaptação às mudanças climáticas”, foi possível realizar as varreduras laser com o TLS. Sua contribuição foi fundamental para o avanço da pesquisa e para a obtenção de dados valiosos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos. Seu apoio financeiro foi essencial para a realização deste trabalho e para o meu desenvolvimento acadêmico. Agradeço por tornarem possível essa oportunidade de aprendizado e crescimento profissional.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, estiveram presentes em minha vida e contribuíram para a minha formação. Embora não possam ser nomeadas individualmente, cada gesto, palavra de incentivo e apoio desempenhou um papel significativo em minha jornada.

Aos amigos que compartilharam risadas e momentos difíceis, aos familiares que sempre estiveram ao meu lado, aos professores que me inspiraram e aos colegas que compartilharam conhecimento, meu sincero agradecimento. Sem vocês, minha trajetória não teria sido a mesma.

Que essa gratidão se estenda a todos os que cruzaram meu caminho, mesmo que brevemente. Cada interação moldou quem sou hoje, e por isso sou grata.

Talvez a felicidade seja isso: não sentir que você deveria estar em outro lugar, fazendo outra coisa, sendo outra pessoa. (Eric Weiner)

RESUMO

O uso do *Light Detection and Ranging* (LiDAR) em inventários florestais tem se mostrado cada vez mais eficiente. Essa tecnologia permite a aquisição de informações detalhadas sobre a estrutura das árvores sem a necessidade de cortá-las, preservando a integridade do ecossistema florestal, o que é particularmente útil em sistemas agroflorestais, onde as árvores frequentemente possuem grande porte e valor econômico. O uso do *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) para obter diâmetros ao longo do fuste das árvores enfrenta desafios devido à oclusão causada pela presença de galhos e folhas na porção da copa. Quando a copa das árvores é densa, os pulsos podem ser bloqueados pelos galhos e folhagem, resultando em distorções nas medidas dos diâmetros, o que compromete as estimativas dos volumes das árvores. Nesse sentido, o objetivo desta tese consistiu em superar essa limitação, tornando as variáveis extraídas das varreduras de TLS aplicáveis na estimativa do volume individual total e de sortimentos de madeira. Para atingir o objetivo proposto, foi incorporado neste estudo uma abordagem multifacetada. Em um primeiro momento, foram desenvolvidas e propostas rotinas de processamento específicas para os dados de TLS obtidos em plantios de *Eucalyptus benthamii* em um sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF). Na sequência, foi avaliado o desempenho das estimativas do volume individual total das árvores com base em um menor número de medições do fuste, até uma boa representação sem influência de galhos. E por último, foram propostas metodologias para estimar os diâmetros nas diferentes alturas do fuste, acima de cinco metros, tendo como base os diâmetros e alturas obtidos pelo TLS na porção do fuste sem a presença de galhos, visando quantificar os sortimentos de madeira. A hipótese de que uma representação parcial do fuste das árvores, obtida por meio do TLS, pode estimar com acurácia o volume total individual das árvores foi confirmada pelas estatísticas de avaliação das estimativas, medidas de concordância e gráficos de concordância de Bland-Altman. Os resultados indicam que quanto maior o volume parcial utilizado na estimativa do volume total individual, mais exata será a estimativa. No entanto, estimativas de volume individual baseadas em volumes parciais de secções menores do fuste também são estatisticamente satisfatórias e podem ser usadas com confiança nas estimativas dos volumes individuais. A utilização de varreduras de TLS para estimar os diâmetros ao longo do fuste das árvores em inventários florestais é uma abordagem promissora. No contexto da área de estudo, os resultados obtidos pelo Método 03 proposto não diferiram dos resultados do Método 01, tradicionalmente utilizado na área florestal. Em essência, o processo gerador de dados pelo Método 03, seguido pelo ajuste do Polinômio de 5º Grau e estimativa dos sortimentos, é equivalente ao método tradicional que envolve a derrubada e cubagem das árvores. Utilizando a cubagem via dados de TLS, foi possível superar as limitações decorrentes da oclusão, que afetam a obtenção precisa dos diâmetros ao longo do fuste das árvores. Sugere-se que o método proposto (Método 03) seja aplicado em outras condições de plantio para o aprimoramento da metodologia.

Palavras-chave: Volume. Afilamento. Sistemas Agroflorestais. *Terrestrial Laser Scanner*. *Eucalyptus benthamii*.

ABSTRACT

The use of Light Detection and Ranging (LiDAR) in forest inventories has proven to be increasingly effective. This technology allows for the acquisition of detailed information about the structure of trees without the need to cut them down, preserving the integrity of the forest ecosystem. This is particularly useful in agroforestry systems, where trees often have large size and economic value. The use of Terrestrial Laser Scanner (TLS) to obtain diameters along the trunk of trees faces challenges due to occlusion caused by the presence of branches and leaves in the crown portion. When the tree canopy is dense, the pulses can be blocked by the branches and foliage, resulting in distortions in the diameter measurements, which compromises the estimates of tree volumes. In this regard, the goal of the current work was to overcome this limitation, making the variables extracted from TLS scans applicable in estimating the total individual volume and assortments of wood. To achieve the proposed objective, in this study it was adopted a multifaceted approach. Initially, specific processing routines were developed and proposed for TLS data obtained from *Eucalyptus benthamii* plantations in a Crop-Livestock-Forestry Integration System (iCLF). Subsequently, the performance of the estimates of the total individual volume of the trees was evaluated based on a smaller number of trunk measurements, until a good representation without the influence of branches was achieved. Finally, methodologies were proposed to estimate the diameters at different heights of the trunk, above five meters, based on the diameters and heights obtained by the TLS in the portion of the trunk without branches, aiming to quantify the assortments of wood. The hypothesis that a partial representation of the tree trunk, obtained through TLS, can accurately estimate the total individual volume of the trees was confirmed by the evaluation statistics of the estimates, measures of agreement, and Bland-Altman concordance graphs. The results suggest that the larger the partial volume used in estimating the total individual volume, the more accurate the estimate will be. However, estimates of individual volume based on partial volumes from smaller sections of the stem are also statistically satisfactory and can be confidently used in estimating individual volumes. The use of TLS scans to estimate diameters along the trunk of trees in forest inventories is a promising approach. In the context of the study area, the results obtained by the proposed Method 03 did not differ from the results of Method 01, which is traditionally used in the forestry area. Essentially, the data generation process by Method 03, followed by the adjustment of the 5th Degree Polynomial and the estimation of assortments, is equivalent to the traditional method that involves felling and scaling the trees. Using scaling through TLS data, it was possible to overcome the limitations resulting from occlusion, which affect the precise measurement of diameters along the tree trunk. It is suggested that the proposed method (Method 03) be applied under different planting conditions to refine the methodology.

Keywords: Volume. Tapering. Agroforestry Systems. Terrestrial Laser Scanner.
Eucalyptus benthamii.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. FREQUÊNCIA DE ARTIGOS PUBLICADOS ANUALMENTE SOBRE O USO DA TECNOLOGIA TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS	33
FIGURA 2. NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE O USO DA TECNOLOGIA TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS, NO PERÍODO DE 2012 A 2022, ORGANIZADOS POR REVISTA.....	33
FIGURA 3. NUVEM DE PALAVRAS COM BASE NAS PALAVRAS-CHAVES UTILIZADAS PELOS AUTORES DAS PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS SELECIONADAS NO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE O USO DO TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS	34
FIGURA 4. LOCAIS DE ESTUDO UTILIZADOS NAS PUBLICAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DO TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS, DE 2012 A 2022	35
FIGURA 5. PREMISSAS PARA UM BOM MODELO ESTATÍSTICO SEGUNDO OS AUTORES RAUMONEN <i>ET AL.</i> (2013).....	42
FIGURA 6. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR	56
FIGURA 7. ÁREA DE ESTUDO LOCALIZADA NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	57
FIGURA 8. DERRUBADA E SECCIONAMENTO DE UMA ÁRVORE DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	59
FIGURA 9. DERRUBADA E DESGALHAMENTO DE UMA ÁRVORE DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	60
FIGURA 10. MEDIÇÕES DOS DIÂMETROS INTERMEDIÁRIOS DE UMA ÁRVORE DE EUCALIPTO, NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	61
FIGURA 11. MEDIÇÕES DE ALTURAS E DIÂMETROS INTERMEDIÁRIOS DE UMA ÁRVORE DE EUCALIPTO, NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.	62
FIGURA 12. POSIÇÃO DE UMA ÁRVORE CENTRO E ÁRVORES LATERAIS DE EUCALIPTO, MENSURADAS NA AMOSTRAGEM REALIZADA NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	63

FIGURA 13. MEDIÇÃO DO DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO E ALTURA TOTAL NA AMOSTRAGEM REALIZADA NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	64
FIGURA 14. FARO FOCUS 3D X 330 UTILIZADO NAS VARREDURAS REALIZADAS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	65
FIGURA 15. MARCAÇÕES DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO E ESFERAS UTILIZADAS NAS VARREDURAS COM O TLS FARO FOCUS 3D X 330, NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR	66
FIGURA 16. POSIÇÃO DA ÁRVORE CENTRO E ÁRVORES LATERAIS DE EUCALIPTO UTILIZADAS COMO ALVO DAS VARREDURAS DO TLS REALIZADAS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	67
FIGURA 17. ESFERAS IDENTIFICADAS NO <i>SOFTWARE</i> SCENE DURANTE O PROCESSO DE REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS OBTIDAS COM O TLS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	68
FIGURA 18. NUVEM DE PONTOS OBTIDA APÓS O REGISTRO DAS VARREDURAS DO TLS	69
FIGURA 19. NUVEM DE PONTOS DE UMA ÁRVORE CENTRAL E DUAS LATERAIS OBTIDA APÓS O RECORTE DA NUVEM DE PONTOS ORIUNDA DO REGISTRO.....	70
FIGURA 20. LIMPEZA DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA DO TLS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR	71
FIGURA 21. IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DE INTERESSE NA NUVEM DE PONTOS OBTIDA COM TLS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	72
FIGURA 22. EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS DE INTERESSE DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA COM TLS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	73
FIGURA 23. SEQUÊNCIA METODOLÓGICA PARA OBTENÇÃO DOS VOLUMES INDIVIDUAIS DE EUCALIPTO COM A UTILIZAÇÃO DO TLS.....	74
FIGURA 24. ESQUEMA REPRESENTATIVO DAS DIFERENTES SECÇÕES DO FUSTE UTILIZADAS NO CÁLCULO DOS VOLUMES PARCIAIS DAS	

ÁRVORES DE EUCALIPTO DA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR	80
FIGURA 25. GRÁFICO DE RESÍDUOS ORIUNDOS DO AJUSTE DAS TRÊS EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS PARA A ESTIMATIVA DO VOLUME DE ÁRVORES DE EUCALIPTO	83
FIGURA 26. GRÁFICO DE RESÍDUOS ORIUNDOS DO AJUSTE PONDERADO PARA OS TRÊS MODELOS VOLUMÉTRICOS AVALIADOS	84
FIGURA 27. GRÁFICO DE CONCORDÂNCIA DE BLAND-ALTMAN COM AS DIFERENÇAS MÉDIAS DE VOLUME ESTIMADO POR MEIO DA AMOSTRAGEM E TLS	85
FIGURA 28. VOLUMES PARCIAIS OBTIDOS DO TLS E A CORRELAÇÃO DESSES VOLUMES COM O VOLUME ESTIMADO DA AMOSTRAGEM E DO TLS	87
FIGURA 29. GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN PARA AVALIAR A CONCORDÂNCIA ENTRE OS VOLUMES INDIVIDUAIS ESTIMADOS DE 01 A 05 E O VOLUME ESTIMADO DA AMOSTRAGEM PARA ÁRVORES DE EUCALIPTO LOCALIZADOS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR	90
FIGURA 30. GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN PARA AVALIAR A CONCORDÂNCIA ENTRE OS VOLUMES INDIVIDUAIS ESTIMADOS DE 06 A 10 E O VOLUME ESTIMADO DA AMOSTRAGEM PARA ÁRVORES DE EUCALIPTO LOCALIZADOS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR	91
FIGURA 31. SEQUÊNCIA METODOLÓGICA PARA OBTENÇÃO DOS SORTIMENTOS DE MADEIRA DE EUCALIPTO COM A UTILIZAÇÃO DO TLS	100
FIGURA 32. PROCESSAMENTOS DE MÚLTIPLOS PRODUTOS DA MADEIRA TENDO COMO BASE UMA ÁRVORE COM DAP DE 40 CENTÍMETROS, ALTURA TOTAL DE 22 METROS E PERDA PELA SERRA DE 5 CENTÍMETROS	105
FIGURA 33. GRÁFICO COM O PERFIL DO FUSTE OBTIDO DO AJUSTE DO POLINÔMIO DE 5º GRAU COM DADOS ORIUNDOS DO TLS E DA CUBAGEM DE ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI EM PINHAIS, PR	108

FIGURA 34. GRÁFICOS DE CONCORDÂNCIA DE BLAND-ALTMAN COM AS DIFERENÇAS MÉDIAS DE VOLUME POR SORTIMENTO DE MADEIRA OBTIDOS PELOS MÉTODOS CUBAGEM E MÉTODO 01.	111
FIGURA 35. GRÁFICOS DE CONCORDÂNCIA DE BLAND-ALTMAN COM AS DIFERENÇAS MÉDIAS DE VOLUME POR SORTIMENTO DE MADEIRA OBTIDOS PELOS MÉTODOS CUBAGEM E TLS, MÉTODO 02.	112
FIGURA 36. GRÁFICOS DE CONCORDÂNCIA DE BLAND-ALTMAN COM AS DIFERENÇAS MÉDIAS DE VOLUME POR SORTIMENTO DE MADEIRA OBTIDOS PELOS MÉTODOS CUBAGEM E TLS, MÉTODO 03.	113

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. CONJUNTO DE ARTIGOS SELECIONADOS NO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE O USO DA TECNOLOGIA TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS	32
TABELA 2. CONJUNTO DE ARTIGOS SELECIONADOS NO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE O USO DA TECNOLOGIA TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS, TLS E ESPÉCIE UTILIZADA E LOCAL DE ESTUDO	36
TABELA 3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS SENSORES TLS UTILIZADOS NAS PUBLICAÇÕES SELECIONADAS NO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	37
TABELA 4. RELAÇÃO DE ASSUNTOS LIGADOS AO USO DO TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS E RESPECTIVAS PUBLICAÇÕES	37
TABELA 5. RELAÇÃO DE SECÇÕES DO FUSTE UTILIZADAS NO CÁLCULO DOS VOLUMES PARCIAIS DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO DA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	80
TABELA 6. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS OBTIDAS DA CUBAGEM DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR.....	82
TABELA 7. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS OBTIDAS DA AMOSTRAGEM E DO TLS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR	82
TABELA 8. MODELOS VOLUMÉTRICOS, COEFICIENTES E SUAS RESPECTIVAS ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO APÓS A PONDERAÇÃO DOS AJUSTES	84
TABELA 9. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS ESTIMATIVAS DE VOLUME OBTIDAS COM BASE NOS DADOS DA AMOSTRAGEM E TLS PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR.....	85
TABELA 10. MEDIDAS DE CONCORDÂNCIA DAS ESTIMATIVAS DE VOLUME OBTIDAS COM OS DADOS DE AMOSTRAGEM E TLS PARA ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR	85

TABELA 11. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS VOLUMES PARCIAIS OBTIDOS DO TLS PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO DA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR	86
TABELA 12. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS ESTIMATIVAS DE VOLUME INDIVIDUAL TOTAL OBTIDAS COM O MODELO DE RAZÃO, COM BASE NOS VOLUMES ESTIMADOS DA AMOSTRAGEM E VOLUMES PARCIAIS DO TLS PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO DA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	88
TABELA 13 - ESTIMATIVAS DE VOLUME INDIVIDUAL TOTAL MÉDIO COM BASE EM DIFERENTES VOLUMES PARCIAIS DO TLS, ESTIMADAS PELO MODELO DE RAZÃO E ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO OBTIDAS PARA ÁRVORES DE EUCALIPTO DA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR	88
TABELA 14. MEDIDAS DE CONCORDÂNCIA CALCULADAS COM BASE NOS VOLUMES INDIVIDUAIS ESTIMADOS E VOLUME ESTIMADO DA AMOSTRAGEM PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR.....	89
TABELA 15. RELAÇÃO DE SORTIMENTOS UTILIZADOS	104
TABELA 16. POLINÔMIOS DE SEGUNDO GRAU OBTIDOS COM OS DADOS LIDAR TLS	106
TABELA 17. COEFICIENTES OBTIDOS PARA CADA SEGMENTO DO FUSTE UTILIZANDO OS DADOS TLS	107
TABELA 18. COEFICIENTES OBTIDOS APÓS O AJUSTE DO POLINÔMIO DE 5º GRAU COM DADOS OBTIDOS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	107
TABELA 19. ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DOS AJUSTES DO POLINÔMIO DE 5º GRAU	107
TABELA 20. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS SORTIMENTOS OBTIDOS DA CUBAGEM E ESTIMADOS COM BASE NO MÉTODO 01 PARA ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	108
TABELA 21. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS SORTIMENTOS ESTIMADOS COM BASE NOS MÉTODOS 02 E 03 PARA ÁRVORES DE	

EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.....	109
TABELA 22. CORRELAÇÃO ENTRE OS SORTIMENTOS DE MADEIRA ESTIMADOS PELOS MÉTODOS 01, 02 E 03 E OS SORTIMENTOS OBTIDOS DA CUBAGEM.....	109
TABELA 23. MEDIDAS DE CONCORDÂNCIA CALCULADAS COM BASE NOS SORTIMENTOS OBTIDOS DA CUBAGEM E SORTIMENTOS ESTIMADOS PELO MÉTODO 01 PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR.....	110
TABELA 24. MEDIDAS DE CONCORDÂNCIA CALCULADAS COM BASE NOS SORTIMENTOS OBTIDOS DA CUBAGEM E SORTIMENTOS ESTIMADOS PELOS DADOS TLS, MÉTODO 02, PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR	110
TABELA 25. MEDIDAS DE CONCORDÂNCIA CALCULADAS COM BASE NOS SORTIMENTOS OBTIDOS DA CUBAGEM E SORTIMENTOS ESTIMADOS PELOS DADOS TLS, MÉTODO 03, PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR	110

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

β_i	- Coeficiente
ψ	- Peso
ρ	- Medida de Concordância
λ	- Parâmetro de Concordância
3D	- Tridimensional
A	- Coeficiente de Concordância
AC	- Árvore Centro
a_i	- Coeficiente
AL	- Árvore Lateral
ALS	- <i>Airborne Laser Scanning</i>
Amp.	- Amplitude
APA	- Área de Proteção Ambiental
BE	- Bélgica
CA	- Área de Projeção da Copa
CAP	- Circunferência à Altura do Peito
CC1	- Coeficiente de Correlação de Concordância
CC2	- Coeficiente de Correlação de Concordância Melhorado
CCC	- Coeficiente de Correlação de Concordância
Cfb	- Clima Subtropical Úmido
CEN	- <i>Centroid Method</i>
CHM	- Modelo de altura do dossel
CN	- China
CS	- Área Superficial da Copa
CV%	- Coeficiente de Variação em Percentagem
D	- Diâmetro
d_4	- Diâmetro à Quatro Metros de Altura
di	- Diâmetro intermediário
DAP	- Diâmetro à Altura do Peito
DCHM	- Modelo Digital de Altura do Dossel
DE	- Alemanha
DEM	- <i>Digital Elevation Model</i>
DPF	- Diâmetro na Ponta Fina

ENG	- English
e	- Erro/resíduo
FI	- Finlândia
GEE	- Gases de Efeito Estufa
GNSS	- Sistema Global de Navegação por Satélite
h	- Altura Total
hi	- Altura Intermediária
IC	- Índice de Competição
IC	- Intervalo de Confiança
ICP	- <i>Iterative Closest Point</i>
iLPF	- Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
IT	- Itália
ITD	- Delineamento individual de árvores
JP	- Japão
KOR	- Coreia do Sul
LC	- Limite Central
LF	- Lavoura-Floresta
LI	- Limite Inferior
LiDAR	- <i>Light Detection and Ranging</i>
LPF	- Lavoura-Pecuária-Floresta
LS	- Limite Superior
Máx.	- Valor Máximo
MBB	- <i>Minimum Bounding Box Method</i>
MC	- <i>Monte Carlo Method</i>
MCD	- Diâmetro Máximo da Copa
MDS	- <i>Maximum Distance Method</i>
Mín.	- Valor Mínimo
MQG	- Mínimos Quadrados Generalizados
n	- Número de Observações
ND	- Não definido
NITA	- Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária
NO	- Noruega
OC	- <i>Optimal Circle Method</i>
PF	- Pecuária-Floresta

QSM	- <i>Quantitative Structure Modeling</i>
\hat{R}	- Coeficiente Angular Estimado (Razão)
r	- Correlação de Pearson
R^2_{aj}	- Coeficiente de Determinação Ajustado
RMSE	- Raiz do Erro Quadrático Médio
S	- Sortimento
s	- Desvio Padrão
SIPA	- Sistemas Integrados de Produção Agropecuária
SK	- Eslováquia
S_{yx}	- Erro Padrão da Estimativa Absoluto
$S_{yx\%}$	- Erro Padrão da Estimativa Relativo
TLS	- <i>Terrestrial Laser Scanning</i>
V	- Volume com Casca
V_0	- Volume do Toco
VC	- Volume da Copa
V_e	- Volume Estimado
VANT	- Veículo Aéreo não Tripulado
V_c	- Volume do Cone
V_i	- Volume Intermediário
$V_{ind.}$	- Volume Individual total
V_p	- Volume Parcial
V_t	- Volume Total
W	- Teste de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk
WOS	- <i>Web of Science</i>

SUMÁRIO

ESTRUTURAÇÃO	24
1 ASPECTOS GERAIS DA PESQUISA	25
1.1 INTRODUÇÃO GERAL	25
1.2 HIPÓTESES	27
1.3 OBJETIVOS	28
1.3.1 Objetivo Geral	28
1.3.2 Objetivos Específicos	28
2 ESTADO DA ARTE DO TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS	29
2.1 INTRODUÇÃO	29
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	30
2.2.1 Levantamento Bibliográfico	30
2.2.2 Análise do Levantamento Bibliográfico	31
2.3 RESULTADOS	31
2.3.1 Resultados do Levantamento Bibliográfico	31
2.3.2 Análise das Publicações Científicas	32
2.4 DISCUSSÕES	38
2.4.1 Aplicações e Perspectivas do Uso da Tecnologia TLS	38
2.4.1.1 Registro das nuvens de pontos 3D	38
2.4.1.2 Separação da madeira e folhas	41
2.4.1.3 Detecção de árvores	43
2.4.1.4 Altura das árvores	44
2.4.1.5 Diâmetro à altura do peito (DAP)	46
2.4.1.6 Estrutura da copa	48
2.4.1.7 Estimativa do volume e biomassa	49
2.4.1.8 Outras aplicações	50
2.5 CONSIDERAÇÕES	51
3 ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL DE ÁRVORES DE EUCALIPTO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS INTEGRADOS COM O USO DE TLS	53
3.1 INTRODUÇÃO	53
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	56
3.2.1 Dados Experimentais	56
3.2.1.1 Área de estudo	56

3.2.1.2 Cubagem	58
3.2.1.3 Amostragem	62
3.2.1.4 TLS	64
3.2.2 Processamento - Volume das Árvores com Dados de Cubagem.....	67
3.2.3 Processamento - TLS.....	68
3.2.3.1 Registro e remoção de ruídos das nuvens 3D.....	68
3.2.3.2 Extração de variáveis	71
3.2.4 Estimativa do Volume Individual com Base em Volumes Parciais Obtidos do TLS 74	
3.2.4.1 Etapa 01. Modelagem do volume - Equações de volume.....	74
3.2.4.2 Etapa 02. Estimativa do volume - Amostragem e TLS	76
3.2.4.3 Etapa 03. Cálculo dos volumes parciais - TLS	79
3.2.4.4 Etapa 04. Estimativa do volume individual utilizando TLS.....	80
3.3 RESULTADOS	82
3.3.1 Estatísticas Descritivas para Variáveis Obtidas na Cubagem	82
3.3.2 Estatísticas Descritivas para as Variáveis Obtidas na Amostragem e TLS	82
3.3.3 Modelagem do Volume - Equações de Volume	83
3.3.4 Estimativa do Volume - Amostragem e TLS.....	84
3.3.5 Cálculo dos Volumes Parciais - TLS	86
3.3.6 Estimativa do Volume Total Individual Utilizando o TLS	87
3.4 DISCUSSÕES.....	92
3.5 CONCLUSÕES	96
4 VOLUME POR SORTIMENTO DE MADEIRA DE EUCALIPTO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS INTEGRADOS COM O USO DE TLS.....	97
4.1 INTRODUÇÃO	97
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	100
4.2.1 Dados Experimentais e Processamento - Dados TLS.....	100
4.2.2 Sortimentos de Madeira	100
4.2.2.1 Etapa 1. Métodos.....	101
4.2.2.2 Etapa 2. Ajuste do Polinômio do 5º Grau (Schöpfer, 1966).....	103
4.2.2.3 Etapa 3. Obtenção dos Sortimentos de Madeira	104
4.2.2.4 Etapa 4. Avaliação dos Sortimentos de Madeira	105
4.3 RESULTADOS	106
4.3.1 Estatísticas Descritivas.....	106

4.3.2 Sortimentos de Madeira	106
4.3.2.1 Métodos.....	106
4.3.2.2 Ajuste do Polinômio do 5º Grau (Schöpfer, 1966)	107
4.3.2.3 Obtenção de Sortimentos de Madeira	108
4.3.2.4 Avaliação dos Sortimentos de Madeira	109
4.4 DISCUSSÕES.....	114
4.5 CONCLUSÕES	120
RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	121
REFERÊNCIAS.....	123
APÊNDICE 1. REGISTRO DE NUVENS DE PONTOS 3D NO SOFTWARE SCENE	
131	
APÊNDICE 2. EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS DE INTERESSE DA NUVEM DE	
PONTOS 3D NO R.....	146
APÊNDICE 3. AJUSTE DE MODELOS VOLUMÉTRICOS NO R.....	149

ESTRUTURAÇÃO

A presente tese foi desenvolvida em quatro capítulos, e está estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1 - Aspectos Gerais da Pesquisa: corresponde a uma introdução geral dos assuntos tratados na presente tese. Nele, são apresentados os contextos e fundamentos que embasam o estudo.

Capítulo 2 - Estado da Arte do TLS em Aplicações Florestais: foi desenvolvida uma revisão bibliográfica da literatura, com foco no uso do TLS em plantios florestais nos últimos 10 anos (de 2012 a 2022). São abordados os avanços, desafios e tendências relacionados ao tema.

Capítulo 3 - Estimativa do Volume Individual de Árvores de Eucalipto em Sistemas Agroflorestais Integrados com o Uso de TLS: é apresentada a rotina de processamento das nuvens de pontos obtidas pelo TLS. O objetivo é quantificar o volume total individual de madeira das árvores de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), utilizando representações parciais do fuste das árvores.

Capítulo 4 - Volume por Sortimento de Madeira de Eucalipto em Sistemas Agroflorestais Integrados com o Uso de TLS: são apresentadas metodologias para a estimativa dos diâmetros em diferentes alturas do fuste das árvores. Essas estimativas são baseadas nos diâmetros e alturas obtidos do TLS na porção do fuste livre de galhos e serviram de base para as estimativas dos volumes por sortimento de madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage, em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF).

Essa estrutura de capítulos contribui para a compreensão e aprofundamento dos resultados obtidos na pesquisa.

1 ASPECTOS GERAIS DA PESQUISA

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

Globalmente, as florestas cobrem cerca de 4,06 bilhões de hectares. Dentre essas áreas florestais, aproximadamente 93% são florestas de regeneração natural, enquanto as florestas plantadas correspondem a 7% (FAO, 2020). Os cinco países com as maiores extensões de florestas são: Rússia (com 815 milhões de hectares), Brasil (com 497 milhões), Canadá (com 347 milhões), Estados Unidos (com 310 milhões) e China (com 220 milhões), totalizando mais de 54% da área florestal global (FAO, 2020). Desde 1990, a área de florestas plantadas aumentou em 123 milhões de hectares, sendo que 44% desses plantios são compostos principalmente por espécies introduzidas (FAO, 2020).

Em 2022, os plantios de espécies do gênero *Eucalyptus* totalizaram 7,6 milhões de hectares, representando 76% do total de área plantada no Brasil (IBÁ, 2023). No ano anterior, em 2021, a produtividade do gênero *Eucalyptus* atingiu seu maior nível, chegando a 38,9 m³/ha/ano (IBÁ, 2022). As espécies do gênero *Eucalyptus* são amplamente utilizadas como componente florestal em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) (RUZA *et al.*, 2021; MUNARO *et al.*, 2023), também conhecidos como sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF).

A associação entre elementos agrícolas, animais e florestais é uma excelente alternativa para minimizar as emissões de gases de efeito estufa (FERREIRO-DOMÍNGUEZ *et al.*, 2016; CARON *et al.*, 2019; MUNARO *et al.*, 2023), podendo até se tornar um sistema mitigador, especialmente em relação ao gás metano. No Sul do Brasil, a espécie *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage é particularmente interessante para o setor florestal, tanto para produção de madeira quanto para energia (TOMIO *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2015). Essa espécie tem sido utilizada em sistemas iLPF devido à sua resistência a baixas temperaturas e à ocorrência de geadas (KRUCHELSKI *et al.*, 2021).

A gestão eficiente da cadeia de abastecimento de produtos de madeira é uma tarefa complexa, mesmo no contexto dos plantios florestais. Isso ocorre porque a qualidade dos produtos e, conseqüentemente, os preços da madeira, dependem de diversos fatores internos (características da própria madeira) e externos (ambiente e

manejo) (PULETTI *et al.*, 2019). Nesse contexto, a avaliação precisa da forma e dimensões do tronco das árvores desempenha um papel crucial no processo de produção (PULETTI *et al.*, 2019; HUNČAGA *et al.*, 2020). Por meio dessa avaliação, é possível garantir a qualidade da madeira, otimizar o processo de produção e tomar decisões eficientes no manejo florestal.

Para estimar o volume de multiprodutos da madeira, comumente são utilizadas funções de afilamento (*taper*). O termo “*taper*” refere-se à taxa de decréscimo do diâmetro ao longo do fuste da árvore (CAMPOS e LEITE, 2017). Essas funções são baseadas em equações que permitem estimar o diâmetro em qualquer altura ao longo do fuste, utilizando as variáveis diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total. Além disso, essas funções também são aplicadas para estimar a altura em que um determinado diâmetro ocorre e o volume de diferentes partes do fuste da árvore (CAMPOS e LEITE, 2017).

Ao integrar uma equação de afilamento, obtém-se o volume de madeira existente entre os limites de integração. Esse procedimento é denominado sortimento e permite estimar o volume em qualquer altura ao longo do fuste da árvore (BERNARDI *et al.*, 2021). O sortimento possibilita maximizar o aproveitamento da árvore, o que permite a quantificação da matéria-prima de acordo com suas dimensões e qualidade, ao considerar os múltiplos usos da madeira (MÜLLER *et al.*, 2005).

Os atributos individuais das árvores são medidos em levantamentos de campo e depois agregados para obter as estimativas dos parâmetros florestais em nível do povoamento (SHIMIZU *et al.*, 2022). Os levantamentos de campo são comumente efetuados com base em parcelas amostrais e resultam em custo e esforços para obter atributos das árvores com exatidão. Métodos confiáveis e econômicos para quantificar atributos de árvores e florestas são desejados para o manejo florestal operacional (SHIMIZU *et al.*, 2022).

Nesse sentido, o sensoriamento remoto desempenha um papel crucial na área de inventário florestal. A varredura a laser, também conhecida como *Light Detection and Ranging* (LiDAR), tem sido amplamente reconhecida como uma técnica não destrutiva e representa uma alternativa valiosa para a aquisição de dados em inventários florestais. Além disso, o LiDAR pode ser considerado uma das principais técnicas que aumentam a acurácia e eficiência das medições (KO *et al.*, 2022).

O *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) é uma ferramenta eficaz para coletar nuvens de pontos tridimensionais (3D) densas e altamente detalhadas das árvores, com coordenadas (WAN *et al.*, 2021; DEMOL *et al.*, 2021; KO *et al.*, 2022). No contexto de inventários florestais, o TLS permite a aquisição rápida e detalhada dos perfis do fuste das árvores, superando os instrumentos convencionais (RAUMONEN *et al.*, 2013; PAULETTI *et al.*, 2019; WAN *et al.*, 2021; DEMOL *et al.*, 2021).

Várias técnicas de modelagem foram desenvolvidas para reconstruir realisticamente a forma das árvores a partir de dados de nuvens de pontos. A partir dessas técnicas, é possível derivar o volume total da árvore (RAUMONEN *et al.*, 2013). Estudos de validação têm demonstrado boa concordância entre as estimativas de volume derivadas do TLS e os volumes avaliados destrutivamente, correspondendo ao método tradicionalmente empregado (HACKENBERG *et al.*, 2015; DEMOL *et al.*, 2021).

O TLS oferece muitas vantagens na aquisição de dados florestais, mas também enfrenta desafios. Um dos desafios enfrentados é a oclusão, que ocorre quando galhos, folhas ou sobreposição de árvores bloqueiam a visibilidade do laser, impedindo a penetração efetiva dos pulsos laser emitidos pelo sensor LiDAR (YRTTIMAA *et al.*, 2020; KO *et al.*, 2022, TIENAHO *et al.*, 2022). Isso prejudica a identificação precisa das árvores e a extração de variáveis como os diâmetros ao longo do fuste e a altura total, comprometendo a confiabilidade das estimativas dos volumes.

1.2 HIPÓTESES

Com base nas informações apresentadas, a primeira hipótese da tese é de que o problema de oclusão no TLS, que afeta as estimativas dos volumes das árvores, pode ser superado ao ser utilizada uma porção do fuste da árvore, livre de galhos, para estimar o volume total individual por meio do TLS.

A segunda hipótese é de que métodos que permitam estimar os diâmetros ao longo do fuste, na porção da copa, podem servir de base para a estimativa dos volumes dos sortimentos de madeira por meio do TLS, com resultados estatisticamente compatíveis aos métodos tradicionalmente aplicados na área florestal, que envolvem a derrubada e cubagem das árvores.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Superar as limitações associadas ao uso dos dados coletados com TLS, devido à oclusão causada pela presença de galhos no fuste das árvores, na estimativa do volume individual total e por sortimento de madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF).

1.3.2 Objetivos Específicos

Objetivos específicos:

(a) Realizar o levantamento bibliográfico da literatura visando reunir as publicações que abordem o uso da tecnologia TLS em plantios florestais nos últimos 10 anos (2012 a 2022);

(b) Desenvolver e propor rotinas de processamento para os dados TLS;

(c) Utilizar porções do fuste da árvore, livre de galhos, para estimar o volume total individual de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage, em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF);

(d) Estimar os diâmetros ao longo do fuste com base nos diâmetros e alturas obtidos com o TLS na porção do fuste livre de galhos e estimar os sortimentos de madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage, em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF); e

(e) Avaliar o desempenho das estimativas obtidas com a tecnologia TLS em comparação com as técnicas de inventários florestais convencionais.

2 ESTADO DA ARTE DO TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS

2.1 INTRODUÇÃO

As florestas globais cobrem uma extensão total de aproximadamente 4,06 bilhões de hectares, sendo subdivididas em florestas nativas, que ocupam 3,74 bilhões de hectares (representando 93% do total), e florestas plantadas, com 291 milhões de hectares (correspondendo a 7%) (FAO, 2020). Desde 1990, a área de florestas plantadas aumentou em 123 milhões de hectares, dos quais 44% consistem principalmente de espécies introduzidas (FAO, 2020).

Os plantios florestais desempenham um papel crucial na economia mundial e têm impactos significativos na sociedade e no meio ambiente (FENG e AUDY, 2020). A cadeia produtiva do setor florestal abrange várias etapas, desde o plantio e manejo sustentável das árvores até a produção e comercialização de produtos florestais. A sustentabilidade e a gestão responsável dos plantios são essenciais para garantir o equilíbrio entre a produção e a conservação dos recursos naturais.

Para tanto, é essencial conhecer as características das árvores em povoamentos florestais a fim de serem obtidas variáveis importantes utilizadas nas estimativas da produção dessas áreas (HUNČAGA *et al.*, 2020). Nesse contexto, o sensoriamento remoto desempenha um papel crucial no inventário florestal. O *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) utiliza a tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR) para a coleta de dados de campo em inventários florestais, possibilitando a rápida aquisição dessas informações. Com o TLS, é possível obter detalhes precisos sobre a estrutura das árvores, como altura, diâmetro e densidade da copa, contribuindo para uma gestão mais eficiente e sustentável das florestas.

O LiDAR é um sistema de sensoriamento remoto ativo que emite energia, a qual retorna ao sensor após interagir com um objeto. Essas informações geradas podem ser registradas em grande escala por superfícies tridimensionais (FERNÁNDEZ-SARRÍA *et al.*, 2013). No ambiente florestal, abordagens não destrutivas e acuradas para coleta de dados são essenciais. Nesse cenário, o TLS se destaca como um método rápido para se obter nuvens de pontos tridimensionais de alta densidade com precisão milimétrica (HUNČAGA *et al.*, 2020).

A maximização do potencial de aplicação do TLS na área florestal depende de compreensão aprofundada de suas aplicações específicas já experienciadas em

plantios florestais. Assim, a revisão da literatura é uma etapa estratégica para orientar a aplicação bem-sucedida do TLS no inventário florestal moderno. A identificação das pesquisas conduzidas e dos avanços já alcançados com o uso do TLS permitirá uma fundamentação sólida para o desenvolvimento de protocolos eficazes de aplicação dessa tecnologia inovadora no inventário florestal.

Diante do exposto, foi proposta a apresentação das pesquisas conduzidas com TLS em plantios florestais nos últimos 10 anos (2012 a 2022). O objetivo foi quantificar as publicações, identificar os sensores utilizados e descrever as aplicações e perspectivas do uso do TLS.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Levantamento Bibliográfico

A presente revisão da literatura teve como objetivo responder à seguinte pergunta de pesquisa: Qual é o conhecimento científico produzido nos últimos 10 anos (2012 a 2022) sobre a utilização do TLS em plantios florestais? Para alcançar esse objetivo foi utilizado dois caminhos de revisão: a revisão sistemática e a revisão remissiva da literatura.

A revisão sistemática foi empregada para obter um primeiro conjunto de artigos do levantamento, abrangendo o ano de 2022. A seguinte expressão foi utilizada para a busca: "*LIDAR TLS AND FOREST*". As buscas foram conduzidas na base de dados textual *Web of Science* (WoS), escolhida por conter um considerável número de periódicos indexados. A revisão remissiva foi utilizada para selecionar um segundo conjunto de artigos, contemplando publicações de 2012 a 2022 citadas pelos autores do primeiro conjunto de artigos. O conjunto final de artigos do levantamento incluiu as seleções provenientes de ambas as revisões.

Para a escolha dos artigos do levantamento foram estabelecidos os seguintes critérios de inclusão: (1) artigos científicos de acesso aberto, (2) artigos publicados no período de 2012 a 2022, (3) artigos de pesquisa, e (4) artigos relacionados à utilização do TLS em plantios florestais. Foram excluídos do levantamento os estudos publicados em outras fontes que não sejam artigos científicos e os artigos científicos nos quais o TLS tenha sido utilizada fora do contexto de plantios florestais.

2.2.2 Análise do Levantamento Bibliográfico

A análise dos dados do levantamento bibliográfico consistiu na construção das seguintes caracterizações:

- 1) Tabela com a relação de artigos, autores, ano de publicação e idioma utilizado;
- 2) Gráfico com a frequência de publicações por ano;
- 3) Gráfico com as revistas e número de publicações em cada revista;
- 4) Nuvem de palavras com as palavras-chave utilizadas pelos autores;
- 5) Mapa com a localização das áreas de estudo;
- 6) Tabela com as publicações, sensor TLS utilizado e espécies empregadas nos estudos; e
- 7) Tabela com a relação de assuntos abordados, os quais foram a base para as discussões.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Resultados do Levantamento Bibliográfico

Na revisão sistemática, ao aplicar a formulação de busca na plataforma *Web of Science* (WoS), foram identificadas 504 publicações científicas, das quais 309 estavam disponíveis em acesso aberto. Dentre essas, apenas 58 corresponderam a artigos científicos publicados no ano de 2022. Após a leitura dos resumos, 39 artigos foram pré-selecionados, e, posteriormente, após a leitura integral dos artigos, sete foram escolhidos para inclusão no levantamento.

Na revisão remissiva, das 389 referências avaliadas, 81 artigos científicos foram pré-selecionados após a análise dos resumos, abordando o uso do TLS. Após a leitura completa desses artigos, 12 foram selecionados por descreverem o uso do TLS em plantios florestais.

No levantamento bibliográfico, um total de 19 artigos científicos produzidos entre os anos de 2012 e 2022, que discutem o uso do TLS em plantios florestais, foram selecionados e estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. CONJUNTO DE ARTIGOS SELECIONADOS NO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE O USO DA TECNOLOGIA TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS

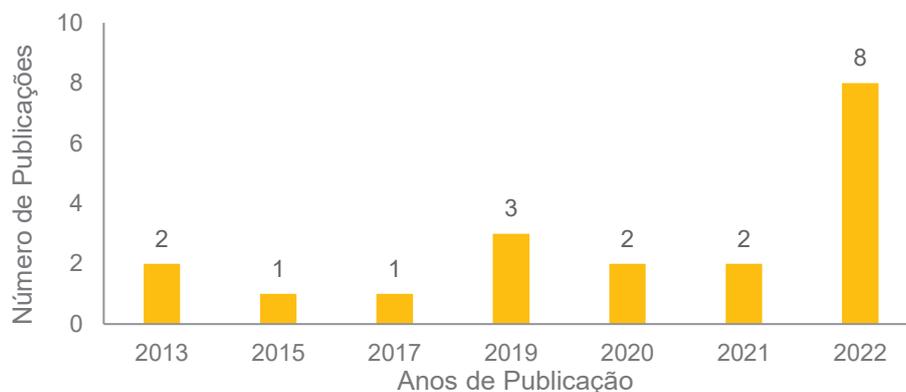
n	Autor e Ano	Título	Idioma
1	Bayer et al. (2013)	Structural crown properties of Norway spruce (<i>Picea Abies</i> L. Karst.) and European Beech (<i>Fagus Sylvatica</i> L.) in mixed versus pure stands revealed by terrestrial laser scanning	ENG
2	Raumonen et al. (2013)	Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data	ENG
3	Hackenberg et al. (2015)	Nondestructive method for biomass prediction combining TLS derived tree volume and wood density	ENG
4	Koreň et al. (2017)	Accuracy of tree diameter estimation from terrestrial laser scanning by circle-fitting methods	ENG
5	Puletti et al. (2019)	Evaluating the eccentricities of poplar stem profiles with terrestrial laser scanning	ENG
6	Pyörälä et al. (2019)	Assessing log geometry and wood quality in standing timber using terrestrial laser-scanning point clouds	ENG
7	Guan et al. (2019)	A novel framework to automatically fuse multiplatform LiDAR data in forest environments based on tree locations	ENG
8	Guan et al. (2020)	A marker-free method for registering multi-scan terrestrial laser scanning data in forest environments	ENG
9	Yrttimaa et al. (2020)	Performance of Terrestrial Laser Scanning to characterize managed Scots Pine (<i>Pinus Sylvestris</i> L.) stands is dependent on forest structural variation	ENG
10	Demol et al. (2021)	Consequences of vertical basic wood density variation on the estimation of aboveground biomass with terrestrial laser scanning	ENG
11	Wan et al. (2021)	A novel and efficient method for wood-leaf separation from terrestrial laser scanning point clouds at the forest plot level	ENG
12	Dai et al. (2022a)	Multisource forest point cloud registration with semantic-guided keypoints and robust RANSAC mechanisms	ENG
13	Dai et al. (2022b)	A comparison of the performances of Unmanned-Aerial-Vehicle (UAV) and Terrestrial Laser Scanning for forest plot canopy cover estimation in <i>Pinus massoniana</i> forests	ENG
14	Demol et al. (2022)	Volumetric overestimation of small branches in 3D reconstructions of <i>Fraxinus excelsior</i>	ENG
15	Ko et al. (2022)	The application of terrestrial light detection and ranging to forest resource inventories for timber yield and carbon sink estimation	ENG
16	Ronoud et al. (2022)	Terrestrial laser scanning in assessing the effect of different thinning treatments on the competition of Scots Pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) forests	ENG
17	Shimizu et al. (2022)	Integrating terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry to estimate individual tree attributes in managed coniferous forests in Japan	ENG
18	Tienaho et al. (2022)	Assessing structural complexity of individual Scots Pine trees by comparing terrestrial laser scanning and photogrammetric point clouds	ENG
19	Zhang et al. (2022)	Simulating wind disturbances over rubber trees with phenotypic trait analysis using terrestrial laser scanning	ENG

2.3.2 Análise das Publicações Científicas

No ano de 2022 foi registrado o maior número de publicações sobre o uso do TLS em plantios florestais, totalizando oito publicações, o que representa 42,10% do conjunto. Em 2019 foram produzidas três publicações (15,79%), enquanto nos anos

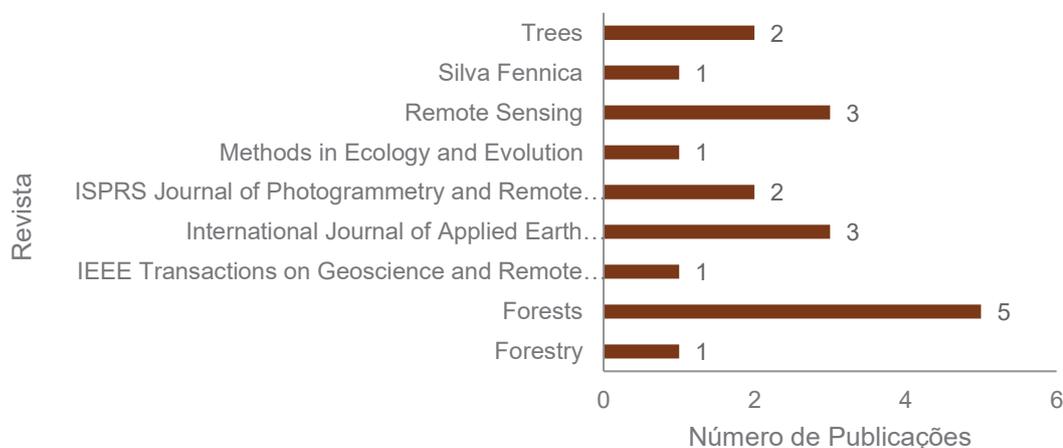
2021, 2020 e 2013 contaram com duas publicações em cada um deles (10,53%) (Figura 1).

FIGURA 1. FREQUÊNCIA DE ARTIGOS PUBLICADOS ANUALMENTE SOBRE O USO DA TECNOLOGIA TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS



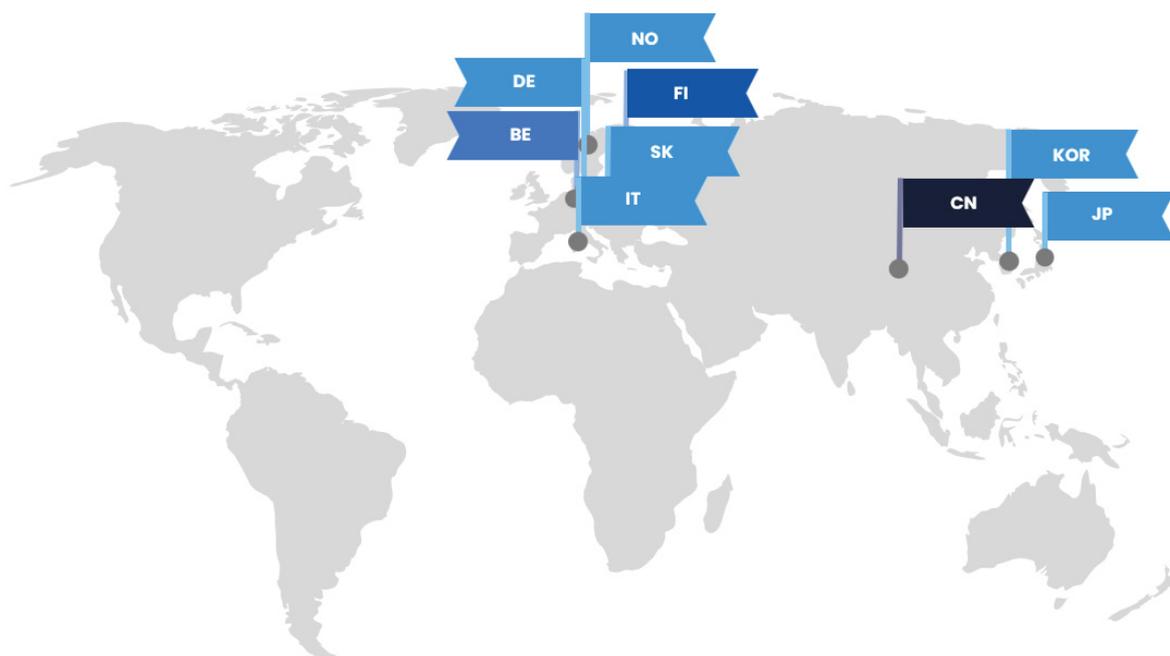
Os 19 artigos selecionados no levantamento foram publicados em nove revistas (Figura 2). A revista *Forests* apresentou o maior número de publicações, total de cinco artigos (26,32%). Já os demais artigos foram publicados nas revistas: *Remote Sensing* (15,79%), *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (15,79%), *Trees* (10,53%), *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (10,53%), *Forestry* (5,26%), *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (5,26%), *Methods in Ecology and Evolution* (5,26%) e *Silva Fennica* (5,26%).

FIGURA 2. NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE O USO DA TECNOLOGIA TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS, NO PERÍODO DE 2012 A 2022, ORGANIZADOS POR REVISTA



A nuvem de palavras, gerada com base nas palavras-chaves utilizadas pelos autores ao abordarem o uso do TLS em plantios florestais, revelou as seguintes dez

FIGURA 4. LOCAIS DE ESTUDO UTILIZADOS NAS PUBLICAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DO TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS, DE 2012 A 2022



FONTE: A autora (2023).

Com relação às espécies abordadas nos 19 estudos, constatou-se a utilização de 18 espécies distintas. O *Pinus sylvestris* aparece como alvo de estudo em oito publicações, *Fagus sylvatica* e *Pinus massoniana*, em três publicações e *Cryptomeria japonica*, *Fraxinus excelsior*, *Picea abies* e *Pinus tabuliformis*, em duas publicações. Já as demais espécies como: *Acer platanooides*, *Betula papyrifera*, *Chamaecyparis pisifera*, *Erythrophleum fordii*, *Hevea brasiliensis*, *Larix decidua*, *Larix gmelinii*, *Populus nigra*, *Quercus petraea*, *Styphnolobium japonicum* e *Taxodium distichum* aparecem apenas em uma publicação.

Nos estudos selecionados no levantamento, os sensores TLS mais utilizados foram da marca [RIEGL](http://www.riegl.com/) (<http://www.riegl.com/>), presente em oito estudos. As marcas mencionadas foram: RIEGL LMS-Z420i; RIEGL VZ-1000; RIEGL VZ-400; e RIEGL VZ-400i. Desses, o mais utilizado foi o RIEGL VZ-400 (Tabela 2 e Tabela 3). A segunda marca mais utilizada foi a [Trimble®](https://trimble.com.br/) (<https://trimble.com.br/>), presente em quatro publicações, sendo Trimble TX5 o sensor utilizado. As marcas com menor frequência foram [Leica](https://leica-geosystems.com/pt-br/) (<https://leica-geosystems.com/pt-br/>), sensores Leica HDS6100 e Leica RTC360 e a marca [FARO](https://www.faro.com/pt-BR/) (<https://www.faro.com/pt-BR/>), sensores FARO Focus 3D 120 e FARO Focus 3D 130. Já as marcas [Zoller+Fröhlich](https://www.zofre.de/) (<https://www.zofre.de/>), [HOKUYO](https://www.hokuyo-aut.jp/) (<https://www.hokuyo-aut.jp/>) e [Hi-target](https://en.hi-target.com.cn/) (<https://en.hi-target.com.cn/>) estiveram presentes em um estudo.

TABELA 2. CONJUNTO DE ARTIGOS SELECIONADOS NO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE O USO DA TECNOLOGIA TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS, TLS E ESPÉCIE UTILIZADA E LOCAL DE ESTUDO

n	Autor e Ano	TLS	Espécie	Local
1	Bayer et al. (2013)	RIEGL LMS-Z420i	<i>Picea abies</i> <i>Fagus sylvatica</i>	NO
2	Raumonen et al. (2013)	Leica HDS6100	<i>Picea abies</i> <i>Pinus sylvestris</i> <i>Acer platanoides</i>	ND
3	Hackenberg et al. (2015)	Z+F IMAGER 5010	<i>Pinus massoniana</i> , <i>Erythrophleum fordii</i> <i>Quercus petraea</i>	CN DE
4	Koreň et al. (2017)	FARO Focus 3D 120	<i>Fagus sylvatica</i>	SK
5	Puletti et al. (2019)	FARO Focus 3D 130	<i>Populus nigra</i>	IT
6	Pyörälä et al. (2019)	Trimble TX5	<i>Pinus sylvestris</i>	FI
7	Guan et al. (2020) ^a	RIEGL VZ-400i	<i>Pinus sylvestris</i> <i>Pinus tabuliformis</i>	CN
8	Guan et al. (2019)	RIEGL VZ-400	<i>Pinus tabuliformis</i> <i>Pinus sylvestris</i>	CN
9	Yrttimaa et al. (2020)	Trimble TX5	<i>Pinus sylvestris</i>	FI
10	Demol et al. (2021)	RIEGL VZ-1000 RIEGL VZ-400	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> <i>Fagus sylvatica</i> <i>Larix decidua</i>	BE
11	Wan et al. (2021)	RIEGL VZ-1000	<i>Betula papyrifera</i> <i>Larix gmelinii</i> <i>Styphnolobium japonicum</i>	ND
12	Dai et al. (2022a)	RIEGL VZ-400	<i>Pinus massoniana</i>	CN
13	Dai et al. (2022b)	RIEGL VZ-400	<i>Pinus massoniana</i>	CN
14	Demol et al. (2022)	RIEGL VZ-400	<i>Fraxinus excelsior</i>	BE
15	Ko et al. (2022)	Leica RTC360	<i>Cryptomeria japonica</i> <i>Chamaecyparis pisifera</i> <i>Taxodium distichum</i>	KOR
16	Ronoud et al. (2022)	Trimble TX5	<i>Pinus sylvestris</i>	FI
17	Shimizu et al. (2022)	UTM-30LX-EM	<i>Cryptomeria japonica</i>	JP
18	Tienaho et al. (2022)	Trimble TX5	<i>Pinus sylvestris</i>	FI
19	Zhang et al. (2022)	HS450	<i>Hevea brasiliensis</i>	CN

Em que: CN é a China; FI é a Finlândia (FI); BE é a Bélgica; KOR é a Coreia do Sul; SK é a Eslováquia; IT é a Itália; JP é o Japão; DE é a Alemanha; NO é a Noruega; e ND é local de estudo não definido.

TABELA 3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS SENSORES TLS UTILIZADOS NAS PUBLICAÇÕES SELECIONADAS NO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

TLS	Precisão (mm)	Campo de visão	Leitura (pts.s ⁻¹)	Alcance (m)
RIEGL VZ-400	5	360° x 100°	122.000	600
RIEGL LMS-Z420i	4	360° x 80°	11.000	1.000
RIEGL VZ-400i	3	360° x 100°	500.000	800
RIEGL VZ-1000	5	360° x 100°	120.000	1.400
Trimble TX5	2	360° x 300°	976.000	0,6-120
Leica HDS6100	2-3	360° x 310°	508.000	-
Leica RTC360	1,9-5,3	360° x 300°	2.000.000	0,5-130
FARO Focus 3D 120	2-10	360° x 300°	976.000	0,6-120
FARO Focus 3D 130	2	360° x 300°	976.000	0,6-130
Zoller+Fröhlich IMAGER 5010	0,5	360° x 320°	1.016.027	187
HOKUYO UTM-30LX-EW	20	360° x 270°	1.940.000	0,1-30
Hi-target HS 450D	8	360° x 100°	500.000	-

De maneira geral, os temas abordados nos artigos selecionados no levantamento bibliográfico envolveram o registro de nuvens de pontos 3D, extração de métricas dessas nuvens e aplicações do TLS. Para facilitar a compreensão, esses temas foram classificados em 8 categorias (Tabela 4).

TABELA 4. RELAÇÃO DE ASSUNTOS LIGADOS AO USO DO TLS EM PLANTIOS FLORESTAIS E RESPECTIVAS PUBLICAÇÕES

Assunto	Autores
Registro de nuvens de pontos 3D	(GUAN <i>et al.</i> , 2020), (DAI <i>et al.</i> , 2022a) e (GUAN <i>et al.</i> , 2019)
Separação de madeira e folhas	(RAUMONEN <i>et al.</i> , 2013), (WAN <i>et al.</i> , 2021) e (DEMOL <i>et al.</i> , 2022)
Deteccção de árvores	(KO <i>et al.</i> , 2022), (TIENAHO <i>et al.</i> , 2022) e (SHIMIZU <i>et al.</i> , 2022)
Altura das árvores	(KO <i>et al.</i> , 2022), (YRTTIMAA <i>et al.</i> , 2020), (TIENAHO <i>et al.</i> , 2022) e (SHIMIZU <i>et al.</i> , 2022)
Diâmetro à altura do peito (DAP)	(YRTTIMAA <i>et al.</i> , 2020), (SHIMIZU <i>et al.</i> , 2022), (PULETTI <i>et al.</i> , 2019) e (KOREŇ <i>et al.</i> , 2017)
Estrutura da copa	(BAYER <i>et al.</i> , 2013) e (DAI <i>et al.</i> , 2022b)
Estimativa de volume e biomassa	(HACKENBERG <i>et al.</i> , 2015) e (SHIMIZU <i>et al.</i> , 2022)
Outras aplicações	(TIENAHO <i>et al.</i> , 2022), (RONOUD <i>et al.</i> , 2022), (DEMOL <i>et al.</i> , 2021), (PYÖRÄLÄ <i>et al.</i> , 2019) e (ZHANG <i>et al.</i> , 2022)

2.4 DISCUSSÕES

2.4.1 Aplicações e Perspectivas do Uso da Tecnologia TLS

No inventário de recursos florestais, a utilização de dispositivos de varredura a laser permite a aquisição de dados espaciais tridimensionais, por meio de nuvens de pontos com coordenadas (KO *et al.*, 2022). A varredura a laser é amplamente reconhecida como uma técnica não destrutiva que se apresenta como alternativa nos inventários florestais, sendo uma das principais técnicas que propiciam maior exatidão e eficiência das medições (KO *et al.*, 2022).

De acordo com o tipo de sensor utilizado, diversos tipos de *Light Detection and Ranging* (LiDAR) podem ser empregados em satélites, aviões, veículos ou equipamentos terrestres. Na área florestal, destaca-se o *scanner a laser* aerotransportado (*Airborne Laser Scanning*, ALS) e o terrestre (*Terrestrial Laser Scanning*, TLS) como opções comumente aplicadas (KO *et al.*, 2022).

O *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) é uma tecnologia eficaz para a obtenção de nuvens de pontos tridimensionais (3D) densas e altamente detalhadas de árvores (WAN *et al.*, 2021; DEMOL *et al.*, 2021). Essa abordagem possibilita a análise quantitativa de árvores e a reconstrução de modelos quantitativos, fornecendo dados úteis para o desenvolvimento de modelos estatísticos aprimorados para os atributos das árvores (RAUMONEN *et al.*, 2013).

Ronoud *et al.* (2022) explicam que a acurácia do TLS na caracterização da estrutura 3D de uma floresta depende de diversos fatores, como a configuração da varredura, os algoritmos utilizados na detecção e reconstrução de árvores, e a integridade das nuvens de pontos, sendo esses os principais determinantes que limitam a aplicação do TLS em medições florestais. A seguir, são descritas algumas das aplicações e perspectivas do uso do TLS em plantios florestais.

2.4.1.1 Registro das nuvens de pontos 3D

Um desafio para a aplicação em larga escala da varredura *laser* terrestre no manejo e estudos florestais é o registro automático de dados TLS provenientes de múltiplas varreduras com alta acurácia (GUAN *et al.*, 2020). Os autores destacam que,

para aplicações florestais do TLS multivarredura, o registro das nuvens de pontos TLS é um requisito prévio.

Características externas geralmente são necessárias para registrar nuvens de pontos coletadas de diferentes locais de varredura (GUAN *et al.*, 2019). Existem três estruturas de registro de nuvem de pontos comumente utilizadas, incluindo métodos baseados em alvos, recursos e pontos. Um dos métodos mais comuns envolve a configuração manual de alvos de registro no ambiente de varredura, realizando o registro das varreduras TLS, identificando e combinando manualmente esses alvos a partir das nuvens de pontos (GUAN *et al.*, 2020).

Guan *et al.* (2020) explicam que inúmeros esforços foram empregados no desenvolvimento de métodos sem marcadores para registrar dados TLS de varredura múltipla em ambientes florestais. Esses métodos geralmente utilizam atributos individuais da árvore. No entanto, apesar de promissores, esses métodos demandam atributos individuais específicos da árvore, como localização, altura, diâmetro à altura do peito (DAP) e mapas do tronco, sendo obtidos por meio de diversas etapas de pós-processamento (GUAN *et al.*, 2020; DAI *et al.*, 2022a).

Guan *et al.* (2020) propuseram um algoritmo sem marcadores para registrar com acurácia dados TLS de varredura múltipla em áreas florestais, sem a necessidade de processar dados TLS brutos para extrair atributos individuais das árvores. Os autores explicam que o princípio do algoritmo proposto é identificar e utilizar áreas sombreadas em nuvens de pontos TLS brutas como o recurso principal para corresponder às varreduras TLS adjacentes.

O estudo dos autores foi conduzido com o uso do sensor *laser* terrestre RIEGL VZ-400 e testado em seis parcelas com diferentes tipos de vegetação. Foi constatado que a acurácia do registro foi equivalente aos resultados do registro manual usando alvos de registro de alta refletância, e qualquer ligeira diferença entre esses dois métodos pode ser atribuída a erros aleatórios do scanner TLS e do algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP) utilizado. Os autores destacam que o método proposto tem potencial para reduzir o tempo e o custo de coleta de dados TLS, ampliando, assim, a aplicação da técnica em estudos florestais de larga escala.

O registro multiplataforma também emerge como uma opção de registro de nuvens de pontos, ganhando espaço na área florestal. Dai *et al.* (2022a) apontam que a varredura laser aérea (ALS) apresenta alta eficiência e flexibilidade no mapeamento da camada do dossel florestal, no entanto, capta pontos insuficientes da camada do

sub-bosque. O sistema terrestre (TLS) pode fornecer observações complementares da camada do sub-bosque na direção vertical, embora sofra oclusões na direção horizontal quando utilizada uma varredura única, o que pode representar um desafio na caracterização da estrutura florestal.

Dai *et al.* (2022a) afirmam que o registro de nuvens de pontos multiplataforma, incluindo o registro TLS-TLS de diferentes varreduras terrestres e o registro ALS-TLS de varreduras terrestres-aéreas, é um pré-requisito para compreensão com exatidão das estruturas horizontais e verticais da floresta.

Dai *et al.* (2022a) utilizaram o LiDAR terrestre *RIEGL VZ-400* e o LiDAR aéreo *R-Fans-16* para o registro de nuvens de pontos multiplataforma sem o uso de marcadores. Os autores propuseram um novo detector de pontos-chave (WRI) para o registro e neles foi apresentado o algoritmo RANSAC para aumentar a eficiência e acurácia do registro. Os autores concluíram que o método proposto propiciou bom desempenho em acurácia e em eficiência de registro, superando o método tradicional. O detector WRI representou repetibilidade e descritividade confiáveis nos registros TLS-TLS e ALS-TLS. O algoritmo RANSAC modificado pode propiciar a correspondência de forma eficaz.

Guan *et al.* (2019) propuseram uma nova estrutura de registro de dados oriundos do LiDAR multiplataforma para aplicações florestais baseada na distribuição espacial única de árvores em um povoamento florestal, com pares de árvores identificados a partir de dados LiDAR multiplataforma como os únicos recursos necessários no processo de registro. O estudo foi conduzido em três locais um plantio florestal, onde as espécies dominantes foram *Pinus sylvestris* e *Pinus tabuliformis*.

Para o registro das nuvens de pontos foram utilizados três plataformas de coleta de dados LiDAR amplamente utilizadas, LiDAR terrestre (*RIEGL VZ-400i*), LiDAR aéreo e um LiDAR de mochila. Concernente à proposta de registro, os autores observaram que a fusão dos conjuntos de dados LiDAR de mochila e ALS-LiDAR alcançou acurácia vertical melhor que 20 cm e horizontal melhor que 30 cm em dois dos três locais. A acurácia do registro de dados TLS multivarredura foi muito maior do que a do registro de dados LiDAR de mochila e ALS-LiDAR. Isso indica que o desempenho da estrutura proposta pode ser melhorado e com aumento da acurácia dos dados produzidos pelo sensor LiDAR.

Os autores indicaram que, embora a acurácia do registro de dados TLS ainda seja inferior a do método de registro manual baseado em alvos de referência, ele pode

ser utilizado como uma etapa preliminar antes da realização do registro manual para aumentar a eficiência. Para estudos futuros foi sugerido considerar o uso de alvos de referência como informações externas para aprimorar ainda mais a acurácia do registro.

2.4.1.2 Separação da madeira e folhas

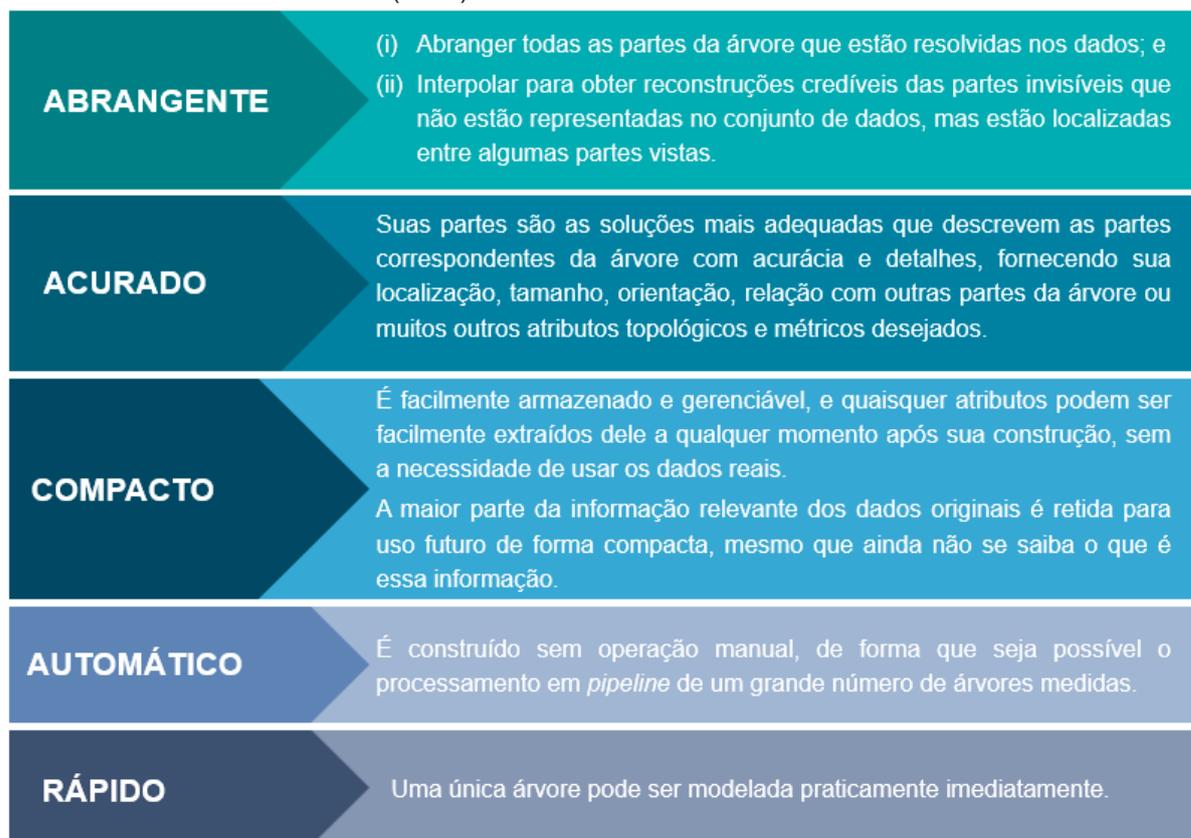
A determinação das características e atributos de qualidade das árvores é importante para o manejo florestal. Raumonon *et al.* (2013) destacam que esses atributos compreendem características geométricas e estatísticas, tais como a altura da base da copa, o volume total acima do solo, a distribuição do tamanho dos galhos e a estrutura dos galhos. A separação entre madeira e folha é uma etapa pré-requisito para a reconstrução de modelos quantitativos de árvores a partir de dados TLS. Contudo, a tarefa desafiadora da separação com exatidão e eficiente dos pontos da madeira e das folhas nos dados TLS persiste (WAN *et al.*, 2021).

Wan *et al.* (2021) indicam que a dificuldade em distinguir os componentes de madeira e folha está relacionada a dois aspectos. Os galhos finos, ramos e folhas na copa se entrelaçam, tornando difícil a distinção. O TLS escaneia árvores do lado de fora da copa e, assim, os galhos podem ficar obscurecidos pela folhagem ou uns pelos outros, resultando em galhos descontínuos e ausentes na nuvem de pontos.

Os tipos de recursos de classificação utilizados na separação entre madeira e folha incluem recursos radiométricos, recursos de forma de onda e recursos geométricos (WAN *et al.*, 2021). Métodos mais recentes desenvolvidos dependem principalmente de características geométricas, que englobam o tamanho, a forma, a localização, a densidade, a rugosidade, a curvatura e outras características de um conjunto de pontos, calculadas a partir das coordenadas 3D dos pontos (WAN *et al.*, 2021).

Para Raumonon *et al.* (2013), muitos desafios na silvicultura, estimativa de biomassa, pesquisa florestal e sensoriamento remoto florestal poderiam ser mais facilmente superados se fosse rotineiramente possível ajustar modelos de árvores às medições TLS, de modo que esses modelos fossem abrangentes, acurados, compactos, automáticos e rápidos (Figura 5).

FIGURA 5. PREMISSAS PARA UM BOM MODELO ESTATÍSTICO SEGUNDO OS AUTORES RAUMONEN *ET AL.* (2013)



FONTE: Adaptado de Raumonen *et al.* (2013).

Levando em consideração essas premissas, Raumonen *et al.* (2013), propuseram um novo método que produz modelos de árvores 3D a partir de dados TLS do sensor *Leica HDS6100*, tendo como alvo do estudo uma árvore da espécie *Picea abies*, duas árvores de *Pinus sylvestris* e uma árvore de *Acer platanooides*. Com base nesse método foi possível realizar análises quantitativas das propriedades estruturais e de tamanho da árvore.

No estudo de Raumonen *et al.* (2013), foram determinados os perfis de tronco e de ramos, ou distribuições estatísticas, como a distribuição do ângulo de ramificação e do tamanho de ramos. A validação com nuvem artificial de pontos, com volume conhecido, revelou uma modelagem completa do fuste e até 90% dos ramos. Na literatura o método é comumente conhecido como *Quantitative Structure Modeling* (QSM) (HACKENBERG *et al.*, 2015).

De acordo com Wan *et al.* (2021), embora alguns métodos baseados em características geométricas e aprendizado de máquina tenham alcançado boa acurácia na separação madeira-folha, esses métodos apresentam desvantagem computacional no processamento de dados TLS em nível de parcela. Os autores

propuseram um método de classificação por segmento para a separação acurada e eficiente de madeira e folhas no nível da parcela. Os autores testaram o método em três parcelas florestais de *Betula papyrifera*, *Larix gmelinii* e *Styphnolobium japonicum*, utilizando dados do scanner a laser terrestre RIEGL VZ-1000 e compararam os resultados com outros dois métodos (CANUPO e LeWoS).

Os resultados obtidos por Wan *et al.* (2021) revelaram que, em termos de acurácia geral da classificação, o método proposto superou os de CANUPO e LeWoS. Para todos os conjuntos de dados, a acurácia média de classificação atingiu 94,05%. Quanto à rapidez, os autores apontaram que o método proposto foi dez vezes mais rápido que os demais com os quais ele foi comparado, mantendo uma acurácia equivalente e até maior.

Demol *et al.* (2022) buscaram compreender os mecanismos subjacentes às reconstruções imprecisas dos ramos e formularam estratégias para melhorar as estimativas do volume lenhoso das árvores baseadas em TLS. Para isso, utilizaram um conjunto de dados único com mais de 250 diâmetros de galhos medidos manualmente, distribuídos em dois indivíduos da espécie *Fraxinus excelsior*, que foram pareados com diâmetros extraídos pelo algoritmo QSM. Os diâmetros derivados de TLS de pequenos galhos ($D < 10$ cm) de árvores com folhas, geralmente foram maiores do que os diâmetros medidos manualmente, com ramos menores e apresentando maiores erros relativos. Esses erros de estimativa resultaram em uma superestimação inicial do volume lenhoso entre 38% e 52%.

Os autores propuseram diversas estratégias para melhorar a acurácia das estimativas do diâmetro dos galhos e do volume lenhoso de árvores. A estratégia mais eficaz foi o procedimento de filtro de dispersão de refletância ou um alinhamento fino melhorado da nuvem de pontos, obtendo uma redução significativa da superestimação original. Entretanto, não foi possível melhorar as estimativas de diâmetro dos ramos com $D < 2,5$ cm, sendo que erros de desalinhamento e espalhamento foram a principal causa dos resultados de baixa acurácia nas reconstruções QSM das árvores.

2.4.1.3 Detecção de árvores

No que diz respeito à detecção de árvores, Ko *et al.* (2022) explicam que o problema de oclusão impede a coleta completa das nuvens de pontos, e uma das

vantagens do método de varredura única TLS é a obtenção rápida de dados. A perda de nuvens de pontos causada pela oclusão e a baixa precisão resultante implicam que o método seja menos aplicável.

Ao comparar e analisar a eficiência e a acurácia do *laser* de mochila (BPLS) e o TLS (Leica RTC360) na obtenção de dados em três parcelas florestais com as espécies *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis pisifera* e *Taxodium distichum*, Ko *et al.* (2022) apontaram que, com relação à detecção das árvores, quando utilizada apenas uma varredura laser, a taxa de detecção do TLS foi de 95% (*C. japonica*), 88,46% (*C. pisifera*) e 100% (*T. distichum*). No caso de múltiplas varreduras, a taxa de detecção do TLS foi de 100% em todas as parcelas.

Em um estudo desenvolvido por Tienaho *et al.* (2022) em povoamentos de *Pinus sylvestris*, a utilização de múltiplas varreduras do TLS (Trimble TX5 3D) resultou em uma taxa média de detecção de árvores de 98,5%. Em parcelas mais esparsas, a taxa de detecção foi de 100%, enquanto em parcelas mais densas, a taxa foi de 96%, devido à oclusão. Esses resultados diferem do estudo de Yrttimaa *et al.* (2020), que em povoamentos de *P. sylvestris*, utilizando o mesmo sensor TLS em múltiplas varreduras, obtiveram uma taxa de detecção de árvores de 98,8%, devido à oclusão causada pela densidade das árvores e vegetação rasteira.

No estudo de Shimizu *et al.* (2022) em plantios de *Cryptomeria japonica*, ao utilizar o TLS (UTM-30LX-EM) com varredura múltipla em duas parcelas, os autores observaram que, embora todas as árvores fossem detectadas corretamente, também ocorreram detecções de falsas árvores, levando a uma taxa de detecção correta de 96,2% (parcela com desbaste) e 80,4% (parcela sem desbaste), devido à presença de árvores mortas na área de estudo.

2.4.1.4 Altura das árvores

No estudo de Ko *et al.* (2022), os autores apontam que, quando utilizadas múltiplas varreduras, o método TLS, em comparação com o método BPLS, apresenta maior qualidade dos ajustes para as medidas de altura. Yrttimaa *et al.* (2020) observaram que, em comparação com as medidas de campo, em média, a altura das árvores foi subestimada em 0,3 m, com Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) de 1,6 m (8,4%).

Tienaho *et al.* (2022) observaram uma diferença média de 34 cm entre as alturas das árvores medidas em campo e as alturas das árvores medidas pelo TLS, em que as alturas das árvores derivadas do TLS foram subestimadas. Em comparação com as medições de campo, o RMSE das alturas das árvores derivadas de nuvens de pontos foi de 1,32 m para TLS. O RMSE foi maior nas parcelas sem tratamento e menor em parcelas com desbastes intensivos.

No estudo de Shimizu *et al.* (2022), os autores utilizaram o TLS (UTM-30LX-EM) juntamente com um veículo aéreo não tripulado (VANT) (DJI Phantom 4 Pro) e propuseram três abordagens para a estimativa das alturas: A1 - A altura das árvores foi obtida diretamente da estimativa do TLS; A2 - A altura das árvores foi estimada a partir da localização das árvores do Modelo Digital de Altura do Dossel (DCHM) e TLS; e A3 - A altura das árvores foi estimada por meio da detecção das copas das árvores com base nas localizações das árvores DCHM e TLS.

Os resultados da primeira abordagem (A1) revelaram que, em comparação com as medições de campo, a altura das árvores foi amplamente subestimada pelo TLS, com um viés de -8,80 m (-27,7%) nas parcelas com desbaste e 7,45 m (-26,2%) nas parcelas sem desbaste. O RMSE foi de 9,16 m (28,9%) e 8,17 m (28,8%) nas parcelas com e sem desbaste, respectivamente. O Coeficiente de Correlação de Concordância (CCC) foi de apenas 0,024 e 0,085, nas parcelas com e sem desbaste, respectivamente.

O viés e outras métricas foram melhoradas quando os dados do TLS foram combinados com os dados do VANT. Utilizando as duas parcelas combinadas, o viés passou a ser de -0,46 m (-1,5%) e 0,36 m (1,2%) nas abordagens (A2) e (A3) respectivamente. O RMSE foi de 1,89 m (6,2%) e 1,77 (5,7%) nas abordagens (A2) e (A3), respectivamente. O CCC aumentou para 0,73 na abordagem (A2) e 0,78 na abordagem (A3). A estimativa da altura das árvores com detecção da copa das árvores (A3) geralmente resultou em maior acurácia em comparação com a estimativa da altura das árvores referentes à sua localização (A2).

2.4.1.5 Diâmetro à altura do peito (DAP)

Com relação à estimativa do diâmetro à altura do peito (DAP), Yrttimaa *et al.* (2020) observaram que o TLS subestimou o DAP em 0,1 cm, com um RMSE de 0,7 cm (3,4%), quando comparado com as medições de campo. No estudo de Ko *et al.* (2022), os autores relataram que, em relação ao TLS, as medidas de altura foram mais exatas do que as do DAP, pois a acurácia do TLS é frequentemente afetada pela oclusão.

Shimizu *et al.* (2022) compararam as estimativas do DAP medidas em campo com os DAP medidos por TLS e obtiveram um RMSE de 2,27 cm (5,0%) na parcela com tratamento de desbastes e 2,54 cm (7,4%) na parcela sem desbaste. Os autores apontam que a alta densidade do povoamento na parcela sem desbaste pode ter diminuído as nuvens de pontos nos fustes, ocasionando as menores acurácias nas estimativas.

Puletti *et al.* (2019) utilizaram um sensor TLS Trimble TX5 com múltiplas varreduras em plantios de Álamos. A mensuração do DAP foi afetada pela densidade do povoamento e da competição anisotrópica. Em comparação com os métodos tradicionais de medição do perfil do fuste, o TLS propiciou uma precisão e exatidão muito maiores. Os autores apontaram que o diâmetro médio para o espaçamento de 4 m foi superior a 38 cm. Quando a distância entre as árvores ao longo da fileira foi de 4,5 m, o diâmetro médio foi de 40,6 cm, enquanto com o espaçamento de 5 m o diâmetro médio foi apenas um milímetro maior do que com 4,5 m de espaçamento. Além disso, a análise evidenciou que, em média, as seções transversais na altura do peito foram comprimidas na direção da linha; elas eram cerca de 1,6 cm menores que as ortogonais.

Koreň *et al.* (2017) compararam cinco métodos de estimativa do diâmetro à altura do peito (DAP) em parcelas de *Fagus sylvatica* (Faias europeias), utilizando dados TLS FARO Focus 3D 120. Os métodos de ajuste de círculo a partir de seções transversais de uma nuvem de pontos TLS foram divididos pelos autores em métodos iniciais e métodos de refinamento. Os métodos iniciais são algoritmos simples baseados em medições de propriedades geométricas básicas do cluster espacial de pontos TLS. Eles podem ser usados para estimativa rápida da posição do tronco e do DAP ou como uma aproximação inicial antes do uso de métodos avançados e correspondem a três métodos: Método da Caixa Delimitadora Mínima (*Minimum*

Bounding Box Method, MBB); Método Centróide (*Centroid Method*, CEN); e Método de Distância Máxima (*Maximum Distance Method*, MDS). Já os métodos de refinamento melhoram a acurácia da posição inicial do círculo e do diâmetro por meio da otimização matemática e correspondem a dois métodos: Método Monte Carlo (*Monte Carlo Method*, MC) e Método do Círculo Ótimo (*Optimal Circle Method*, OC).

Koreň *et al.* (2017) analisaram o comportamento na estimativa do DAP com uma única varredura e com múltiplas varreduras. No caso de uma única varredura, o MBB resulta em tamanho e posição incorretos e com erro na estimativa de DAP. O CEN desloca o centro da árvore em direção à maior densidade de pontos refletidos no tronco, também resultando em erro na estimativa do DAP. O MDS é menos sensível à distribuições irregulares de pontos no perímetro do tronco, busca os pontos mais distantes e apenas alguns pontos refletidos de lados opostos de um tronco são suficientes para estimar corretamente a posição da árvore e o DAP.

Os métodos MC e OC são afetados pela cobertura irregular do tronco pela nuvem de pontos. A função de otimização minimiza a soma das distâncias quadradas dos pontos TLS a um círculo, que se aproxima da seção transversal do tronco. Conseqüentemente, há um deslocamento considerável do círculo de aproximação para o lado de uma seção transversal do tronco com maior densidade de pontos, o que melhora as estimativas das posições e dos DAP.

No caso de árvores escaneadas por múltiplas varreduras, aproximadamente a mesma estimativa de DAP foi alcançada por todos os métodos de ajuste. Os autores pontuam que tais situações são raras em condições florestais reais. A distribuição espacial irregular de árvores, obstáculos de terreno e vegetação rasteira não permite varreduras regulares de todas as árvores na parcela de pesquisa.

Os autores concluíram que o Método do Círculo Ótimo (OC) mostrou ser o método de ajuste mais acurado para a estimativa de DAP a partir de nuvens de pontos em ambos os modos de varredura. Eles afirmaram que algoritmos de ajuste em combinação com procedimentos avançados de processamento de nuvem de pontos, como filtragem de nuvens de pontos, redução de sombreamento, extração do *Digital Elevation Model* (DEM), agrupamento espacial e identificação de árvores, podem levar à utilização eficaz de TLS na silvicultura, inventário florestal, colheita florestal e pesquisa florestal.

2.4.1.6 Estrutura da copa

A extração de uma descrição da estrutura de nuvens de pontos TLS, como uma coleção de linhas conectadas, é chamada de esqueletização e permite uma análise detalhada de características morfológicas, tais como ângulo dos ramos, comprimento dos ramos, curvatura dos ramos, volume da copa e ocupação dos ramos dentro do espaço da copa (BAYER *et al.*, 2013).

Em um estudo de esqueletização, Bayer *et al.* (2013) utilizaram dados coletados pelo sensor *laser scanner* terrestre RIEGL LMS-Z420i para determinar as características morfológicas das espécies *Picea abies* e *Fagus sylvatica*, visando obter informações sobre as estruturas da copa dessas espécies. Para tanto, aplicaram um novo método de esqueletização semi-manual utilizando um *software* especificamente desenvolvido para esse fim.

Os autores destacaram que a abordagem de esqueletização semi-manual facilita a recuperação de estruturas de copa a partir de dados imperfeitos de nuvens de pontos TLS, independentemente da espécie de árvore. A oclusão, densidades de pontos não homogêneas e ruído no conjunto de dados ainda podem ser problemas. Bayer *et al.* (2013) indicam que o estabelecimento de mais posições de varredura e a utilização de um dispositivo TLS mais avançado, como um scanner completo de forma de onda, podem ajudar a superar esses problemas.

Dai *et al.* (2022b) efetuaram uma comparação entre o desempenho de veículos aéreos não tripulados (VANT), utilizando a tecnologia ALS e a varredura a *laser* terrestre para a estimativa de cobertura de dossel de parcelas florestais em plantios de *Pinus massoniana*. Dois métodos foram testados, ambos baseados no modelo de altura do dossel (CHM) e no delineamento individual de árvores (ITD).

Comparado com os dados de referência, o método ALS_CHM foi o mais acurado, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,996 e RMSE de 0,59%, seguido pelo método ALS_ITD, com R^2 de 0,992 e RMSE de 0,82%. Os métodos TLS_ITD ($R^2 = 0,846$, RMSE = 3,64%) e TLS_CHM ($R^2 = 0,541$, RMSE = 6,30%) apresentaram menor precisão. Quando as estimativas de ALS foram diretamente comparadas com as estimativas de TLS, a maioria delas foi maior do que as estimativas de TLS, com uma diferença média de 6,91%.

As estimativas do ALS foram inferiores às estimativas do TLS; isso ocorreu quando os limites da copa foram completos no método ITD nas parcelas simples,

devido às copas serem mais detalhadas na camada intermediária e suprimidas do que no ALS. No método baseado em CHM, os tamanhos razoáveis de pixel CHM para as estimativas de cobertura do dossel foram de 0,07 a 1,2 m para ALS e 0,07 a 1,5 m para TLS. Nessas faixas, as estimativas foram marginalmente influenciadas pelo tamanho do pixel.

2.4.1.7 Estimativa do volume e biomassa

Hackenberg *et al.* (2015) apresentaram um método não destrutivo para estimar a biomassa aérea das espécies *Pinus massoniana*, *Erythrophleum fordii* e *Quercus petraea*. As estimativas foram baseadas em medições de densidade combinadas com avaliações de volume derivadas de dados TLS Z+F IMAGER 5010. Os autores observaram que o método proposto produziu bons resultados de estimativa da biomassa acima do solo para os componentes das árvores sem folhas com diâmetro acima de 10 cm. A estimativa de biomassa utilizando o volume total derivado de TLS foi satisfatória para a espécie *P. massoniana*, em que o erro médio foi inferior a 3%.

Hackenberg *et al.* (2015) apontaram que na estimativa do volume ocorreram erros nos componentes arbóreos mais finos localizados nas copas das árvores. A qualidade inferior das nuvens de pontos na copa, principalmente devido à oclusão, vento e precipitação, levou a uma enorme superestimação do volume dos galhos em *Q. petraea* sem folhas, e subestimação em *E. fordii perene*. Nesse sentido, os autores indicam que é necessário realizar as operações de digitalização sob boas condições meteorológicas para alcançar a máxima qualidade dos dados.

No estudo de Shimizu *et al.* (2022), o volume do fuste foi subestimado pela abordagem TLS (A1) devido à subestimação da altura das árvores, com um RMSE de 0,76 m³ (33,2%) nas parcelas com desbaste e 0,39 m³ (30,5%) nas parcelas sem desbaste. Na abordagem (A2), em que as alturas foram obtidas com base na localização das árvores com o DCHM e TLS, o RMSE foi de 0,22 m³ (9,8%) nas parcelas com desbaste e 0,19 m³ (14,7%) nas parcelas sem desbaste. Já na abordagem (A3), onde a posição das árvores foi identificada com base nas copas das árvores no DCHM e TLS, o RMSE foi de 0,22 m³ (9,5%) e 0,19 m³ (14,7%) nas parcelas com e sem desbaste. Com isso, os autores concluíram que, com a integração

da fotogrametria VANT e o TLS, as acurácias foram melhores nas parcelas com e sem desbaste, o que se deveu às melhores estimativas da altura das árvores.

2.4.1.8 Outras aplicações

No estudo desenvolvido por Tienaho *et al.* (2022), ao comparar o TLS (Trimble TX5 3D) com o VANT, os autores destacaram que a densidade de pontos do TLS foi 15 vezes maior do que a do VANT. A densidade de pontos é uma métrica importante para caracterizar a complexidade estrutural das árvores (YRTTIMAA *et al.*, 2020). Nesse sentido, Tienaho *et al.* (2022) presumiram que o TLS descreveu a complexidade estrutural das árvores com uma resolução mais alta e detalhes mais precisos, uma vez que o VANT não consegue penetrar a vegetação mais densa.

Ronoud *et al.* (2022) estudaram o efeito de diferentes tipos e intensidades de desbaste sobre a competição em povoamentos de *Pinus sylvestris*. Eles utilizaram dados de fuste e copa das árvores extraídos das nuvens de pontos TLS (Trimble TX5). A partir das nuvens classificadas como fuste e não-fuste, sete métricas que caracterizam as estruturas do fuste e da copa das árvores foram calculadas, incluindo localização, diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (h), diâmetro máximo da copa (MCD), área de projeção da copa (CA), volume da copa (VC) e área superficial da copa (CS). Com base nessas métricas, os índices de competição (IC) foram calculados.

Os autores explicaram que os IC são extraídos principalmente de variáveis fáceis de medir, como DAP e h, enquanto as características da copa das árvores são difíceis de obter. Além disso, os IC dependentes da distância raramente são estudados devido à dificuldade na criação de mapas em árvore. Para preencher essa lacuna, os autores avaliaram os IC usando nuvens de pontos TLS e obtiveram diferenças significativas no status de competição de árvores individuais em comparação com as parcelas de controle.

Demol *et al.* (2021) investigaram os erros associados às estimativas de biomassa acima do solo provenientes da variação vertical da densidade básica da madeira dentro da árvore. Utilizaram dois sensores TLS (RIEGL VZ-1000 e RIEGL VZ-400) para a estimativa do volume, pois o TLS tem potencial para estimar de forma confiável o volume de árvores em pé. A densidade básica da madeira foi utilizada para converter o volume da árvore em biomassa.

No estudo de Pyörälä *et al.* (2019) com *Pinus sylvestris*, foi avaliada a geometria das toras e sua relação com a qualidade da madeira utilizando o sensor LiDAR TLS (Trimble TX5). As estimativas das variáveis diâmetro na parte superior, volume e conicidade apresentaram diferença relativa de até -3,0%, enquanto para a varredura, a diferença foi de 78%. Os autores ressaltaram que os diâmetros ao longo das toras podem ser estimados com precisão, utilizando nuvens de pontos terrestres de alta densidade escaneadas sob condições favoráveis.

Pyörälä *et al.* (2019) salientam que a abordagem utilizada em seu estudo deve ser usada com cautela, devido à não uniformidade na definição de varredura. Indicam que, em trabalhos futuros para avaliar as variáveis estudadas, informações adicionais a partir de nuvem de pontos 3D devem ser incluídas. Além disso, afirmam que as plataformas móveis são provavelmente mais adequadas para a aquisição de dados do que as estáticas.

No estudo realizado por Zhang *et al.* (2022), foram avaliados os efeitos do vento em nível de furações (até 17,5 m/s) em plantios de Seringueiras. Coletaram dados com dois scanners a laser 3D de alta precisão HS450. Os autores mencionaram que o índice de área foliar aumentou após a aplicação dos testes com as diferentes velocidades de ventos, contrariando a expectativa de uma diminuição da área foliar. Esses autores mencionam que uma combinação de dados TLS com *Deep Learning Networks* pode remover pontos ruidosos, melhorando a precisão do algoritmo utilizado pelos pesquisadores. Outro ponto mencionado foi a indicação do uso de um *scanner a laser* com aquisição de dados mais rápida e precisa para melhorar ao máximo a acurácia das estimativas.

2.5 CONSIDERAÇÕES

Com base nas publicações analisadas, as seguintes considerações podem ser apresentadas:

- A varredura a *laser* é amplamente reconhecida como uma técnica não destrutiva que serve como alternativa para a construção e monitoramento de inventários florestais, contribuindo significativamente para aumentar a acurácia e eficiência das medições.
- A varredura a *laser* terrestre (TLS) foi identificada como uma tecnologia eficaz para coletar nuvens de pontos tridimensionais (3D) densas e altamente

detalhadas de árvores, oferecendo uma abordagem valiosa para o mapeamento e modelagem da vegetação.

- Para aplicações florestais do TLS multivarredura, o registro das nuvens de pontos é um pré-requisito importante. Pesquisas têm sido desenvolvidas para aprimorar essa etapa de registro, explorando técnicas como o registro multiplataforma e, em alguns casos, até mesmo o registro sem o uso de marcadores.
- A separação acurada e eficiente dos pontos da madeira e das folhas dos dados TLS foi reconhecida como uma tarefa desafiadora. O algoritmo QSM (*Quantitative Structure Model*) tem sido aplicado para a separação madeira-folha e reconstrução de modelos quantitativos de árvores.
- O uso de múltiplas varreduras é uma abordagem eficaz para superar o problema de oclusão causado pela densidade das árvores e vegetação rasteira. Essa prática pode garantir taxas mais altas de detecção de árvores e contribuir para estimativas mais confiáveis de diâmetro à altura do peito (DAP) e altura.
- A esqueletização, que envolve a extração de uma descrição de estrutura de nuvens de pontos TLS como uma coleção de linhas conectadas, é uma técnica que permite a análise detalhada de características morfológicas, incluindo ângulo dos ramos, comprimento dos ramos, curvatura dos ramos, volume da copa e ocupação dos ramos dentro do espaço da copa.
- Ressalta-se a importância de realizar operações de digitalização sob boas condições meteorológicas para garantir a máxima qualidade dos dados. Isso é importante para assegurar a confiabilidade das métricas extraídas das nuvens de pontos (3D) e para obter estimativas precisas de volume e biomassa florestal, entre outras variáveis.

3 ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL DE ÁRVORES DE EUCALIPTO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS INTEGRADOS COM O USO DE TLS

3.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, aproximadamente 17,43 milhões de hectares são dedicados ao sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), também conhecido como sistema Agrossilvipastoril (ASSOCIAÇÃO REDE ILPF, 2021). O iLPF é uma abordagem que integra diversos sistemas produtivos, incluindo atividades agrícolas, pecuárias e florestais, dentro de uma mesma área. Essa integração pode ocorrer de várias formas, envolvendo diferentes culturas e espécies animais.

Um dos principais objetivos do iLPF é otimizar o uso da terra para alcançar maior produtividade, qualidade dos produtos e conservação ambiental, sem a necessidade de desmatar novas áreas de florestas nativas (BEHLING *et al.*, 2013). A combinação de elementos agrícolas, animais e florestais representa uma excelente alternativa para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o gás metano (FERREIRO-DOMÍNGUEZ *et al.*, 2016; CARON *et al.*, 2019; MUNARO *et al.*, 2023).

Um componente importante do iLPF é a parte florestal. De acordo com o propósito, espécies arbóreas podem ser utilizadas para a produção de matéria-prima destinada à indústria madeireira (SOUSA *et al.*, 2022). O gênero *Eucalyptus* destaca-se como uma das escolhas mais comuns para esse componente arbóreo no iLPF, principalmente devido ao seu rápido crescimento, adaptabilidade à diversas condições edafoclimáticas e qualidade excepcional da madeira (KRUCHELSKI *et al.*, 2021).

O volume de madeira é geralmente quantificado por meio do inventário florestal, utilizando diversas técnicas que variam de acordo com os objetivos, escala, recursos disponíveis e necessidade de acurácia (LIANG *et al.*, 2016). A maioria dos inventários florestais baseia-se em amostragens de campo, sendo que a acurácia está diretamente relacionada à qualidade e quantidade de unidades amostrais coletadas (LIANG *et al.*, 2016).

As amostragens podem ser realizadas por métodos não destrutivos ou destrutivos. No método não destrutivo são medidas variáveis como o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura das árvores, visando a posterior modelagem estatística do volume. Já no método destrutivo, as árvores são cortadas e cubadas. De acordo com

as características da área a ser inventariada, ambas as abordagens podem se tornar onerosas.

Nesse contexto florestal, técnicas de sensoriamento remoto, como o uso do *Light Detection and Ranging* (LiDAR) e *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), têm se tornado uma necessidade no setor florestal. O TLS pode ser empregado para quantificar diversas variáveis no inventário florestal, conforme evidenciado por estudos recentes (KO *et al.*, 2022; RONOUUD *et al.*, 2022; SHIMIZU *et al.*, 2022; TIENAHU *et al.*, 2022).

A varredura a *laser* aprimora a acurácia das medições, especialmente no que diz respeito ao DAP e à altura das árvores (LIANG *et al.*, 2016; KO *et al.*, 2022), variáveis cruciais para a estimativa do volume. Essas variáveis estão diretamente associadas aos modelos estatísticos tradicionalmente utilizados (MARTINS *et al.*, 2021; LUNDGREN *et al.*, 2015, OLIVEIRA *et al.*, 2015). A técnica de medição no TLS é capaz de capturar detalhes em nível milimétrico das árvores, permitindo estimativas rápidas e automáticas das variáveis importantes do inventário florestal (LIANG *et al.*, 2016).

No entanto, o TLS pode ser altamente sensível à densidade e à estrutura da vegetação, sua capacidade de penetração é limitada pela presença de folhagem densa e cobertura vegetal. Em áreas com vegetação densa, o *laser* pode não atingir o solo, a base das árvores ou o topo das árvores, resultando em distorções nas estimativas do volume total das árvores. Além disso, a precisão das medições também pode ser afetada por interferências atmosféricas, como neblina ou poeira, que podem distorcer os sinais de retorno do *laser* (NISHIWAKI *et al.*, 2023).

Nesse sentido, neste capítulo, é proposta a hipótese: A obtenção de medidas na nuvem de pontos do TLS, focando em porções do fuste localizadas em regiões de fácil acesso e sem influência de galhos, pode ser suficiente para estimar com acurácia o volume individual total da árvore.

O objetivo geral deste capítulo foi avaliar a capacidade de uma representação parcial do fuste de árvores, obtida pelo TLS, para estimar com acurácia o volume individual total das árvores. Buscou-se determinar se essa abordagem pode ser uma alternativa para estimativas volumétricas em levantamentos florestais.

Com base no contexto apresentado, os objetivos específicos deste capítulo são: (a) Avaliar o desempenho das nuvens de TLS e investigar como uma representação parcial do fuste, obtida por meio de TLS, pode estimar o volume

individual total de árvores de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage, em um sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF); (b) Desenvolver uma rotina de processamento para os dados TLS, focada em um menor número de medições ao longo do fuste; e (c) Testar o desempenho das estimativas produzidas com a tecnologia TLS em comparação às técnicas convencionais de inventário florestal.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

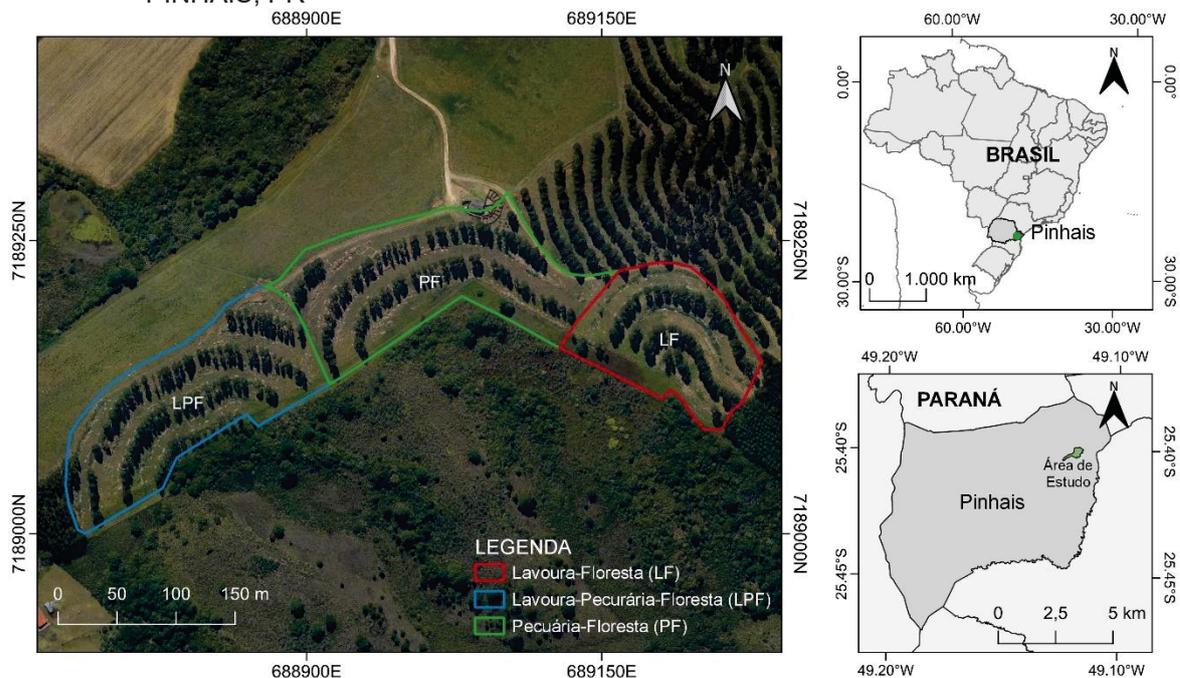
3.2.1 Dados Experimentais

3.2.1.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido no projeto Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA), localizado na Estação Experimental Canguiri, município de Pinhais, Paraná, com coordenada central 25°23'30" S de latitude, 49°07'30" W de longitude e 935 metros de altitude (Figura 6). Segundo a classificação de Köppen, o município é caracterizado por clima do tipo subtropical úmido (Cfb), com precipitação média anual de 1.550 milímetros e temperatura média de 17°C (ALVARES *et al.*, 2013). Os solos predominantes na região são Cambissolos, Latossolos, Organossolos e Gleissolos (SANTOS *et al.*, 2018).

A área total do experimento corresponde a 35 hectares. Foram utilizados 5,8 hectares (Figura 7), com três tratamentos denominados de Lavoura-Floresta (LF), Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF) e Pecuária-Floresta (PF).

FIGURA 6. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



FONTE: A autora (2022).

A área experimental está localizada na Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Iraí, a qual constitui uma unidade territorial criada pelo Decreto Estadual nº 1.753/96, conforme a Lei 6.938/81 (BRASIL, 1981). A lei veda o uso de defensivos agrícolas (herbicidas, inseticidas e fungicidas) na produção agropecuária, mas não impõe limitações quanto ao manejo do solo, por exemplo o uso do revolvimento do solo (aração e/ou, gradagem).

FIGURA 7. ÁREA DE ESTUDO LOCALIZADA NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



FONTE: A autora (2021).

Em setembro de 2013, as mudas de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage, foram plantadas em linhas simples, com as culturas (pastagem ou lavoura)

intercaladas entre linhas, com espaçamento de 14 metros entre linhas e de 2 metros nas linhas. As linhas de árvores foram plantadas em curvas de nível visando à conservação do solo e da água, o controle da erosão, a melhoria do conforto térmico dos animais e a amenização das trilhas feitas pelo caminhar animal no sentido pendente do terreno e possibilitando o trânsito de máquinas. Em 2020 foram realizados dois desbaste sistemáticos na área, retirando uma linha de algumas árvores e o espaçamento passou a ser de 28 metros entre linhas e 10 metros nas linhas. As árvores do estudo foram submetidas ao tratamento de desrama até a altura de cinco metros.

3.2.1.2 Cubagem

A cubagem de 52 árvores de *Eucalyptus benthamii* foi realizada nos anos de 2019 e 2022, empregando os métodos direto e destrutivo. O método destrutivo envolveu o corte das árvores amostradas (Figura 8 e 9) para a realização da cubagem do fuste. A escolha das árvores foi baseada no censo do inventário florestal do ano anterior ao corte das árvores. Em 2019, foram selecionadas 32 árvores de forma aleatória nas classes diamétricas. No ano de 2022, a seleção compreendeu 20 árvores.

As árvores amostradas foram avaliadas quanto ao diâmetro à altura do peito, a 1,30 metros do solo (DAP) em centímetros, altura total (h) em metros, e diâmetros (di) em centímetros, em diferentes alturas (hi) do fuste. Os diâmetros com casca foram coletados nas posições relativas à altura total: 0,1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 25, 35, 45, 50, 55, 65, 75, 85 e 95% da altura total, para o cálculo dos volumes de madeira com casca (V) em m³ (Figura 10 e 11).

FIGURA 8. DERRUBADA E SECCIONAMENTO DE UMA ÁRVORE DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 9. DERRUBADA E DESGALHAMENTO DE UMA ÁRVORE DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 10. MEDIÇÕES DOS DIÂMETROS INTERMEDIÁRIOS DE UMA ÁRVORE DE EUCALIPTO, NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 11. MEDIÇÕES DE ALTURAS E DIÂMETROS INTERMEDIÁRIOS DE UMA ÁRVORE DE EUCALIPTO, NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR.



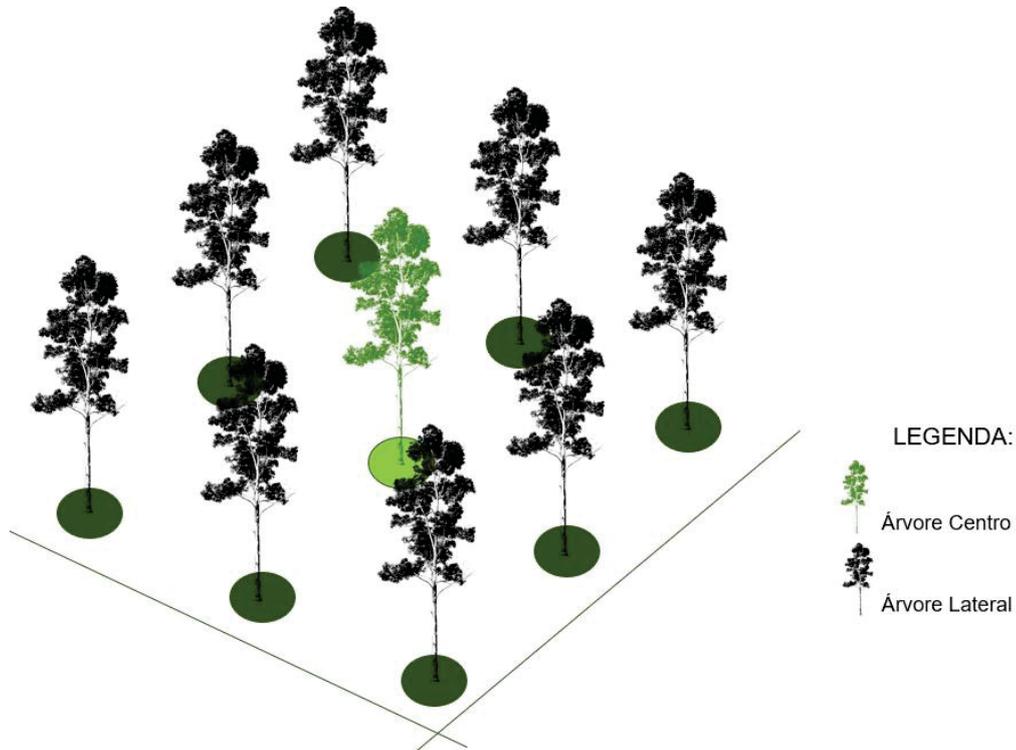
FONTE: A autora (2022).

3.2.1.3 Amostragem

Em novembro de 2021, quando o plantio atingiu a idade de 8 anos, foi realizada a amostragem de árvores na área de estudo. Um total de 12 árvores, denominadas árvores centro (AC), foram selecionadas aleatoriamente na área, com o cuidado de evitar a escolha de árvores na borda. Além disso, foram medidas 8 árvores

laterais (AL) (Figura 12). Sendo assim, o levantamento incluiu medidas para 12 árvores centro (AC) e 8 árvores laterais (AL), total de 20 árvores.

FIGURA 12. POSIÇÃO DE UMA ÁRVORE CENTRO E ÁRVORES LATERAIS DE EUCALIPTO, MENSURADAS NA AMOSTRAGEM REALIZADA NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



FONTE: A autora (2023).

Foram mensuradas as variáveis circunferência à altura do peito (CAP), 1,30 metros do solo, e altura total (h) das árvores. O CAP foi mensurado com fita centimétrica e a h foi medida com um hipsômetro Haglöf Vertex IV®, a uma distância de 20 metros da árvore (Figura 13). Além disso, a posição geográfica das árvores foi coletada com o GPS Garmin 62CSX. De acordo com o manual do proprietário da série GPSMAP 62, a margem de erro para a localização exata é de ± 12 pés (ou 3,66 m).

FIGURA 13. MEDIÇÃO DO DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO E ALTURA TOTAL NA AMOSTRAGEM REALIZADA NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



FONTE: A autora (2022).

3.2.1.4 TLS

O *Light Detection and Ranging* (LiDAR) *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) é um método indireto e não destrutivo para obter variáveis da vegetação. O levantamento de dados TLS foi conduzido em colaboração com a Embrapa Florestas, como parte do projeto Saltus II. Esse projeto inclui o subprojeto intitulado Dinâmica de gases de

efeito estufa e dos estoques de carbono em florestas naturais e plantadas: práticas silviculturais para mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Para a coleta de dados, foi utilizado o *laser scanner* terrestre de deslocamento de fase Faro Focus 3D X 330 (Figura 14), com um alcance de 0,6 a 330 metros e um erro de ± 2 milímetros. O Faro Focus é capaz de medir até 976.000 pontos por segundo e produz imagens com até 70 megapixels. Além disso, incorpora vários sensores, incluindo Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), uma bússola, um sensor barométrico para medição de altitude e um compensador de eixo duplo (FARO, 2022).

FIGURA 14. FARO FOCUS 3D X 330 UTILIZADO NAS VARREDURAS REALIZADAS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



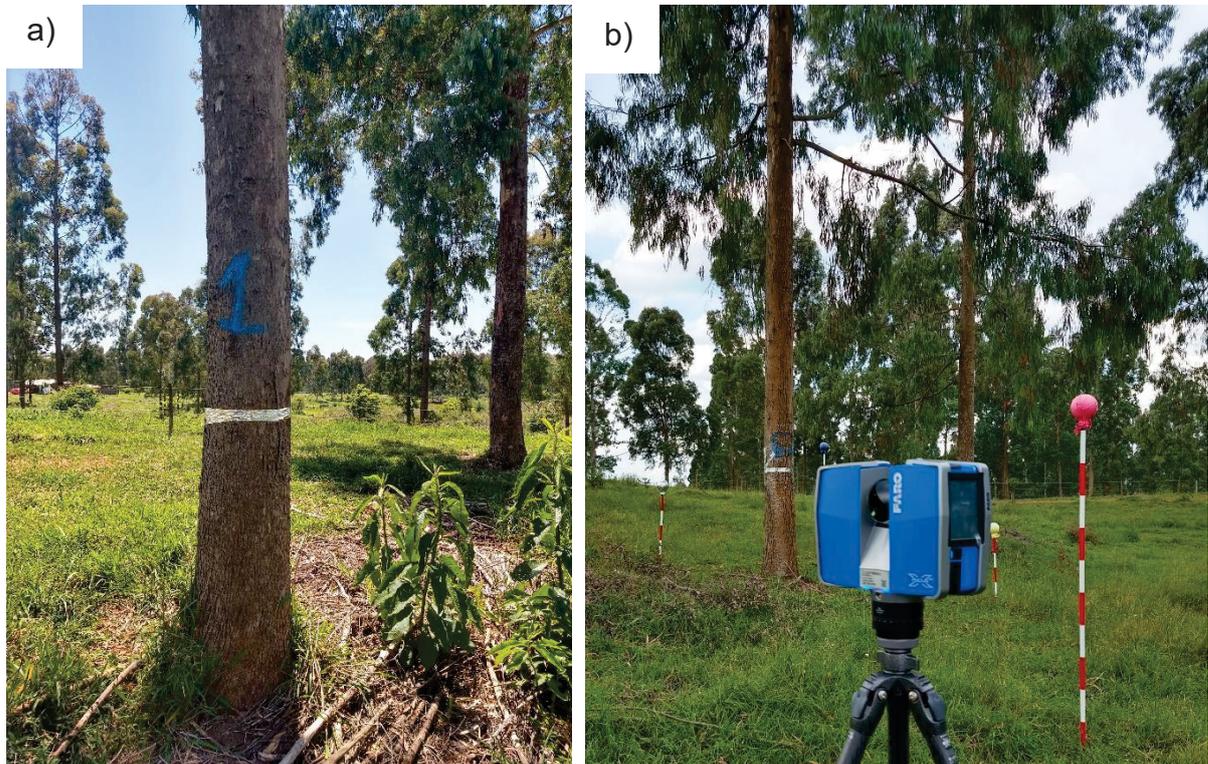
FONTE: A autora (2022).

Para aumentar a eficiência do uso do tempo para as varreduras *laser* no campo, as árvores que seriam alvo das varreduras *laser* foram identificadas com uma fita de alumínio, previamente ao início da digitalização (Figura 15-a). No processo de coleta de dados com o TLS, a árvore foi considerada a unidade amostral do tratamento.

Quatro esferas foram posicionadas na área da unidade amostral. Essas esferas foram revestidas com papel de seda colorido (rosa, amarelo, azul e prata), com o lado fosco voltado para cima, com o objetivo de evitar interferências na

luminosidade (Figura 15-b). A coloração das esferas serviu para uma identificação específica durante o registro das nuvens de pontos.

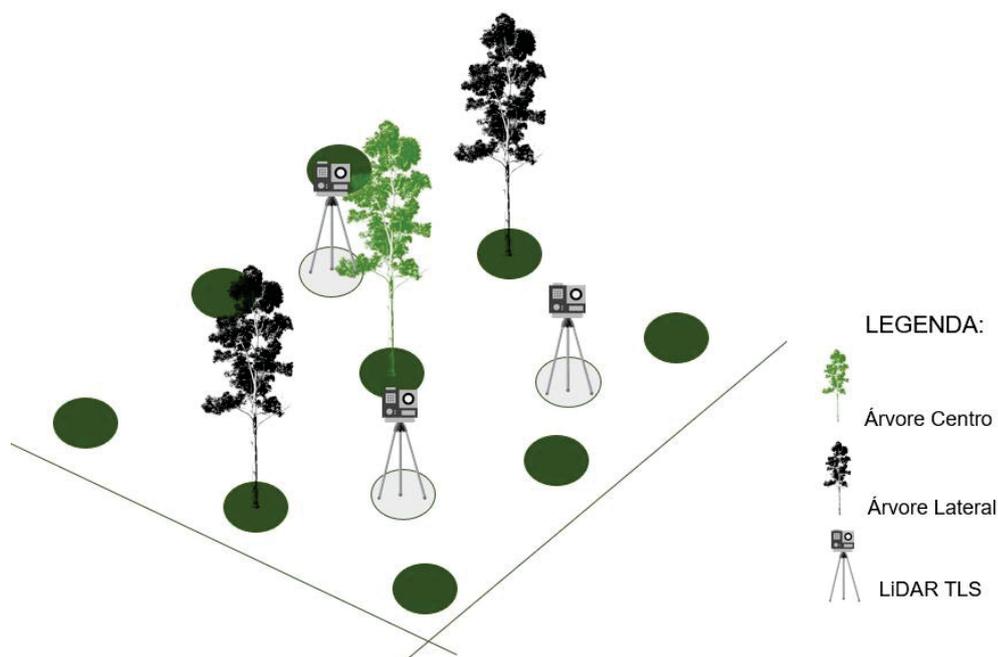
FIGURA 15. MARCAÇÕES DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO E ESFERAS UTILIZADAS NAS VARREDURAS COM O TLS FARO FOCUS 3D X 330, NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



FONTE: A autora (2022).

O equipamento foi posicionado a uma distância de 10 a 15 metros (MARTINS NETO *et al.*, 2013), montado em um tripé de levantamento para garantir segurança e nivelamento adequado. O equipamento foi colocado em três posições ao redor da árvore central (AC), que é a árvore alvo da varredura e está posicionada da mesma forma que as árvores amostradas (Figura 16). Adotou-se um padrão radial para escanear cada árvore-alvo. Foram obtidas três nuvens de pontos para cada AC e algumas árvores laterais (AL). No total, foram realizadas varreduras a *laser* em 12 AC e 8 AL, totalizando 20 árvores.

FIGURA 16. POSIÇÃO DA ÁRVORE CENTRO E ÁRVORES LATERAIS DE EUCALIPTO UTILIZADAS COMO ALVO DAS VARREDURAS DO TLS REALIZADAS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



FONTE: A autora (2023).

3.2.2 Processamento - Volume das Árvores com Dados de Cubagem

Tendo como base os dados dos diferentes diâmetros, nas diferentes alturas das árvores oriundas da cubagem, o volume de cada seção das 52 árvores foi obtido em função do comprimento e das áreas transversais nas extremidades das seções pelo método de Smalian, onde o volume é dado pela Expressão 1:

$$V_t = V_0 + \sum_{i=1}^n V_i + V_c \quad (1)$$

$$V_0 = g_0 \cdot h_0 \quad (2)$$

$$V_i = \frac{(g_i + g_{i+1})}{2} \cdot h_i \quad (3)$$

$$V_c = \frac{1}{3} \cdot g_c \cdot h_c \quad (4)$$

$$g = \frac{\pi \cdot DAP_i^2}{40.000} \quad (5)$$

Em que: V_t é o volume total individual; V_0 é o volume do toco; V_i é o volume das seções intermediárias; V_c é o volume do cone; g é a área transversal da seção; DAP é o diâmetro à altura do peito, a 1,30 m do solo; h é o comprimento da seção (altura).

3.2.3 Processamento - TLS

3.2.3.1 Registro e remoção de ruídos das nuvens 3D

Os dados brutos provenientes das varreduras do TLS foram importados no *software* Scene Faro, na versão gratuita por 30 dias. As três varreduras realizadas em cada árvore centro foram mescladas, utilizando como referência as quatro esferas distribuídas na área (Figura 17), a fim de obter uma única nuvem de pontos tridimensional. O *software* fornecido pelo fabricante localiza automaticamente as esferas, embora, em algumas ocasiões, seja necessário identificá-las manualmente. A sequência de passos utilizada para efetuar o registro das nuvens de pontos está disponível no Apêndice I.

FIGURA 17. ESFERAS IDENTIFICADAS NO SOFTWARE SCENE DURANTE O PROCESSO DE REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS OBTIDAS COM O TLS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



FONTE: A autora (2022).

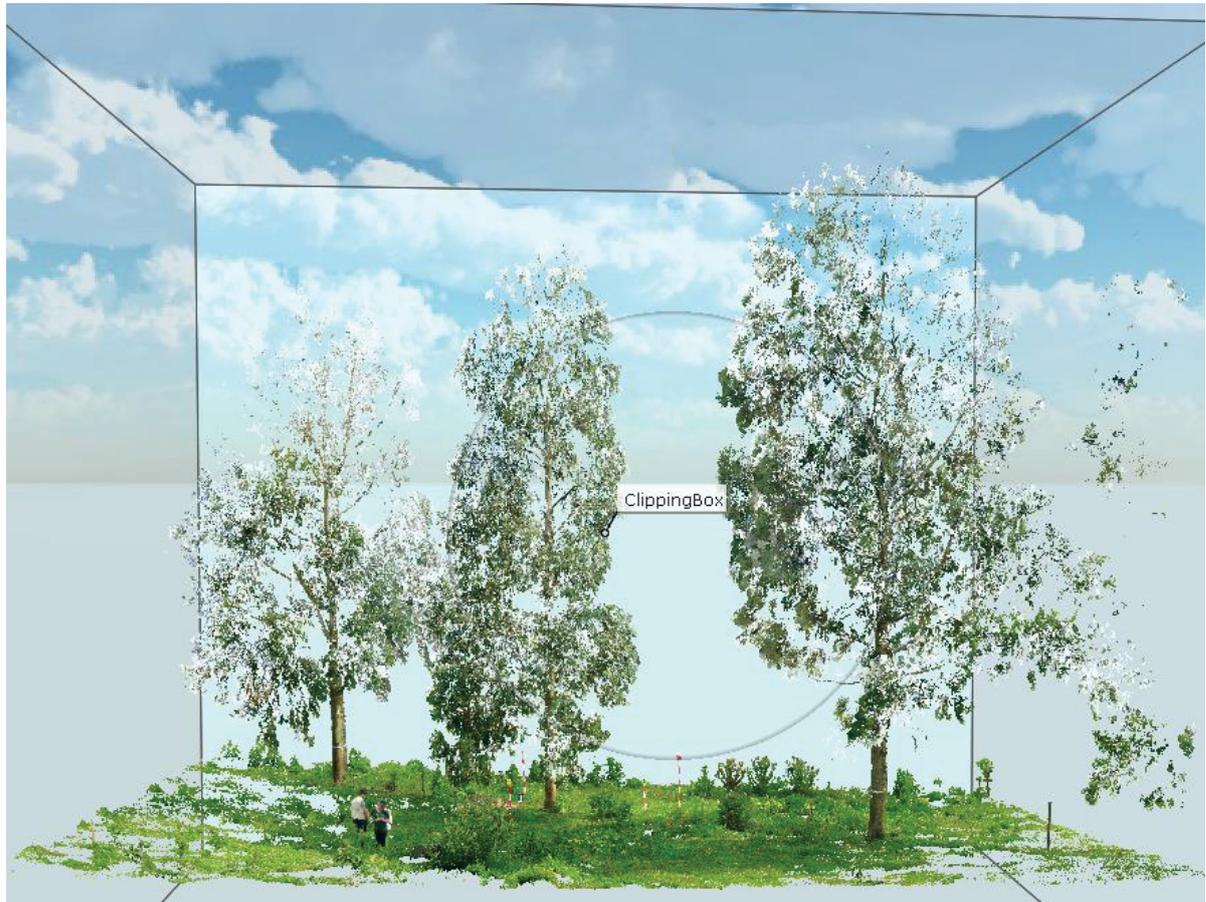
Após a geração das nuvens 3D (Figura 18), estas foram recortadas para incluir apenas as árvores centro e duas árvores laterais (Figura 19). Em seguida, as nuvens foram salvas no formato “.laz”.

FIGURA 18. NUVEM DE PONTOS OBTIDA APÓS O REGISTRO DAS VARREDURAS DO TLS



FONTE: A autora (2023).

FIGURA 19. NUVEM DE PONTOS DE UMA ÁRVORE CENTRAL E DUAS LATERAIS OBTIDA APÓS O RECORTE DA NUVEM DE PONTOS ORIUNDA DO REGISTRO



FONTE: A autora (2023).

As nuvens de pontos das 20 árvores foram importadas no *software* CloudCompare para realizar a eliminação de ruídos, em um processo denominado limpeza. A filtragem visual do tronco das árvores foi conduzida manualmente, removendo os pontos que não faziam parte do tronco da árvore (Figura 20).

FIGURA 20. LIMPEZA DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA DO TLS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



FONTE: A autora (2023).

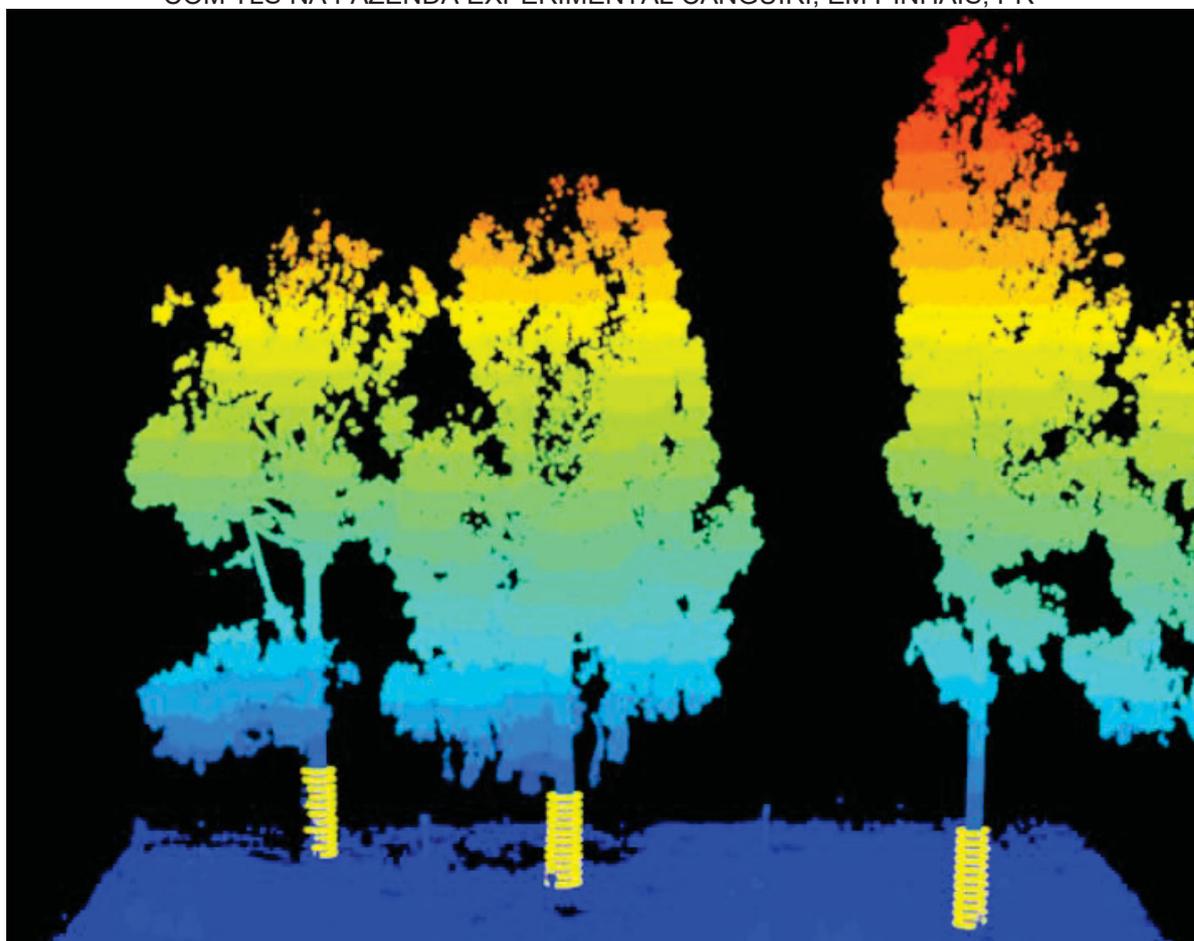
3.2.3.2 Extração de variáveis

As nuvens de pontos das 20 árvores foram importadas no *software* estatístico R. Utilizando o pacote "TreeLS", foram extraídas as variáveis de interesse, incluindo diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (h), diâmetros em diferentes posições do tronco (di) e suas respectivas alturas (hi). O *script* com os comandos utilizados está disponível no Apêndice 2.

Após a normalização da nuvem de pontos, procedeu-se à marcação dos diâmetros e suas respectivas alturas ao longo do tronco (Figura 21). O primeiro diâmetro foi identificado a 0,25 m, e os subsequentes foram marcados a cada 0,25 m até atingir 5 metros de altura. A altura inicial foi definida em 0,25 m para evitar a influência da vegetação rasteira, enquanto a altura final foi determinada para evitar a influência dos galhos. Cada árvore foi classificada e recebeu um número de

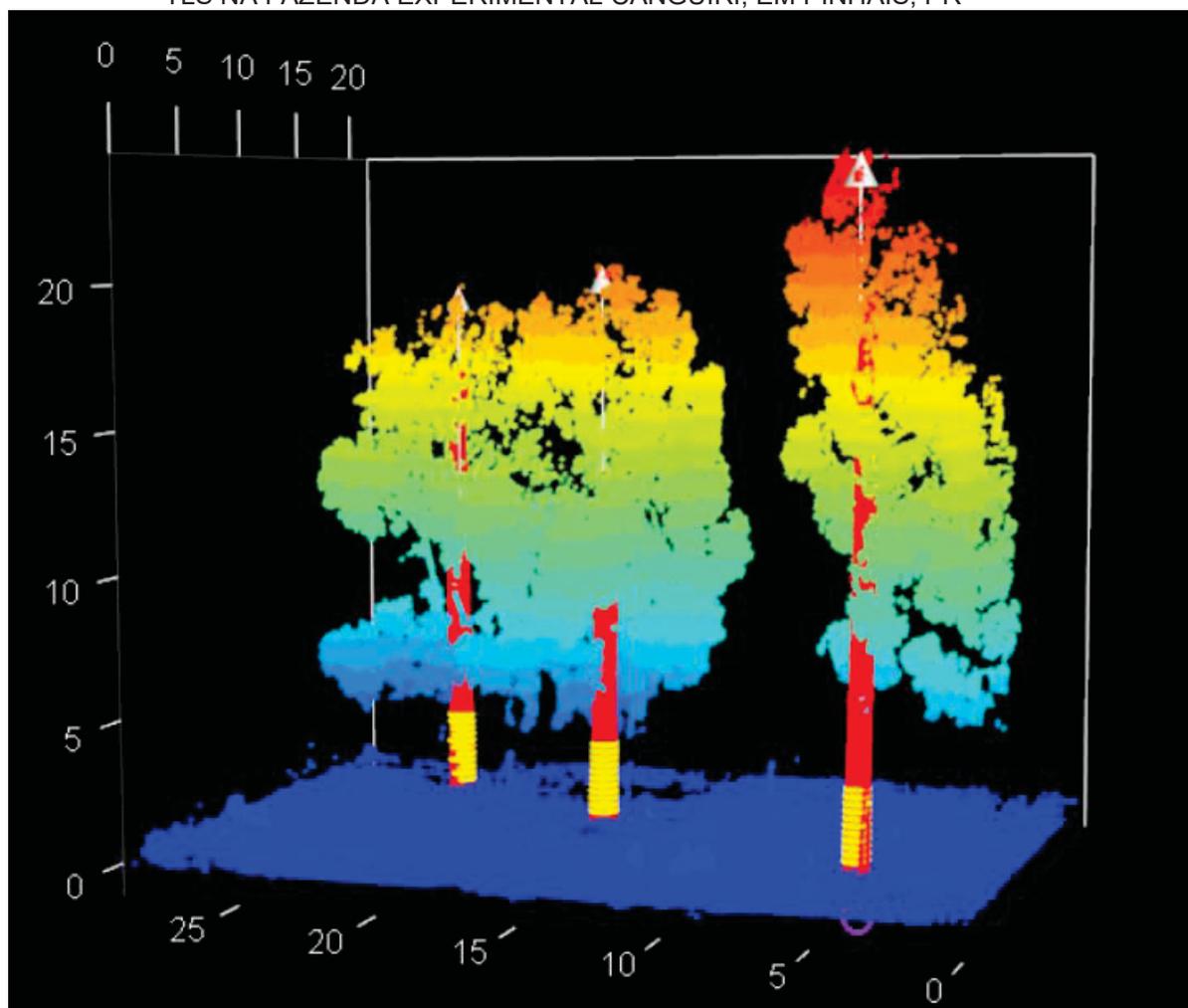
identificação. Os valores das variáveis de interesse foram extraídos das árvores laterais e da árvore central (Figura 22).

FIGURA 21. IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DE INTERESSE NA NUVEM DE PONTOS OBTIDA COM TLS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



FONTE: A autora (2023).

FIGURA 22. EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS DE INTERESSE DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA COM TLS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR

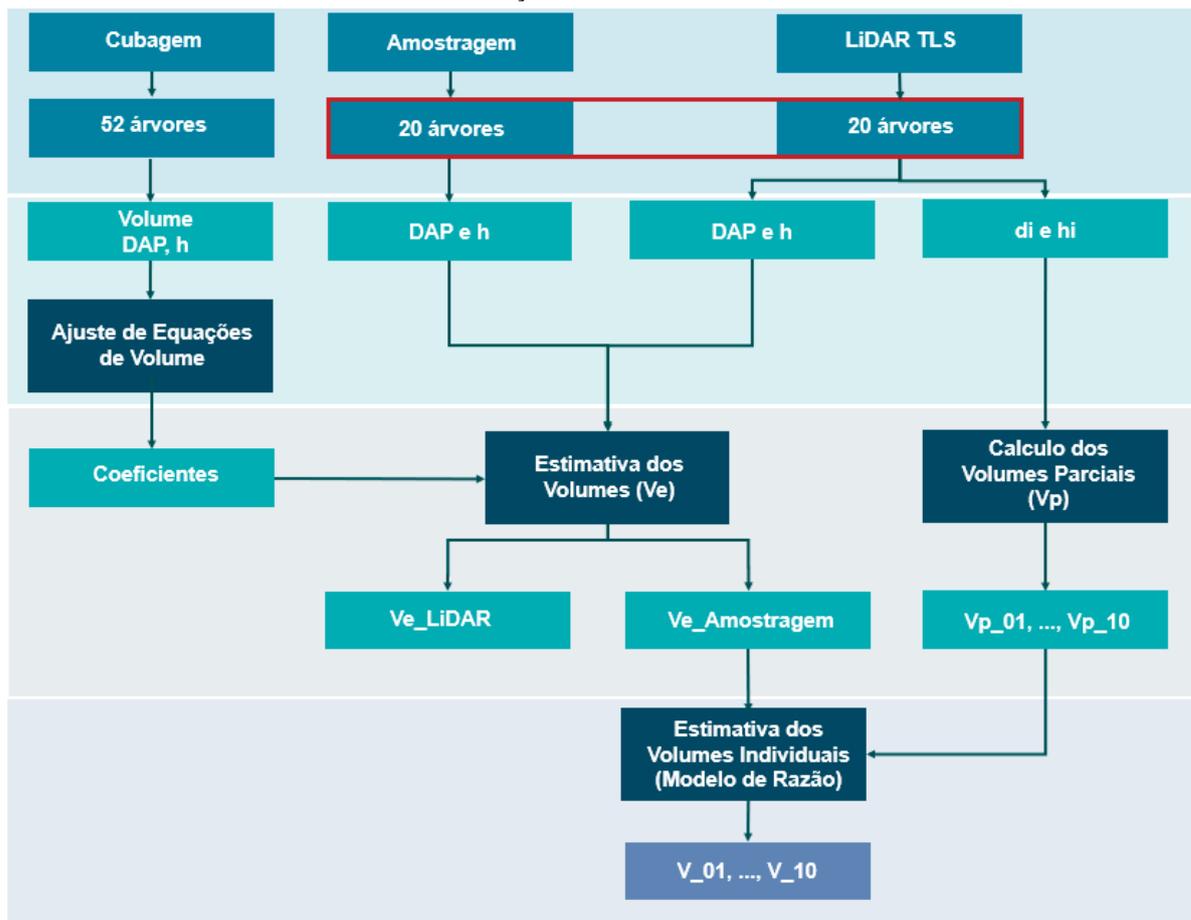


FONTE: A autora (2023).

3.2.4 Estimativa do Volume Individual com Base em Volumes Parciais Obtidos do TLS

A sequência metodológica para a obtenção e avaliação das estimativas do volume individual, com base em volumes parciais obtidos do TLS, seguiu quatro etapas que estão elencadas na Figura 23.

FIGURA 23. SEQUÊNCIA METODOLÓGICA PARA OBTENÇÃO DOS VOLUMES INDIVIDUAIS DE EUCALIPTO COM A UTILIZAÇÃO DO TLS



3.2.4.1 Etapa 01. Modelagem do volume - Equações de volume

Tendo como base os volumes das 52 árvores oriundas da cubagem, foram ajustados e testados os modelos volumétricos de Husch (6), Spurr (7) e Schumacher-Hall (8). O ajuste foi realizado no *software* R, o *script* encontra-se no Apêndice 3.

$$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP \quad (6)$$

$$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot (DAP^2 \cdot h) \quad (7)$$

$$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + \beta_2 \cdot \ln(h) \quad (8)$$

Em que: V é o volume individual total (m^3); β_0 , β_1 e β_2 são os coeficientes dos modelos; DAP é o diâmetro à altura do peito, 1,30 metros do solo (cm); e h é a altura total (m).

As equações ajustadas foram avaliadas por meio do Coeficiente de determinação ajustado ($R_{aj.}^2$) (9), Erro padrão da estimativa absoluto (S_{yx}) (10) e Erro padrão da estimativa relativo ($S_{yx\%}$) (11).

$$R_{aj.}^2 = 1 - \left[\left(\frac{n-1}{n-p} \right) \cdot \left(\frac{SQE}{SQT} \right) \right] \quad (9)$$

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{SQE}{n-p}} \quad (10)$$

$$S_{yx\%} = \frac{S_{yx}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (11)$$

Em que: $R_{aj.}^2$ é o coeficiente de determinação ajustado; n é o número de observações; p é o número de coeficientes; SQE é a soma de quadrados dos resíduos; SQT é a soma de quadrados total; S_{yx} é o erro padrão de estimativa absoluto; $S_{yx\%}$ é o erro padrão de estimativa relativo; \bar{y} é a média dos valores observados.

A análise gráfica do comportamento dos resíduos (12) foi conduzida para verificar a homogeneidade dos resíduos. Nas situações em que esse pressuposto não foi atendido, foi realizada a ponderação das equações utilizando o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (13). Nos casos de ponderação, o peso especificado em 14 foi empregado. Após a aplicação dos pesos, as equações foram reavaliadas em relação ao $R_{aj.}^2$, $S_{yx\%}$, e análise gráfica dos resíduos foi efetuada novamente.

$$e = y_i - \hat{y}_i \quad (12)$$

$$\hat{\beta} = (X' \psi(\hat{\theta})^{-1} X)^{-1} X' \psi(\hat{\theta})^{-1} y \quad (13)$$

$$\psi = \frac{1}{DAP^2 h} \quad (14)$$

Em que: e é o resíduo; y_i é a variável observada; \hat{y}_i variável estimada; ψ é o peso; $\psi(\hat{\theta})$ é a matriz diagonal dos pesos, que depende do número de coeficientes (p) denotada pelo vetor θ da ordem ($p.1$)

No *software* R, o teste de Shapiro-Wilk (15) foi aplicado para verificar a normalidade dos resíduos.

$$W = \frac{b^2}{S^2} \quad (15)$$

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (16)$$

Quando o número de unidades amostrais é par:

$$b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} \cdot (y_{n-i+1} - y_i) \quad (17)$$

Quando o número de unidades amostrais é ímpar:

$$b = a_n(y_n - y_1) + \dots + a_{k+2}(y_{k+2} - y_k) \quad (18)$$

Em que: W é o teste de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk; S^2 é a soma de quadrados dos desvios; a o valor obtido da tabela de coeficientes de Shapiro-Wilk.

3.2.4.2 Etapa 02. Estimativa do volume - Amostragem e TLS

Após a seleção do modelo volumétrico com melhor desempenho, os coeficientes obtidos do ajuste foram utilizados para estimar o volume de 20 árvores mensuradas na Amostragem, as mesmas árvores alvo das varreduras com o TLS. Dessa forma, utilizando os DAP e h provenientes do TLS e Amostragem, foram obtidos os volumes estimados (V_e) para os dois métodos (Amostragem e TLS). O *script* encontra-se no Apêndice 3.

Os volumes estimados para o TLS foram comparados com os volumes estimados para a Amostragem. A avaliação foi conduzida por meio da Correlação de Pearson (19), que foi calculada no *software* R utilizando o pacote “metan” e a função *corr_plot*.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X) \cdot var(Y)}} \quad (19)$$

Em que: r é a correlação de Pearson; x_i é o volume estimado da Amostragem para a árvore i ; y_i é o volume estimado do TLS para a árvore i ; \bar{x} é a média de x ; \bar{y} é a média de y .

A avaliação dos volumes estimados do TLS, quando em comparação aos volumes estimados da Amostragem, comparação de métodos, foi realizada por meio das medidas de concordância: Coeficiente de Concordância (A); Medida de Concordância (ρ), Coeficiente de Correlação de Concordância (CC1), Coeficiente de Correlação de Concordância Melhorado (CC2), e Parâmetro de Concordância (λ).

O Coeficiente de Concordância (A) é uma medida de concordância proposta por Robinson (1957). Essa medida varia de 0 (sem concordância) e 1 (concordância perfeita) e é dada por (20):

$$A = 1 - \frac{\sum(y_i - k_i)^2 + \sum(x_i - k_i)^2}{\sum(y_i - k)^2 + \sum(x_i - k)^2} \quad (20)$$

$$k_i = \frac{y_i + x_i}{2} \quad (21)$$

$$k = \frac{\sum y_i + \sum x_i}{2n} \quad (22)$$

Em que: A é o Coeficiente de Concordância; k_i é a média de y_i e x_i para a árvore i; y_i é o volume estimado da Amostragem para a árvore i; x_i é o volume estimado do TLS para a árvore i; n é o número de observações.

A Medida de Concordância (ρ) foi proposta por Mielke (1984). Ela pode ser escrita em duas formas equivalentes (23 e 24) para métodos de mínimos quadrados que minimizam a soma dos erros quadráticos (HUANG *et al.*, 2019). Os valores de ρ podem variar de -1 a 1. Quando $\rho = 1$ implica que todos os valores de y_i e x_i caem na linha de 45° que passa pela origem (concordância perfeita), e quando $\rho = -1$ implica que todos os valores de y_i e x_i caem na linha que é perpendicular à linha de 45° (discordância perfeita) (HUANG *et al.*, 2019).

$$\rho = 1 - \frac{\delta}{\mu_\delta} = 1 - \frac{MSE}{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (y_i - x_j)^2} \quad (23)$$

$$\rho = 1 - \frac{\delta}{\mu_\delta} = 1 - \frac{MSE}{S_y^2 + S_x^2 + (\bar{y} - \bar{x})^2} \quad (24)$$

$$MSE = \frac{\sum (y_i - x_i)^2}{n} \quad (25)$$

$$S_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n} \quad (26)$$

$$S_x^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (27)$$

Em que: ρ é a Medida de Concordância; MSE é *mean square error* (erro quadrático médio); S_y^2 é a variância de y; S_x^2 é a variância de x; y_i é o volume estimado da amostragem para a árvore i; x_i é o volume estimado do TLS para a árvore i; \bar{y} é a média de y; \bar{x} é a média de x; n é o número de observações.

O Coeficiente de Correlação de Concordância (CC1) foi introduzido por Lin (1989). Foi concebido para medir a concordância entre duas variáveis ou quaisquer

dois conjuntos de valores e pode ser expresso em duas formas equivalentes (28 e 29) (HUANG *et al.*, 2019). Quando $CC_1 = 1$, indica uma concordância perfeita entre y e x , quando $CC_1 = -1$, indica uma discordância perfeita entre y e x , e quando $CC_1 = 0$, indica ausência de concordância.

$$CC_1 = \frac{2S_{cov}}{S_y^2 + S_x^2 + (\bar{y} - \bar{x})^2} \quad (28)$$

$$CC_1 = \frac{2rS_yS_x}{S_y^2 + S_x^2 + (\bar{y} - \bar{x})^2} \quad (29)$$

$$r = \frac{\sum(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2 \sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad (30)$$

$$S_{cov} = \frac{1}{n} \sum(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x}) \quad (31)$$

Em que: CC_1 é o Coeficiente de Correlação de Concordância; r é o coeficiente de correlação; S_y^2 é a variância de y ; S_x^2 é a variância de x ; S_{cov} é a covariância; y_i é o volume estimado da Amostragem para a árvore i ; x_i é o volume estimado do TLS para a árvore i ; \bar{y} é a média de y ; \bar{x} é a média de x ; n é o número de observações.

Liao (2003), propôs o Coeficiente de Correlação de Concordância Melhorado (CC2), que assim como o CC1, varia de -1 a 1 e é dado por (32):

$$CC_2 = r A_p \quad (32)$$

$$A_p = \frac{4S_yS_x - r(S_y^2 + S_x^2)}{(2-r)(S_y^2 + S_x^2) + (\bar{y} - \bar{x})^2} \quad (33)$$

Em que: CC_2 é o Coeficiente de Correlação de Concordância Modificado; r é o coeficiente de correlação; S_y é o desvio padrão de y , S_x é o desvio padrão de x ; S_y^2 é a variância de y ; S_x^2 é a variância de x ; y é o volume estimado da Amostragem; x é o volume estimado do TLS; \bar{y} é a média de y ; \bar{x} é a média de x .

Duveiller *et al.* (2016) modificaram a medida de concordância de Mielke (1984) e propuseram uma medida de concordância à qual se referiram simplesmente como Parâmetro de Concordância (λ) (34). Essa medida varia de 0 a 1, quando $\lambda = 1$, a concordância é perfeita e quando $\lambda = 0$ significa ausência de concordância.

$$\lambda = 1 - \frac{\sum(y_i - x_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2 + \sum(x_i - \bar{x})^2 + n(\bar{y} - \bar{x})^2 + k} \quad (34)$$

$$k = 2 |\sum(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})| \quad (35)$$

Em que: λ é o Parâmetro de Concordância; y_i é o volume estimado da Amostragem para a árvore i ; x_i é o volume estimado do TLS para a árvore i ; \bar{y} é a média de y ; \bar{x} é a média de x ; n é o número de observações.

As estimativas de volume para o TLS também foram avaliadas por meio da análise gráfica de Bland-Altman (BLAND e ALTMAN, 1986). A análise de Bland-Altman fornece uma quantificação clara e completa da precisão do viés, sendo a técnica analítica mais comumente usada para estudos de concordância (HUANG *et al.*, 2019). Para a elaboração do Gráfico de Concordância de Bland-Altman no *software* R, foi utilizado o pacote “blandr” e a função *blandr.draw*.

No gráfico de dispersão de Bland-Altman, é possível visualizar o viés e o erro, além de *outliers* e tendências. A linha central (LC) do gráfico representa a média das diferenças entre as duas variáveis, dada pela expressão 36. Os limites inferior (LI) e superior (LS) são dados pelas expressões 37 e 38, respectivamente.

$$LC = \bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (36)$$

$$LI = \bar{D} - t_{(n-1; 1-\frac{\alpha}{2})} \frac{S_D}{\sqrt{n}} \quad (37)$$

$$LS = \bar{D} + t_{(n-1; 1-\frac{\alpha}{2})} \frac{S_D}{\sqrt{n}} \quad (38)$$

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - y_i) - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (39)$$

Em que: LC é o limite central; \bar{D} é a diferença média; y_i é o volume estimado da Amostragem para a árvore i ; x_i é o volume estimado do TLS para a árvore i ; \bar{y} é a média de y ; \bar{x} é a média de x ; n é o número de observações; LI é o limite inferior; LS é o limite superior; S_D é o desvio padrão das diferenças; $t_{(n-1; 1-\frac{\alpha}{2})}$ é o quantil de uma distribuição *t-Student*.

3.2.4.3 Etapa 03. Cálculo dos volumes parciais - TLS

Da nuvem de pontos TLS, foram extraídos os diâmetros (d_i) a aproximadamente cada 0,25 m de altura. Com esses diâmetros, foram calculados os volumes parciais (V_p) de 10 diferentes seções do fuste das árvores de *E. benthamii*, conforme mostrado na Tabela 5 e Figura 24, seguindo a Expressão 40.

$$V_p = g_0 \cdot h_0 + \sum \left(\frac{(g_i + g_{i+1})}{2} \cdot (h_{i+1} - h_i) \right) \quad (40)$$

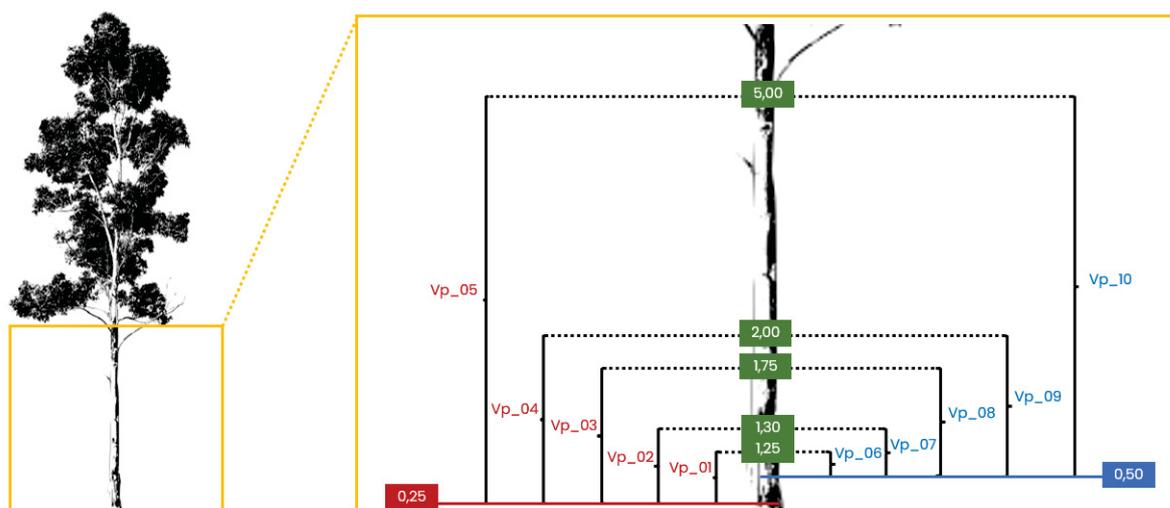
Em que: V_p é o volume parcial (volume da secção); $g_0 \cdot h_0$ é o volume do toco; $\sum \left(\frac{(g_i + g_{i+1})}{2} \cdot (h_{i+1} - h_i) \right)$ é o somatório dos volumes das secções intermediárias; g é a área transversal da secção, dado por $g = \frac{\pi \cdot DAP_i^2}{40.000}$; e h é o comprimento da secção (altura)”.

TABELA 5. RELAÇÃO DE SECÇÕES DO FUSTE UTILIZADAS NO CÁLCULO DOS VOLUMES PARCIAIS DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO DA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR

Volume	Secção	Volume	Secção
Vp_01	0,25 m a 1,25 m	Vp_06	0,50 m a 1,25 m
Vp_02	0,25 m a 1,30 m	Vp_07	0,50 m a 1,30 m
Vp_03	0,25 m a 1,75 m	Vp_08	0,50 m a 1,75 m
Vp_04	0,25 m a 2,00 m	Vp_09	0,50 m a 2,00 m
Vp_05	0,25 m a 5,00 m	Vp_10	0,50 m a 5,00 m

Vp_01,... e Vp_10 são os volumes parciais de 01 a 10, considerando diferentes secções do fuste da árvore.

FIGURA 24. ESQUEMA REPRESENTATIVO DAS DIFERENTES SECÇÕES DO FUSTE UTILIZADAS NO CÁLCULO DOS VOLUMES PARCIAIS DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO DA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



Vp_01,... e Vp_10 são os volumes parciais de 01 a 10, considerando diferentes secções do fuste da árvore.

Para determinar quais secções utilizar na estimativa do volume individual total, os volumes parciais foram correlacionados com o volume estimado da Amostragem e do TLS. As secções com Coeficiente de Correlação de Pearson (r) acima de 0,70 foram escolhidas para serem utilizadas nas estimativas dos volumes individuais ($V_{ind.}$).

3.2.4.4 Etapa 04. Estimativa do volume individual utilizando TLS

Para a estimativa do volume individual com base nos volumes parciais do TLS e volumes estimados da Amostragem foi utilizado um Modelo de Razão (TRAUTENMÜLLER, 2023; PÉLLICO NETTO e BEHLING, 2019), expresso em:

$$\hat{R} = \frac{\sum Y_i}{\sum X_i} \quad (41)$$

Em que: \hat{R} é o coeficiente angular estimado (Razão); X_i é o volume parcial da árvore i ; Y_i é o volume estimado proveniente da Amostragem da árvore i .

A Variância ($s_{\hat{Y}}^2$), Erro Padrão da Estimativa Absoluto (s_{yx}), Erro Padrão da Estimativa Relativo ($S_{yx\%}$) e Intervalo de Confiança (IC) foram calculadas com base nas expressões 42, 43, 44 e 45, respectivamente.

$$s_{\hat{Y}}^2 = \frac{N(N-n)}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{R}X_i)^2 \quad (42)$$

$$s_{YX} = \sqrt{\frac{N(N-n)}{n(n-1)} (\sum_{i=1}^n Y_i^2 - 2\hat{R} \sum_{i=1}^n Y_i X_i + \hat{R}^2 \sum_{i=1}^n X_i^2)} \quad (43)$$

$$S_{YX\%} = \frac{s_{YX}}{\hat{Y}} t \quad (44)$$

$$IC = \hat{Y} \pm t \sqrt{s_{\hat{Y}}^2} \quad (45)$$

Em que: $s_{\hat{Y}}^2$ é a variância da estimativa do volume; s_{YX} é o erro padrão da estimativa absoluto; $S_{YX\%}$ é o erro padrão da estimativa relativo; n é o número observações; N é o número total da população ; \hat{R} é o coeficiente angular estimado (Razão); y_i é o volume estimado da árvore i (Amostragem); e x_i é o volume parcial da árvore i obtido do TLS; \hat{Y} é a média da estimativa do volume; t é o valor da estatística *t-Student* para um nível de significância (α) de 0,01 e $n-1$ graus de liberdade; IC é o intervalo de confiança.

A estimativa do volume médio (\hat{Y}), ou ainda, volume individual médio ($V_{ind.}$) foi obtida pela expressão 46.

$$\hat{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{R} X_i}{n} \quad (46)$$

Em que: \hat{Y} é a média da estimativa do volume correspondente ao volume individual médio ($V_{ind.}$); \hat{R} é o coeficiente angular (Razão); X_i é o volume parcial do TLS; e n é o número de observações.

Os volumes individuais estimados pelo Modelo de Razão foram comparados com as estimativas dos volumes da Amostragem. A avaliação foi realizada por meio da Correlação de Pearson (r) e das medidas de concordância: Coeficiente de Concordância (A), Medida de Concordância (ρ), Coeficiente de Correlação de Concordância (CC1), Coeficiente de Correlação de Concordância Modificado (CC2), e Parâmetro de Concordância (λ), e da análise do Gráfico de Concordância de Bland-Altman (1986).

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Estatísticas Descritivas para Variáveis Obtidas na Cubagem

As estatísticas descritivas das variáveis obtidas da cubagem das 52 árvores de *E. benthamii* encontram-se na Tabela 6.

TABELA 6. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS OBTIDAS DA CUBAGEM DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR

Estatísticas	DAP (cm)	h (m)	V (m ³)
\bar{y}	35,27	24,10	1,1317
Máx.	50,50	30,20	2,3238
Mín.	13,81	12,33	0,0827
Amp.	36,69	17,87	2,2411
s	9,45	3,94	0,6037
CV%	26,80	16,34	53,34
n	52	52	52

Em que: \bar{y} é a média dos valores observados; Máx. é o valor máximo observado; Mín. é o valor mínimo observado; Amp. é a amplitude dos valores; s é o desvio padrão, CV% é o coeficiente de variação em percentagem; n é o número de observações.

3.3.2 Estatísticas Descritivas para as Variáveis Obtidas na Amostragem e TLS

As estatísticas descritivas das variáveis DAP e h obtidas pelos métodos Amostragem e TLS encontram-se na Tabela 7. Já a correlação dessas variáveis foi de 0,9327 para a altura (h) e 0,8339 para o Diâmetro à Altura do Peito (DAP).

TABELA 7. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS OBTIDAS DA AMOSTRAGEM E DO TLS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR

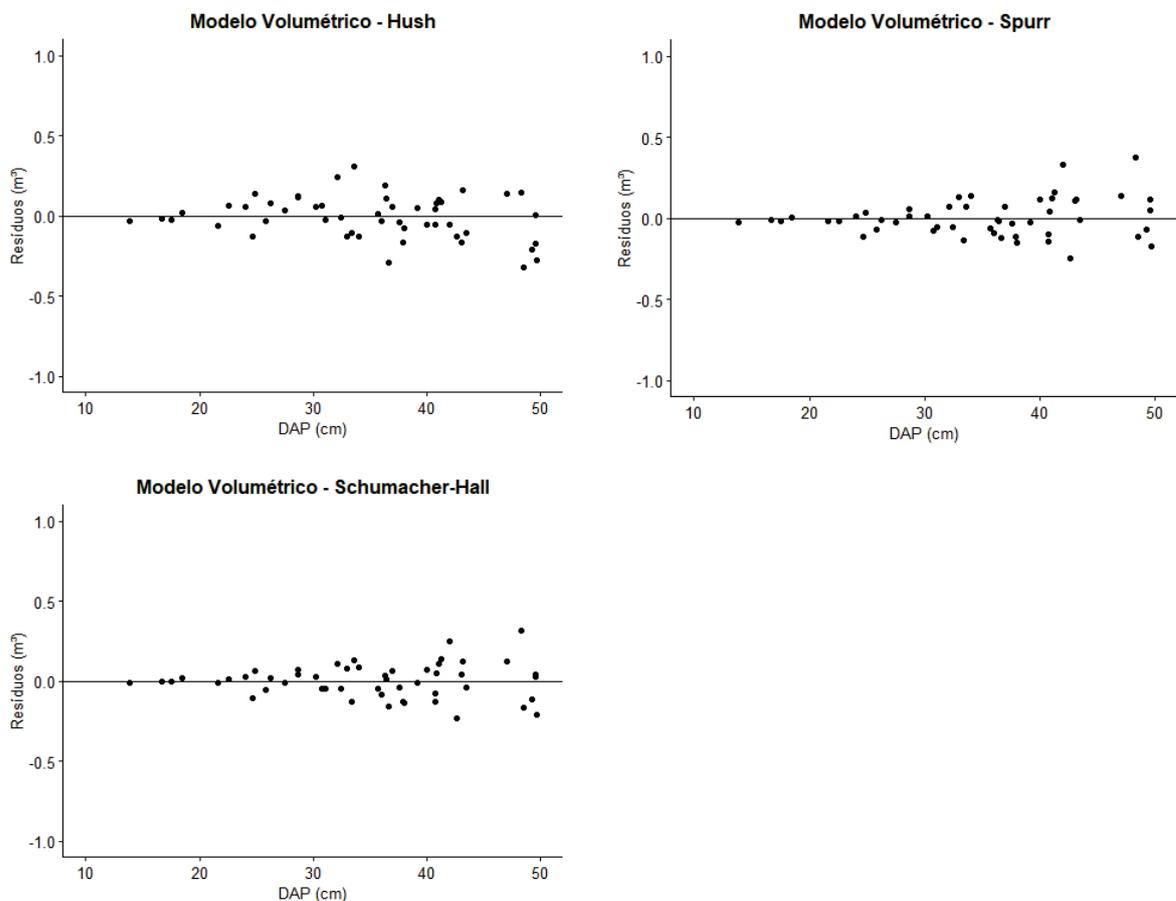
Estatísticas	Amostragem		TLS	
	DAP (cm)	h (m)	DAP (cm)	h (m)
\bar{y}	40,40	22,01	40,04	22,35
Máx.	46,00	26,20	47,94	25,86
Mín.	32,00	15,60	30,38	16,07
Amp.	14,00	10,60	17,56	9,79
s	3,72	2,71	4,54	2,82
CV%	9,21	12,32	11,34	12,60
n	20	20	20	20

Em que: \bar{y} é a média dos valores observados; Máx. é o valor máximo observado; Mín. é o valor mínimo observado; Amp. é a amplitude dos valores; s é o desvio padrão, CV% é o coeficiente de variação em percentagem; n é o número de observações.

3.3.3 Modelagem do Volume - Equações de Volume

Após o ajuste das equações de volume, observou-se na análise dos gráficos de resíduos (Figura 25) que as três equações apresentam heteroscedasticidade dos resíduos, sendo necessário realizar a ponderação dos ajustes.

FIGURA 25. GRÁFICO DE RESÍDUOS ORIUNDOS DO AJUSTE DAS TRÊS EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS PARA A ESTIMATIVA DO VOLUME DE ÁRVORES DE EUCALIPTO



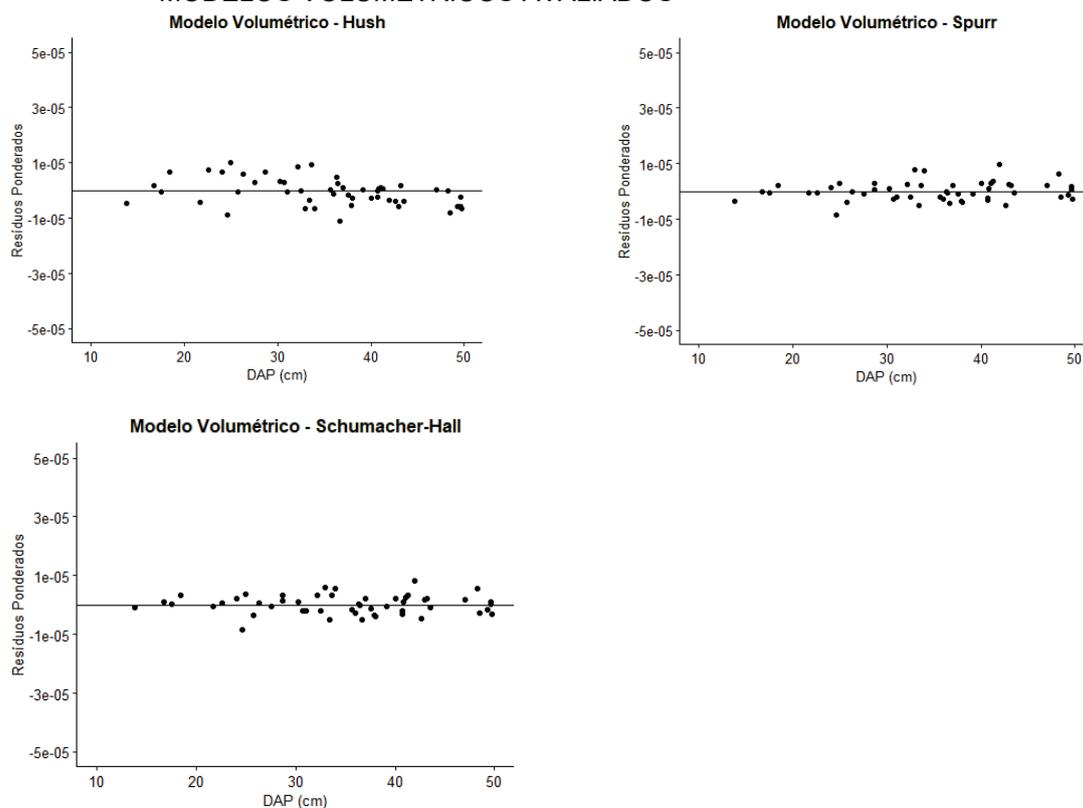
Após a ponderação dos ajustes foram obtidos os coeficientes e estatísticas de avaliação dos ajustes apresentados na Tabela (8). Com a ponderação dos ajustes, os resíduos apresentaram distribuição homogênea para as três equações (Figura 26). O modelo de Schumacher-Hall foi selecionado para a próxima etapa com base nas estatísticas de avaliação.

TABELA 8. MODELOS VOLUMÉTRICOS, COEFICIENTES E SUAS RESPECTIVAS ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO APÓS A PONDERAÇÃO DOS AJUSTES

n	Modelo	Coeficientes			Estatísticas			Teste
		β_0	β_1	β_2	S_{yx}	$S_{yx\%}$	$R^2_{aj.}$	W p-valor
01	Husch	-9,0930	2,5623	-	0,1919	16,95	0,90	0,4180
02	Spurr	0,0123	0,0000336	-	0,1219	10,77	0,98	0,0918
03	Schumacher-Hall	-9,9692	2,0442	0,8512	0,1187	10,49	0,96	0,7856

Em que: W é o teste de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk.

FIGURA 26. GRÁFICO DE RESÍDUOS ORIUNDOS DO AJUSTE PONDERADO PARA OS TRÊS MODELOS VOLUMÉTRICOS AVALIADOS



3.3.4 Estimativa do Volume - Amostragem e TLS

As estatísticas descritivas dos volumes estimados com o modelo de Schumacher-Hall, por meio de dados provenientes da Amostragem e TLS é apresentada na Tabela 9. A correlação de Pearson (r) dos volumes estimados com base nos dois conjuntos de dados foi de 0,8575.

TABELA 9. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS ESTIMATIVAS DE VOLUME OBTIDAS COM BASE NOS DADOS DA AMOSTRAGEM E TLS PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR

Estatísticas	Amostragem	TLS
	Ve (m³)	Ve (m³)
\bar{y}	1,2698	1,2699
Máx.	1,8911	1,9285
Mín.	0,6107	0,5741
Amp.	1,2804	1,3543
s	0,3014	0,3506
CV%	23,74	27,60
n	20	20

Em que: \bar{y} é a média dos valores observados; Máx. é o valor máximo observado; Mín. é o valor mínimo observado; Amp. é a amplitude dos valores; s é o desvio padrão, CV% é o coeficiente de variação em porcentagem; n é o número de observações.

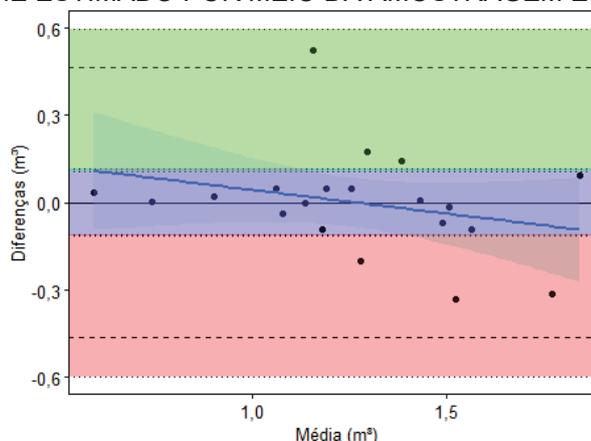
A avaliação da concordância entre as estimativas dos volumes da Amostragem e TLS é dada pelas Medidas de Concordância (Tabela 10), e o Gráfico de Concordância de Bland-Altman (Figura 27).

TABELA 10. MEDIDAS DE CONCORDÂNCIA DAS ESTIMATIVAS DE VOLUME OBTIDAS COM OS DADOS DE AMOSTRAGEM E TLS PARA ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR

Medida	A	ρ	CC1	CC2	λ
Valor	0,9239	0,8478	0,8478	0,8406	0,9176

Em que: A é o Coeficiente de Concordância (0 a 1); ρ é a Medida de Concordância (-1 a 1); CC1 é o Coeficiente de Correlação de Concordância (-1 a 1); CC2 é a Correlação de Concordância Modificado (-1 a 1); λ é o Parâmetro de Concordância (0 a 1).

FIGURA 27. GRÁFICO DE CONCORDÂNCIA DE BLAND-ALTMAN COM AS DIFERENÇAS MÉDIAS DE VOLUME ESTIMADO POR MEIO DA AMOSTRAGEM E TLS



3.3.5 Cálculo dos Volumes Parciais - TLS

Os volumes parciais de 10 secções do fuste de 20 árvores foram calculados, com base nos dados TLS, as estatísticas descritivas desses volumes parciais são apresentadas na Tabela 11.

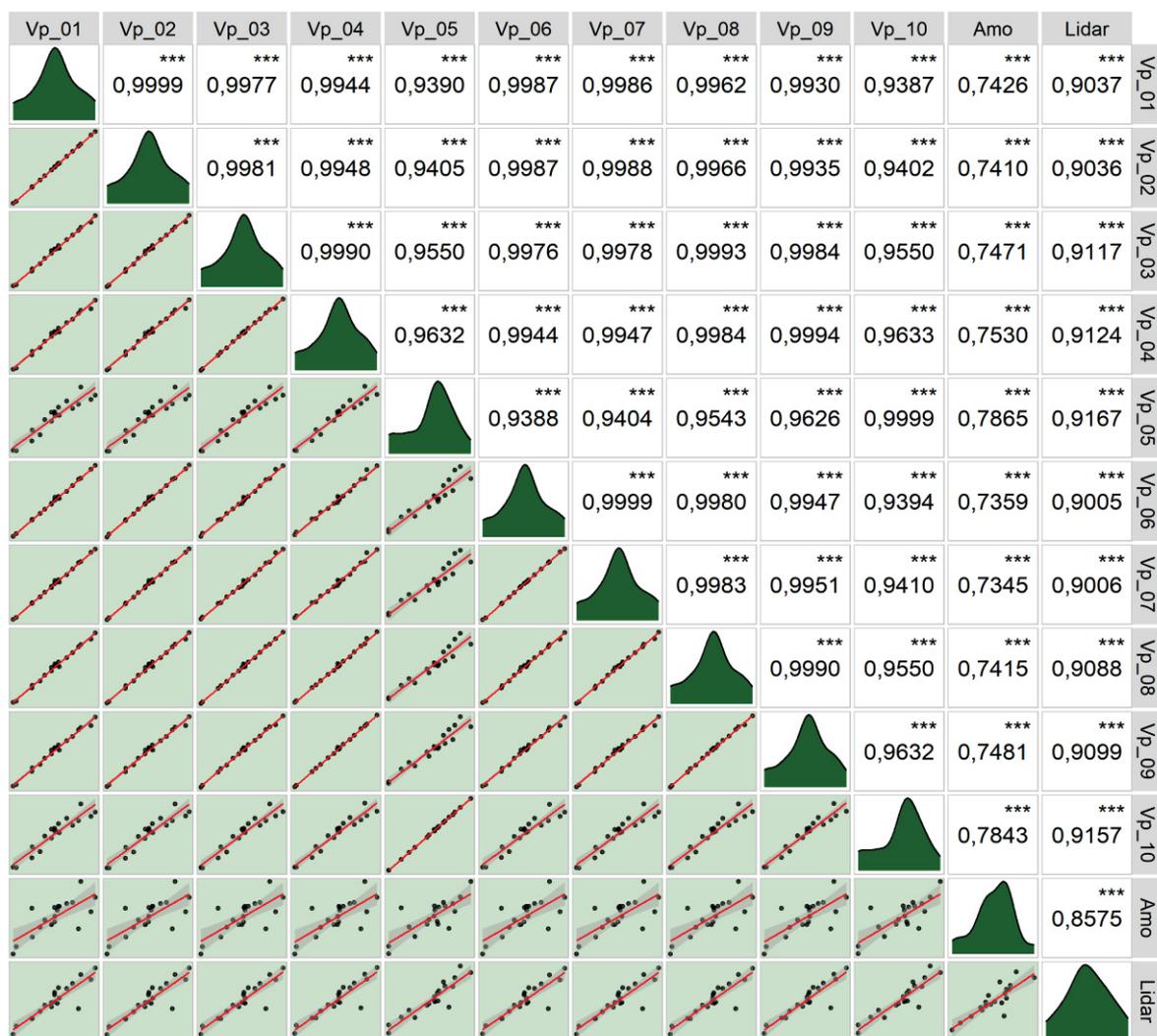
TABELA 11. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS VOLUMES PARCIAIS OBTIDOS DO TLS PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO DA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR

Volumes (m ³)	Estatísticas							
	\bar{y}	Máx.	Mín.	Amp.	s	CV%	V%	n
Ve TLS	1,2699	1,9285	0,5741	1,3543	0,3506	27,60	100,00	20
Vp_01 (0,25-1,25)	0,1782	0,2431	0,1095	0,1336	0,0360	20,18	14,03	20
Vp_02 (0,25-1,30)	0,1848	0,2514	0,1147	0,1367	0,0372	20,12	14,55	20
Vp_03 (0,25-1,75)	0,2395	0,3262	0,1479	0,1783	0,0480	20,04	18,86	20
Vp_04 (0,25-2,00)	0,2685	0,3643	0,1640	0,2003	0,0537	20,00	21,14	20
Vp_05 (0,25-5,00)	0,5683	0,7569	0,3507	0,4062	0,1106	19,47	44,75	20
Vp_06 (0,50-1,25)	0,1756	0,2414	0,1062	0,1352	0,0361	20,58	13,83	20
Vp_07 (0,50-1,30)	0,1822	0,2496	0,1115	0,1381	0,0373	20,50	14,35	20
Vp_08 (0,50-1,75)	0,2369	0,3244	0,1447	0,1797	0,0482	20,34	18,66	20
Vp_09 (0,50-2,00)	0,2659	0,3625	0,1607	0,2018	0,0539	20,27	20,94	20
Vp_10 (0,50-5,00)	0,5657	0,7539	0,3482	0,4057	0,1108	19,58	44,55	20

Em que: Vp_01,... e Vp_10 são os volumes parciais de 01 a 10, considerando diferentes secções do tronco da árvore; Ve TLS é o volume estimado do TLS; \bar{y} é a média dos valores observados; Máx. é o valor máximo observado; Mín. é o valor mínimo observado; Amp. é a amplitude dos valores; s é o desvio padrão, CV% é o coeficiente de variação em percentagem; n é o número de observações; V% é o percentual que o volume parcial representa do volume médio das árvores, levando em consideração o volume estimado do TLS.

Os dez volumes parciais oriundos do TLS foram correlacionados com o volume estimado da Amostragem (Amo) e do LiDAR terrestre (Lidar) (Figura 28). Os volumes parciais que apresentaram correlação superior a 0,700 foram considerados na estimativa do volume individual total.

FIGURA 28. VOLUMES PARCIAIS OBTIDOS DO TLS E A CORRELAÇÃO DESSES VOLUMES COM O VOLUME ESTIMADO DA AMOSTRAGEM E DO TLS



Em que: Vp_01,... e Vp_10 são os volumes parciais de 01 a 10, considerando diferentes secções do tronco da árvore; Amo é o volume estimado da Amostragem e Lidar é o volume estimado do TLS.

3.3.6 Estimativa do Volume Total Individual Utilizando o TLS

Com base nos volumes estimados da Amostragem e os dez volumes parciais do TLS, utilizando o Modelo de Razão, a estimativa do volume individual total médio ($V_{ind.}$) e o intervalo de confiança da estimativa, seguido das estatísticas descritivas está apresentada na Tabela 12. Já as estatísticas de avaliação dessas estimativas estão apresentadas na Tabela 13.

TABELA 12. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS ESTIMATIVAS DE VOLUME INDIVIDUAL TOTAL OBTIDAS COM O MODELO DE RAZÃO, COM BASE NOS VOLUMES ESTIMADOS DA AMOSTRAGEM E VOLUMES PARCIAIS DO TLS PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO DA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR

Volumes (m ³)	Estatísticas						
	$\hat{Y} + IC$	Máx.	Mín.	Amp.	s	CV%	n
V _{ind.01}	1,2698 ± 0,1311	1,7325	0,7804	0,9521	0,2563	20,18	20
V _{ind.02}	1,2698 ± 0,1295	1,7276	0,7882	0,9394	0,2555	20,13	20
V _{ind.03}	1,2698 ± 0,1281	1,7295	0,7841	0,9453	0,2545	20,04	20
V _{ind.04}	1,2698 ± 0,1193	1,7229	0,7756	0,9473	0,2540	20,00	20
V _{ind.05}	1,2698 ± 0,1330	1,6912	0,7836	0,9076	0,2472	19,47	20
V _{ind.06}	1,2698 ± 0,1332	1,7460	0,7681	0,9779	0,2614	20,58	20
V _{ind.07}	1,2698 ± 0,1313	1,7399	0,7772	0,9626	0,2603	20,50	20
V _{ind.08}	1,2698 ± 0,1296	1,7388	0,7756	0,9632	0,2583	20,34	20
V _{ind.09}	1,2698 ± 0,1199	1,7313	0,7675	0,9638	0,2574	20,27	20
V _{ind.10}	1,2698 ± 0,1381	1,6923	0,7816	0,9107	0,2487	19,58	20

Em que: V_{ind.01} a V_{ind.10} são os volumes individuais de 1 a 10 calculados com base nos volumes parciais de 01 a 10, respectivamente; \hat{Y} é a média dos volumes calculados pelo Modelo de Razão; IC é o intervalo de confiança; Máx. é o valor máximo observado; Mín. é o valor mínimo observado; Amp. é a amplitude dos valores; s é o desvio padrão, CV% é o coeficiente de variação em porcentagem; n é o número de observações.

TABELA 13 - ESTIMATIVAS DE VOLUME INDIVIDUAL TOTAL MÉDIO COM BASE EM DIFERENTES VOLUMES PARCIAIS DO TLS, ESTIMADAS PELO MODELO DE RAZÃO E ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO OBTIDAS PARA ÁRVORES DE EUCALIPTO DA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR

Volumes (m ³)	Estatísticas de Avaliação				
	$\hat{Y} + IC$	\hat{R}	$s_{\hat{Y}}^2$	S_{yx}	$S_{yx\%}$
V _{ind.01}	1,2698 ± 0,1311	7,1267	0,0021	0,0457	10,30
V _{ind.02}	1,2698 ± 0,1295	6,8720	0,0021	0,0458	10,33
V _{ind.03}	1,2698 ± 0,1281	5,3019	0,0021	0,0453	10,20
V _{ind.04}	1,2698 ± 0,1193	4,7294	0,0020	0,0448	10,09
V _{ind.05}	1,2698 ± 0,1330	2,2344	0,0017	0,0417	9,39
V _{ind.06}	1,2698 ± 0,1332	7,2326	0,0022	0,0465	10,47
V _{ind.07}	1,2698 ± 0,1313	6,9706	0,0022	0,0466	10,49
V _{ind.08}	1,2698 ± 0,1296	5,3600	0,0021	0,0459	10,34
V _{ind.09}	1,2698 ± 0,1199	4,7760	0,0021	0,0453	10,20
V _{ind.10}	1,2698 ± 0,1381	2,2448	0,0018	0,0419	9,44

Em que: V_{ind.01} a V_{ind.10} são os volumes individuais de 1 a 10 calculados com base nos volumes parciais de 01 a 10, respectivamente; \hat{Y} é a média dos volumes calculados pelo Modelo de Razão; IC é o intervalo de confiança; \hat{R} é o coeficiente angular estimado (Razão); $s_{\hat{Y}}^2$ é a variância da estimativa do

volume das árvores; s_{yx} é o erro padrão da estimativa do volume das árvores; $S_{yx\%}$ é o erro padrão da estimativa em porcentagem.

As medidas de concordância avaliando as estimativas dos volumes individuais, obtidos com base nos volumes parciais do TLS, em comparação ao volume estimado da Amostragem são apresentadas na Tabela 14. E os Gráficos de Concordância de Bland-Altman são apresentados nas Figura 29 e 30.

TABELA 14. MEDIDAS DE CONCORDÂNCIA CALCULADAS COM BASE NOS VOLUMES INDIVIDUAIS ESTIMADOS E VOLUME ESTIMADO DA AMOSTRAGEM PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR

Volumes (m ³)	Medidas de Concordância				
	A	ρ	CC1	CC2	λ
V _{ind.01}	0,8665	0,7329	0,7329	0,7272	0,8459
V _{ind.02}	0,8655	0,7310	0,7310	0,7251	0,8446
V _{ind.03}	0,8683	0,7365	0,7365	0,7302	0,8483
V _{ind.04}	0,8710	0,7421	0,7421	0,7355	0,8519
V _{ind.05}	0,8857	0,7713	0,7713	0,7614	0,8709
V _{ind.06}	0,8642	0,7285	0,7285	0,7241	0,8429
V _{ind.07}	0,8634	0,7267	0,7267	0,7222	0,8417
V _{ind.08}	0,8664	0,7327	0,7327	0,7276	0,8457
V _{ind.09}	0,8694	0,7388	0,7388	0,7333	0,8498
V _{ind.10}	0,8850	0,7700	0,7700	0,7608	0,8701

Em que: V_{ind.01} a V_{ind.10} são os volumes individuais de 1 a 10 calculados com base nos volumes parciais de 01 a 10, respectivamente; A é o Coeficiente de Concordância (0 a 1); ρ é a Medida de Concordância (-1 a 1); CC1 é o Coeficiente de Correlação de Concordância (-1 a 1); CC2 é a Correlação de Concordância Modificado (-1 a 1); λ é o Parâmetro de Concordância (0 a 1).

FIGURA 29. GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN PARA AVALIAR A CONCORDÂNCIA ENTRE OS VOLUMES INDIVIDUAIS ESTIMADOS DE 01 A 05 E O VOLUME ESTIMADO DA AMOSTRAGEM PARA ÁRVORES DE EUCALIPTO LOCALIZADOS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR

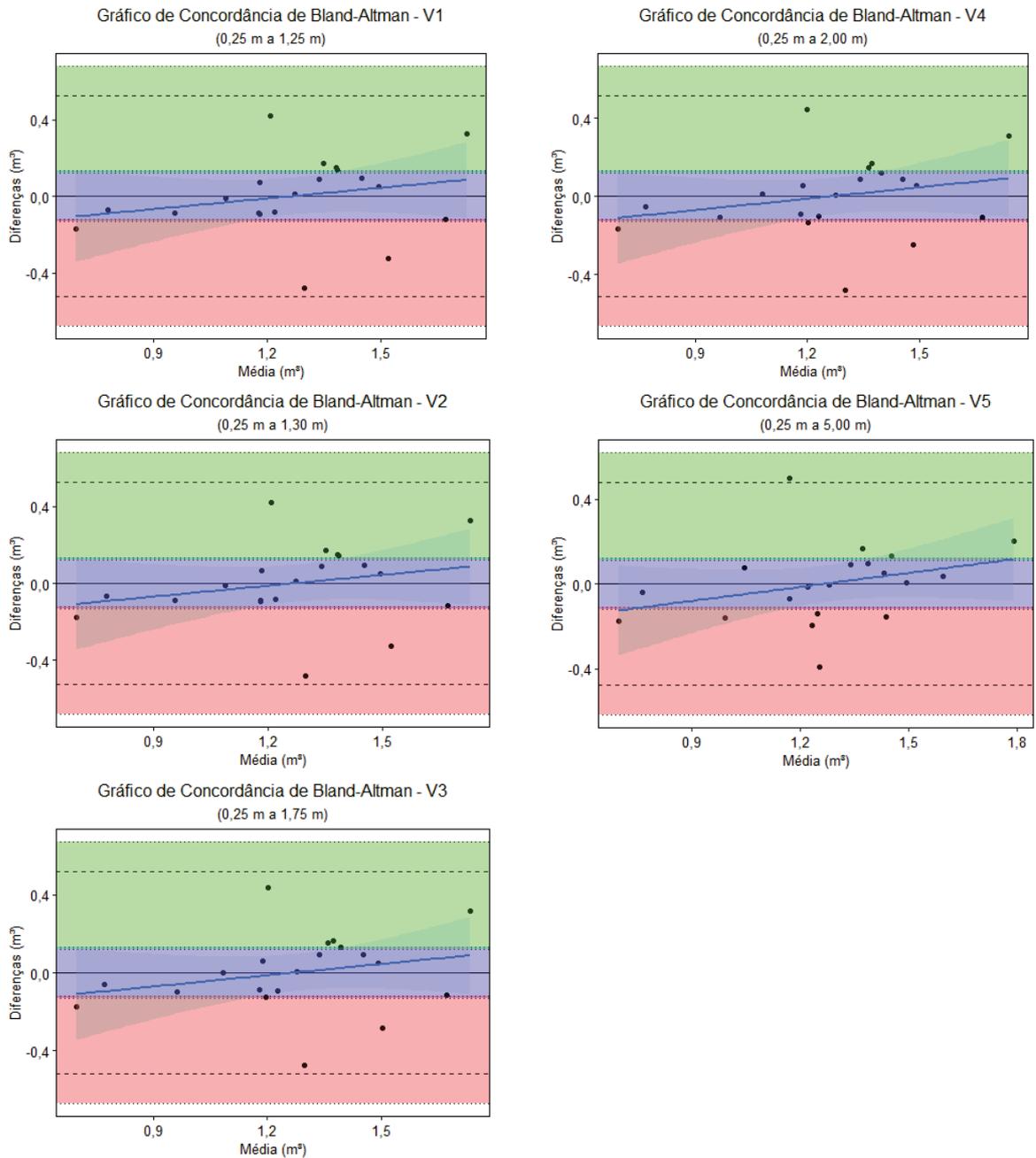
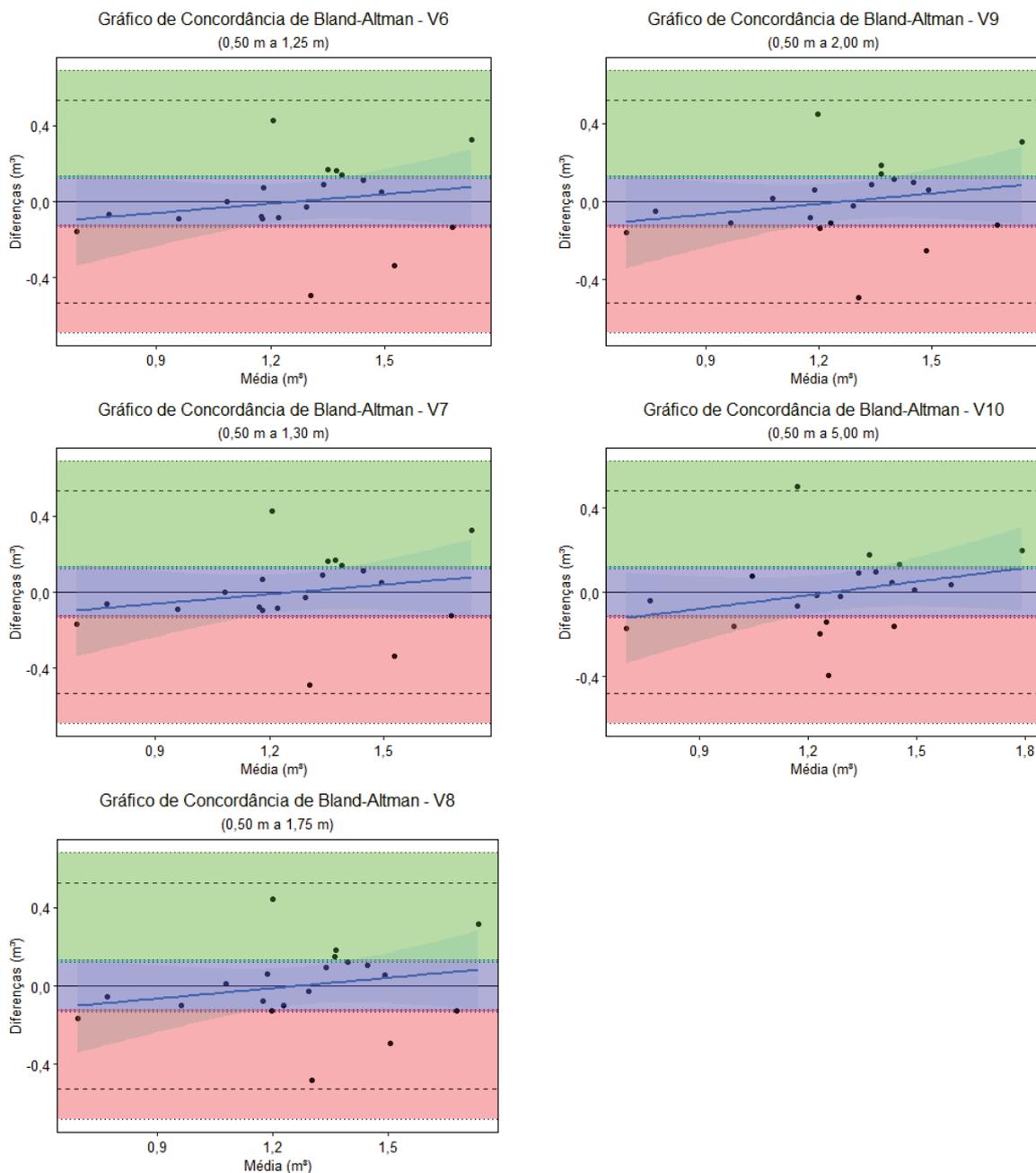


FIGURA 30. GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN PARA AVALIAR A CONCORDÂNCIA ENTRE OS VOLUMES INDIVIDUAIS ESTIMADOS DE 06 A 10 E O VOLUME ESTIMADO DA AMOSTRAGEM PARA ÁRVORES DE EUCALIPTO LOCALIZADOS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR



3.4 DISCUSSÕES

A variação no volume obtido pela Cubagem decorre do fato de que as árvores cubadas abrangem diversas classes de tamanho. O conjunto de dados inclui árvores pequenas, médias e grandes, o que resulta em volumes distintos e, conseqüentemente, heterogeneidade de valores ($CV\% = 53,34\%$). É importante ressaltar que o volume está diretamente relacionado ao diâmetro à altura do peito (DAP) e à altura total das árvores (PÉLLICO NETTO; BEHLING, 2018). Essa relação entre volume, DAP e altura é fundamental para compreender a variabilidade observada nos resultados da Cubagem.

Devido ao amplo espaçamento entre árvores (28 m x 10 m) utilizadas nesse estudo e à utilização de múltiplas varreduras TLS, não ocorreu o problema de oclusão nas varreduras do TLS devido à sobreposição de árvores. Os valores das estatísticas média, mínimo e máximo das variáveis DAP e altura (h) obtidos tanto pela Amostragem em campo quanto pelo TLS são próximos (Tabela 7). Embora os DAP obtidos do TLS tenham apresentado menor correlação ($r > 0,83$) com os DAP da Amostragem em campo, quando comparados com a correlação das alturas ($r > 0,93$), é relevante destacar que as correlações para ambas as variáveis ainda foram consideradas fortes. Esses resultados corroboram com os encontrados nos estudos conduzidos por Yrttimaa *et al.* (2020) e Ko *et al.* (2022).

Ao serem ajustados os três modelos volumétricos, observou-se que a equação de Schumacher-Hall apresentou um desempenho levemente superior às equações de Spurr e Husch (Tabela 8). Isso foi avaliado considerando as seguintes estatísticas: erro padrão da estimativa relativo ($S_{yx}\% = 10,49$), coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj} = 0,96$) e teste de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk (p-valor = 0,7856). A equação de Schumacher-Hall é amplamente empregada na estimativa do volume das árvores e desempenha um papel consolidado na área florestal, conforme evidenciado em diversos estudos (RIBEIRO *et al.*, 2014; TONINI; BORGES, 2015; CORREIA *et al.*, 2017; DE ANDRADE *et al.*, 2019; CUNHA *et al.*, 2022; AGUIAR JÚNIOR *et al.*, 2022).

Observou-se que a média dos volumes estimados com base nos diâmetros à altura do peito e alturas obtidos em campo, tanto pela Amostragem quanto pelo TLS, foram muito próximos, 1,2698 m³ e 1,2699 m³, respectivamente (Tabela 9). Além disso, esses resultados exibiram alta correlação ($r > 0,85$). As Medidas de

Concordância (Tabela 10), indicam que os resultados da Amostragem e do TLS são concordantes, com valores superiores a 0,84 para as medidas que variam de -1 a 1 e maiores que 0,91 para aquelas que variam de 0 a 1. O gráfico de Concordância de Bland-Altman também revelou que os dois resultados, Amostragem e TLS, são consistentes, ou seja, apresentam concordância (Figura 27).

Devido à presença de galhos na porção da copa, enfrentou-se dificuldades para medir com precisão os diâmetros ao longo de todo o fuste da árvore com o TLS (HACKENBERG *et al.* 2015; YRTTIMAA *et al.*, 2020; KO *et al.*, 2022, TIENAHO *et al.*, 2022). No entanto, neste estudo, observou-se uma forte correlação ($r > 0,70$) entre os volumes parciais obtidos pelo TLS e o volume estimado pela Amostragem (Figura 28). Nesse sentido, foi testada a hipótese de que uma representação parcial do fuste das árvores, obtida por meio do TLS, pode estimar com acurácia o volume total individual das árvores.

Com base nos dez volumes parciais do LiDAR TLS e nos volumes estimados da Amostragem, utilizando o Modelo de Razão, foram realizadas as estimativas dos volumes individuais totais médios e o intervalo de confiança dessas estimativas (Tabela 12 e 13). Observou-se que a média do volume individual 5 (V_{ind5}) foi a estimativa com menor erro padrão em percentagem ($S_{yx\%} = 9,39\%$) e menor coeficiente de variação ($CV\% = 19,47$), seguido do V_{ind10} ($S_{yx\%} = 9,44\%$ e $CV\% = 19,58\%$).

A proposta metodológica sugere que os volumes parciais obtidos com o TLS, calculados com base nas dez diferentes secções das árvores, são satisfatórios para estimar o volume individual total das árvores. Ao considerar as medidas de concordâncias (Tabela 14) e os Gráficos de Concordância de Bland-Altman (Figura 29 e 30), observa-se que os dois métodos, TLS e Amostragem, são estatisticamente concordantes.

O Coeficiente de Concordância (A) e o Parâmetro de Concordância (λ) variam de 0 a 1 e apresentaram valores próximos e superiores a 0,84. Já a Medida de Concordância (p), Coeficiente de Correlação de Concordância (CC1) e Correlação de Concordância Modificado (CC2), que têm intervalo de -1 a 1, também apresentaram resultados aproximados e superiores a 0,72. Essas medidas revelaram concordância entre as estimativas do volume individual do TLS e do volume estimado da

Amostragem. Destaca-se que os maiores valores de medidas de concordância foram observados para o V_{ind5} , seguido do V_{ind10} .

Esses resultados apontam que, estatisticamente, quanto maior o volume parcial utilizado na estimativa do volume total individual, mais exata será a estimativa. No entanto, é importante ressaltar que as estimativas de volumes individuais obtidas com base nos volumes parciais de secções menores também foram estatisticamente satisfatórias e podem ser utilizadas com confiança.

A utilização de varreduras TLS representa uma abordagem atrativa, especialmente por ser não destrutiva na estimativa do volume individual total das árvores (HACKENBERG *et al.*, 2015; BREDE *et al.*, 2019; SHIMIZU *et al.*, 2022; RODDA *et al.*, 2023). No contexto de sistemas agroflorestais, onde as árvores frequentemente possuem grande porte e valor econômico, a abordagem com TLS é particularmente útil.

O TLS permite obter informações detalhadas sobre a estrutura das árvores sem a necessidade de cortá-las, preservando a integridade do sistema agroflorestal. Isso é especialmente relevante em sistemas agroflorestais, nos quais a manutenção da cobertura arbórea é essencial. O baixo número de árvores por unidade de área, comum nesses sistemas, exige uma abordagem que minimize o corte de árvores. Além disso, devido ao porte das árvores, cada uma delas geralmente possui um valor agregado considerável em termos de volume de madeira destinado a usos mais nobres.

Em sistemas agroflorestais, as árvores geralmente são plantadas com espaçamentos maiores e enfrentam menos competição por luz solar. Essa configuração cria condições ideais para a aquisição precisa e acurada de dados TLS. A tecnologia TLS é capaz de fornecer informações detalhadas do fuste das árvores, especialmente da porção inicial do fuste, livre de galhos, e fornece condições excelentes para a mensuração do volume na parte mais valiosa da árvore.

A observação de que, em média, até os primeiros cinco metros de altura, as árvores permanecem livres de galhos devido às práticas de desrama empregadas no manejo do sistema agroflorestal revela uma característica importante e estrategicamente relevante para o uso do TLS. A desrama contribui para a obtenção de madeira com qualidade, livre de nós, é necessária para o bem-estar animal, para aumentar a luminosidade às plantas consorciadas e permite a aquisição de dados acurados dessa porção do fuste pelas varreduras TLS.

Além disso, a atividade de desrama das árvores até cinco metros de altura total da árvore acarreta uma porção significativa da árvore sem galhos, representando aproximadamente 45% do seu volume total. Esse segmento inicial do tronco, livre de galhos, é frequentemente associado à madeira de alta qualidade e também é um ponto estratégico para a aquisição dos dados TLS.

Com base nos resultados obtidos, destaca-se que o uso do TLS em sistemas agroflorestais é uma abordagem estratégica e recomendável. A obtenção de dados TLS direcionada ao fuste, especialmente em segmentos iniciais e livres de galhos, não apenas permite estimativas acuradas do volume parcial mais valioso, mas também possibilita a estimativa do volume total da árvore. Essa abordagem é fundamental para otimizar o manejo florestal e garantir a qualidade da madeira produzida.

3.5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesse capítulo, conclui-se que:

- Apesar das dificuldades em medir com exatidão os diâmetros ao longo de todo o fuste da árvore com o TLS, devido à presença de galhos na porção da copa, observou-se uma correlação superior a 0,70 entre os volumes parciais obtidos pelo TLS e o volume estimado pela Amostragem.
- A hipótese de que uma representação parcial do fuste das árvores, obtida por meio do TLS, pode estimar com acurácia o volume total individual das árvores foi confirmada pelas estatísticas de avaliação das estimativas, medidas de concordância e gráficos de concordância de Bland-Altman.
- O TLS fornece informações detalhadas do fuste das árvores, especialmente da porção inicial livre de galhos, permitindo a mensuração do volume na parte mais valiosa da árvore.
- A atividade de desrama até cinco metros de altura total da árvore libera uma porção significativa da árvore sem galhos, representando aproximadamente 45% do seu volume total.
- O volume individual 5 (V_{ind5}) foi a estimativa com menor erro padrão da estimativa em percentagem e menor coeficiente de variação seguida do V_{ind10} .
- No contexto de sistemas agroflorestais, onde a manutenção da cobertura arbórea é essencial, as árvores frequentemente possuem grande porte e valor econômico. Nesse cenário, a abordagem com o TLS é particularmente útil, pois é não destrutiva.
- Os resultados apontam que quanto maior o volume parcial utilizado na estimativa do volume total individual, mais exata será a estimativa. Porém, estimativas de volume individual obtidas com base em volumes parciais de secções menores do fuste também são estatisticamente satisfatórias e podem ser utilizadas com confiança nas estimativas dos volumes individuais.

4 VOLUME POR SORTIMENTO DE MADEIRA DE EUCALIPTO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS INTEGRADOS COM O USO DE TLS

4.1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva do setor florestal brasileiro é notável por sua diversidade de produtos e engloba um conjunto abrangente de atividades, desde a produção até a transformação da madeira em produtos. No Brasil, a cadeia produtiva de árvores plantadas está contemplada em duas atividades, que compreendem a agropecuária (produção florestal) e a indústria de transformação (fabricação de produtos de madeira e fabricação de celulose, papel e produtos de papel) (IBÁ, 2023).

Para otimizar a utilização dos produtos florestais, é importante quantificar com acurácia o volume de madeira dos plantios. Com a crescente demanda por produtos florestais diversificados e de qualidade, as empresas do setor florestal buscam obter um maior número de informações sobre suas áreas de cultivo (MIGUEL *et al.*, 2010). Nesse contexto, os inventários florestais tornaram-se mais complexos, fornecendo detalhes essenciais sobre a estrutura e características das árvores (SOUZA *et al.*, 2008).

Dentre as técnicas utilizadas para quantificação e qualificação dos produtos florestais, destacam-se as equações de afilamento, também conhecidas como equações de *taper*. Essas equações permitem estimar o diâmetro em diferentes alturas do fuste, bem como o volume de sortimentos e o volume total das árvores. Estes são fundamentais para a quantificação do volume total e comercial de madeira, considerando diferentes diâmetros e alturas de interesse (MIGUEL *et al.*, 2011; CAMPOS e LEITE, 2017).

A cubagem do fuste é a técnica tradicionalmente empregada para obter dados destinados ao ajuste de funções de afilamento. No entanto, essa abordagem demanda o corte e derrubada de árvores, um procedimento padrão, que é uma atividade de campo demorada e trabalhosa (HU *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o *Light Detection and Ranging* (LiDAR), com a varredura a *laser* terrestre (*Terrestrial Laser Scanning*, TLS) oferece uma solução para medir a estrutura das árvores de forma rápida, precisa e não destrutiva (KANKARE *et al.*, 2013, HUNČAGA *et al.*, 2020, HU *et al.*, 2021). *Scanners a laser* terrestres de posição

fixa (montados em um tripé) oferecem alto potencial para mapeamento tridimensional (3D) do fuste das árvores com grau alto de detalhamento.

O uso do TLS emerge como uma alternativa para a obtenção de dados destinados a funções de afilamento. Essa tecnologia permite a obtenção de informações detalhadas sobre a estrutura das árvores sem a necessidade de cortá-las, utilizando pulsos de *laser* para medir distâncias e criar representações tridimensionais do ambiente, incluindo a geometria do fuste e altura das árvores (KANKARE *et al.*, 2013). Isso contribui para a aquisição de dados com precisão e acurácia, permitindo estimar o volume total e volume dos sortimentos.

No contexto dos sistemas agroflorestais, a aplicação do TLS ganha ainda mais relevância devido à particularidade do manejo florestal adotado. As árvores muitas vezes são implantadas com espaçamentos amplos e são submetidas a práticas de manejo, como desramas, resultando em porções livres de galhos ao longo do fuste até determinada altura. Essa característica específica torna o TLS uma ferramenta excepcional para obter dados na porção livre de galhos, que geralmente é a parte mais valiosa das árvores em termos de volume de madeira e representam uma porcentagem significativa do volume total.

Ao utilizar o TLS para medir a porção do fuste livre de galhos, é possível obter dados precisos e acurados de forma não destrutiva. Entretanto, é importante considerar a necessidade de complementar essas medições com informações sobre a porção do fuste que não foi medida com o TLS. Para essa porção, que normalmente se estende além da altura livre de galhos até a altura total da árvore, é necessário recorrer a estimativas.

O TLS, apesar de ser uma tecnologia poderosa para a obtenção de dados tridimensionais, pode enfrentar desafios na aquisição de informações sobre a porção do fuste localizada na parte superior, onde se concentra a copa da árvore. Essa dificuldade está associada principalmente à oclusão, que ocorre quando os galhos e folhas impedem a penetração efetiva dos pulsos de *laser* emitidos pelo sensor LiDAR (YRTTIMAA *et al.*, 2020; KO *et al.*, 2022, TIENAHUO *et al.*, 2022). A oclusão pode limitar as informações sobre o fuste na região da copa, afetando a qualidade dos dados para análises de afilamento ou estimativas de volume nessa porção da árvore.

Ao utilizar o TLS para obter dados na porção livre de galhos do fuste, torna-se necessário gerar uma função de afilamento que seja representativa do fuste total, abrangendo tanto a porção livre de galhos quanto a porção com galhos. Isso é

necessário para estimar com acuracidade o volume total da árvore e obter uma descrição da forma da árvore visando a estimativa de sortimentos.

A obtenção de uma função de afilamento para o fuste total é um desafio, especialmente porque a porção com galhos, particularmente na região da copa, pode não ser totalmente capturada ou representada de forma precisa pelos dados do TLS. Uma abordagem emergente consiste em utilizar os dados do TLS coletados na porção livre de galhos para ajustar uma equação específica para essa seção do fuste e, com base nesses dados, estimar também a parte remanescente do fuste.

Nesse sentido, a hipótese central deste capítulo sugere que os diâmetros e alturas medidos pelo TLS na porção do fuste livre de galhos podem ser empregados para estimar com exatidão os diâmetros do restante do fuste. Adicionalmente, assume-se que o volume de madeira obtido por meio do TLS terá concordância estatística com as medições realizadas pelo método tradicional de cubagem.

Portanto, o objetivo geral deste capítulo é investigar a exatidão do TLS na estimativa do volume por sortimentos de madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), assegurando concordância estatística entre o TLS e o método tradicional de cubagem.

Especificamente o capítulo visa: (a) desenvolver e validar métodos que empreguem os diâmetros coletados pelo TLS na porção livre de galhos, para estimar com exatidão os diâmetros do restante do fuste; (b) utilizar as cubagens pelo TLS para estimar o volume dos diferentes sortimentos de madeira; (c) avaliar o desempenho das estimativas produzidas com o a tecnologia TLS em comparação às técnicas de inventário florestal convencional.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Dados Experimentais e Processamento - Dados TLS

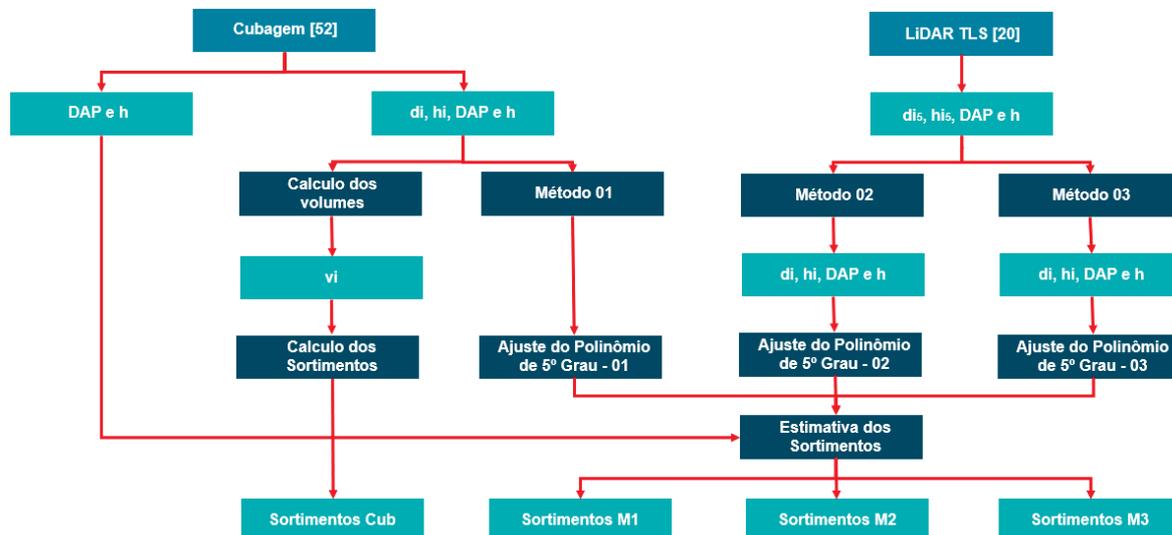
Os dados experimentais utilizados neste capítulo foram os mesmos abordados no Capítulo 3 e referem-se à Área de estudo (3.2.1.1), Cubagem (3.2.1.2), e TLS (3.2.1.4).

O processamento das nuvens TLS está descrito no Capítulo 3 e corresponde aos tópicos Registro e remoção de ruídos das nuvens 3D (3.2.3.1) e Extração de variáveis (3.2.3.2).

4.2.2 Sortimentos de Madeira

A sequência para a obtenção e avaliação dos sortimentos de madeira, seguiu algumas etapas, as quais estão detalhadas na Figura 31.

FIGURA 31. SEQUÊNCIA METODOLÓGICA PARA OBTENÇÃO DOS SORTIMENTOS DE MADEIRA DE EUCALIPTO COM A UTILIZAÇÃO DO TLS



4.2.2.1 Etapa 1. Métodos

Na primeira etapa, foram organizados os bancos de dados base para a estimativa dos sortimentos de madeira, seguindo três métodos. O primeiro método (Método 01), corresponde ao método tradicional de obtenção de dados, onde a relação de variáveis das árvores foi obtida da cubagem.

As árvores do estudo foram submetidas ao tratamento de desrama até a altura de cinco metros, por esse motivo, os diâmetros intermediários (d_i) das árvores até cinco metros de altura são obtidos com clareza pelo TLS, após essa altura os diâmetros apresentam valores não confiáveis devido ao problema de oclusão, causado pela presença de galhos.

Nesse contexto, são propostos dois métodos (Método 02 e Método 03) para obtenção dos diâmetros intermediários acima de cinco metros de altura e, conseqüentemente, a obtenção do volume de sortimentos de madeira.

Método 01. Tradicional. Dados oriundos da cubagem.

Nesse método, foram utilizados os diâmetros à altura do peito (DAP), altura total (h), diâmetros intermediários (d_i) e alturas intermediárias (h_i) obtidas na cubagem.

Método 02. TLS. Polinômios de 2º grau.

Nesse método, foram utilizados os DAP e h extraídos do TLS e os d_i e h_i obtidos por estimativas, utilizando dois polinômios de 2º grau, os passos para a obtenção dessas variáveis estão descritos a seguir.

Passo 1. Obtenção de Polinômios

A seguir estão elencados os passos para obtenção de dois polinômios de 2º grau, sendo o primeiro até cinco metros de altura e o segundo para o restante do fuste da árvore.

Passo 1.1. Ajuste de um polinômio de 2º grau até cinco metros de altura.

O polinômio de 2º grau foi ajustado com base nos d_i e h_i obtidos do TLS até a altura de cinco metros.

Passo 1.2. Estimar o diâmetro em quatro metros de altura.

Utilizando os coeficientes obtidos do polinômio de 2º grau, foi calculado o diâmetro para a altura de quatro metros (d_4).

Passo 1.3. Ajustar um polinômio de 2º grau para o restante do fuste da árvore.

O polinômio de 2º grau foi ajustado utilizando o d_4 como intercepto até a altura total.

Passo 2. Criar h_i em intervalos de um centímetro até a altura total de cada árvore obtida por TLS

Passo 3. Estimar o d_i para cada h_i de cada árvore.

Os d_i até cinco metros de altura foram estimados com base no primeiro polinômio e os demais d_i foram estimados com base no segundo polinômio.

Método 03. TLS. Ajuste e aplicação da curva de forma de Preußner.

Obtenção das variáveis h_i e d_i , com base nos dados TLS, por meio do ajuste e aplicação da curva de forma de Preußner. O fracionamento do fuste sugerido por Preußner foi modificado ligeiramente, ou seja, o primeiro segmento varia de 0% e 25% do fuste (47), o segundo segmento varia de 25% e 50% (48), o terceiro segmento de 50% e 75% (49) e o último entre 75% e 100% (50). Desse modo, foram ajustadas as seguintes funções, de modo a estabelecer uma curva contínua de forma, que une os sucessivos extremos dos quocientes, ou seja:

$$d_i = a_{11} \cdot DAP \frac{1}{\sqrt[1+b]{x}}, \text{ para } 0,0 < x \leq 0,25 \quad (47)$$

$$d_i = a_{21} \cdot DAP \sqrt[1+b]{1-x}, \text{ para } 0,25 < x \leq 0,50 \quad (48)$$

$$d_i = a_{31} \cdot DAP \sqrt[1+b]{1-x}, \text{ para } 0,50 < x \leq 0,75 \quad (49)$$

$$d_i = a_{41} \cdot DAP \sqrt[1+b]{1-x}, \text{ para } 0,75 < x \leq 1,0 \quad (50)$$

Em que: d_i é o diâmetro na posição x ; a_{11} a a_{41} são coeficiente; DAP é o diâmetro à altura do peito; x é o comprimento relativo do fuste, ou seja, $x = \frac{h_i}{h}$, dado que “ x ” tem existência no intervalo real entre 0,0 e 1,0, portanto, $\frac{0}{h} \leq x \leq \frac{h_i}{h}$; h é a altura total da árvore; w é a potência da expressão, sendo igual a um para a obtenção de uma reta e menor que um para obtenção de uma parábola clássica, ou seja, à medida que se se aproxima de zero tem-se uma curva forte e ao se aproximar de um tem-se uma curva fraca e b é o acelerador da parábola.

Dessa forma, os di de cada segmento foram estimados de acordo com as expressões abaixo apresentadas:

$$d_i = a_{11} DAP \frac{1}{(1+100x)^{0,100}} \quad \left\{ \begin{array}{l} 0,00 < x \leq 0,25 \\ 0,25 < x \leq 0,50 \\ 0,50 < x \leq 0,75 \\ 0,75 < x \leq 1,00 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (51) \\ (52) \\ (53) \\ (54) \end{array}$$

Foram estimados os di para 21 posições do fuste da árvore (x), sendo elas: 0, 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, ..., 1,00.

4.2.2.2 Etapa 2. Ajuste do Polinômio do 5º Grau (Schöpfer, 1966)

Tendo como base os hi e di das 52 árvores provenientes da cubagem (Método 1) e os hi e di provenientes dos Métodos 02 e 03, foi ajustado o modelo de afilamento (55), conhecido como Polinômio de 5º Grau de Schöpfer (1966). O processo de ajuste foi realizado no *software* R, utilizando o pacote "TimbeR".

$$\frac{d_i}{DAP} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{h_i}{h} + \beta_2 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + \beta_3 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^3 + \beta_4 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^4 + \beta_5 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^5 \quad (55)$$

Em que: d_i é o diâmetro na secção i do fuste (cm); DAP é o diâmetro à altura do peito (cm); $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ e β_5 são os coeficientes do modelo; h_i é altura na secção i do fuste (m); h é a altura total da árvore (m).

Para a obtenção dos diâmetros a diversas alturas ao longo do fuste, isola-se di, obtendo-se assim a função de afilamento (56):

$$d_i = DAP \left(B_0 + B_1 \left(\frac{h_i}{h}\right) + B_2 \left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + B_3 \left(\frac{h_i}{h}\right)^3 + B_4 \left(\frac{h_i}{h}\right)^4 + B_5 \left(\frac{h_i}{h}\right)^5 \right) \quad (56)$$

Para se obter o volume (V), é necessário integrar suas áreas seccionais entre o limite inferior (h_1) e superior (h_2) que se deseja. A representação da integral é dada em 57:

$$V = K \int_{h_1}^{h_2} d_i^2 \delta h \quad (57)$$

$$V = K \cdot DAP^2 [c_0^2 h_i + c_1 c_0 h_i^2 + \left(\frac{2}{3} c_2 c_0 + \frac{1}{3} c_1^2\right) h_i^3 + \left(\frac{1}{2} c_3 c_0 + \frac{1}{2} c_2 c_1\right) h_i^4 + \left(\frac{2}{5} c_4 c_0 + \frac{2}{5} c_3 c_1 + \frac{1}{5} c_2^2\right) h_i^5 + \left(\frac{1}{3} c_4 c_1 + \frac{1}{3} c_5 c_0 + \frac{1}{3} c_3 c_2\right) h_i^6 + \left(\frac{2}{7} c_5 c_1 + \frac{2}{7} c_4 c_2 + \frac{1}{7} c_3^2\right) h_i^7 + \left(\frac{1}{4} c_5 c_2 + \frac{2}{7} c_4 c_3\right) h_i^8 + \left(\frac{2}{9} c_5 c_3 + \frac{1}{9} c_4^2\right) h_i^9 + \frac{1}{5} c_5 c_4 h_i^{10} + \frac{1}{11} c_5^2 h_i^{11}]_{h_1}^{h_2}$$

Em que: $K = \frac{\pi}{40000}$; d_i é o diâmetro correspondente a qualquer altura h_i ao longo do fuste; $c_0 = \beta_0$; $c_1 = \frac{\beta_1}{h}$; $c_2 = \frac{\beta_2}{h^2}$; $c_3 = \frac{\beta_3}{h^3}$; $c_4 = \frac{\beta_4}{h^4}$; $c_5 = \frac{\beta_5}{h^5}$

A equação ajustada foi avaliada por meio do Coeficiente de Determinação Ajustado (R_{aj}^2), Erro Padrão da Estimativa Absoluto (S_{yx}) e Erro Padrão da Estimativa Relativo ($S_{yx\%}$). Neste trabalho, o objetivo foi avaliar a estimativa média obtida pela regressão. Portanto, as condicionantes de homogeneidade, normalidade e autocorrelação dos resíduos não foram avaliadas.

4.2.2.3 Etapa 3. Obtenção dos Sortimentos de Madeira

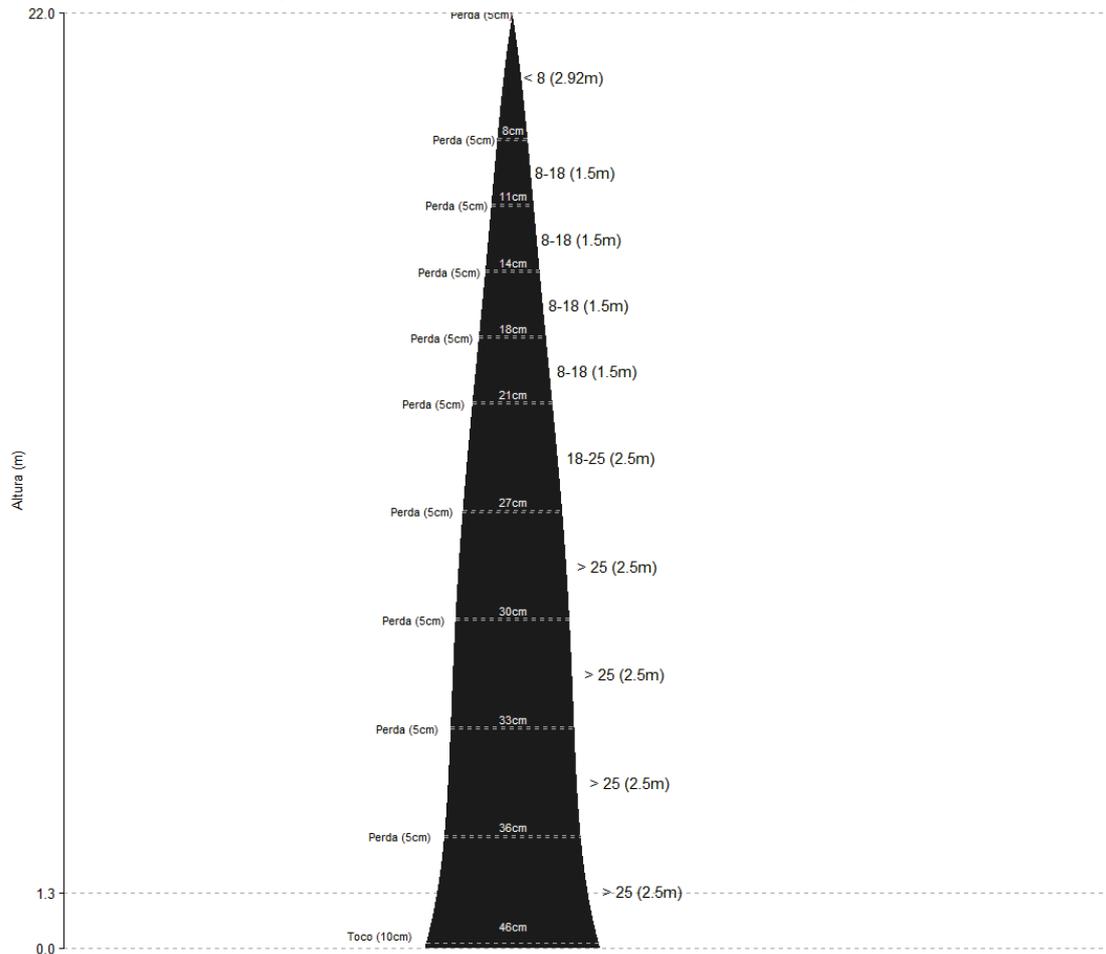
Os sortimentos foram calculados no *software* R, utilizando o pacote “Timber”. Os coeficientes obtidos do Polinômio de 5º Grau, os DAP e h obtidos da Cubagem (Método 01) e os DAP e h obtidos do TLS (Método 02 e 03) foram utilizados. Quatro sortimentos (Tabela 15) foram calculados, assim como apresentados na Figura 32.

TABELA 15. RELAÇÃO DE SORTIMENTOS UTILIZADOS

Sortimento	Intervalo (cm)	DPF (cm)	Perda (cm)	Comprimento Mínimo (m)	Comprimento Máximo (m)
S1	> 25	25	0,01	2,5	2,5
S2	18 a 25	18	0,01	2,5	2,5
S3	08 a 18	08	0,01	1,5	1,5
S4	< 08	00	0,01	0,1	15

Em que: S1 é Sortimento 01; S2 é Sortimento 02; S3 é Sortimento 03; S4 é Sortimento 04; e DPF é o diâmetro na ponta fina.

FIGURA 32. PROCESSAMENTOS DE MULTIPLOS PRODUTOS DA MADEIRA TENDO COMO BASE UMA ÁRVORE COM DAP DE 40 CENTÍMETROS, ALTURA TOTAL DE 22 METROS E PERDA PELA SERRA DE 5 CENTÍMETROS



4.2.2.4 Etapa 4. Avaliação dos Sortimentos de Madeira

A avaliação dos sortimentos calculados pelos Métodos 01, 02 e 03, quando em comparação com os sortimentos obtidos da Cubagem, foi realizada por meio da correlação de Pearson (r); das medidas de concordância: Coeficiente de Concordância (A); Medida de Concordância (ρ), Coeficiente de Correlação de Concordância ($CC1$), Coeficiente de Correlação de Concordância Melhorado ($CC2$), e Parâmetro de Concordância (λ); e do Gráfico de Concordância de Bland-Altman.

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Estatísticas Descritivas

As estatísticas descritivas referente aos dados de cubagem das 52 árvores e dados das 20 árvores alvo das varreduras do TLS encontram-se no Capítulo 3, item 3.3.1 e item 3.3.2, respectivamente.

4.3.2 Sortimentos de Madeira

4.3.2.1 Métodos

Método 2. TLS. Polinômios de 2º grau.

Os polinômios de 2º grau obtidos com os dados TLS estão apresentados na Tabela 16.

TABELA 16. POLINÔMIOS DE SEGUNDO GRAU OBTIDOS COM OS DADOS LIDAR TLS

Árvore	Polinomial 1	Polinomial 2
1	$y = 0,911x^2 - 1,9866x + 43,104$	$y = -0,1091x^2 + 0,4862x + 35,72$
2	$y = 0,2379x^2 - 3,0429x + 44,297$	$y = -0,0715x^2 + 0,3081x + 35,21$
3	$y = 0,1731x^2 - 2,492x + 44,75$	$y = -0,0672x^2 + 0,3103x + 36,82$
4	$y = 0,4x^2 - 4,4057x + 44,604$	$y = -0,0922x^2 + 0,4194x + 32,70$
5	$y = 0,5685x^2 - 4,6844x + 36,682$	$y = -0,0775x^2 + 0,3199x + 27,26$
6	$y = 0,3458x^2 - 3,3732x + 46,634$	$y = -0,0657x^2 + 0,1116x + 38,41$
7	$y = 0,2552x^2 - 3,6159x + 45,228$	$y = -0,0868x^2 + 0,3669x + 33,81$
8	$y = 0,5704x^2 - 5,3801x + 40,861$	$y = -0,0751x^2 + 0,2896x + 28,17$
9	$y = 0,2821x^2 - 3,0242x + 49,002$	$y = -0,0719x^2 + 0,2747x + 41,00$
10	$y = 0,3036x^2 - 2,93x + 42,13$	$y = -0,0877x^2 + 0,3855x + 35,06$
11	$y = -0,0237x^2 - 1,4476x + 38,632$	$y = -0,1016x^2 + 0,3844x + 31,24$
12	$y = 0,5524x^2 - 5,7685x + 49,407$	$y = -0,066x^2 + 0,3319x + 34,47$
13	$y = 0,5383x^2 - 5,443x + 42,805$	$y = -0,0684x^2 + 0,2615x + 29,10$
14	$y = 0,3281x^2 - 5,4493x + 52,937$	$y = -0,0662x^2 + 0,2732x + 34,46$
15	$y = 0,58x^2 - 6,2939x + 52,065$	$y = -0,1004x^2 + 0,395x + 35,32$
16	$y = 0,3164x^2 - 3,4989x + 44,255$	$y = -0,1033x^2 + 0,4607x + 34,77$
17	$y = 0,2194x^2 - 2,8228x + 44,258$	$y = -0,0766x^2 + 0,4137x + 35,80$
18	$y = 0,7748x^2 - 6,0668x + 46,875$	$y = -0,0676x^2 + 0,3192x + 35,54$
19	$y = 0,1181x^2 - 4,0439x + 49,546$	$y = -0,1729x^2 + 0,7229x + 33,00$
20	$y = 0,1344x^2 - 2,5156x + 34,948$	$y = -0,1077 + 0,3944x + 26,05$

Método 03. TLS. Ajuste e Aplicação da Curva de Forma de Preußner.

Os coeficientes obtidos para cada segmento do fuste com os dados TLS estão apresentados na Tabela 17.

TABELA 17. COEFICIENTES OBTIDOS PARA CADA SEGMENTO DO FUSTE UTILIZANDO OS DADOS TLS

Árvore	Segmento 1	Segmento 2	Segmento 3	Segmento 4
	$0,0 < \frac{h_i}{h} \leq 0,25$	$0,25 < \frac{h_i}{h} \leq 0,50$	$0,50 < \frac{h_i}{h} \leq 0,75$	$0,75 < \frac{h_i}{h} \leq 1,00$
	a_{11}	a_{21}	a_{31}	a_{41}
1	1,1800	1,1800	1,1500	1,1200
2	1,1800	1,1800	1,1500	1,1200
3	1,1800	1,1800	1,1500	1,1200
4	1,1800	1,1800	1,1500	1,1200
5	1,1600	1,1600	1,1200	1,1000
6	1,1800	1,1800	1,1500	1,1200
7	1,1800	1,1800	1,1500	1,1200
8	1,1800	1,1800	1,1500	1,1200
9	1,1800	1,1800	1,1500	1,1200
10	1,1800	1,1800	1,1500	1,1200
11	1,1800	1,1800	1,1500	1,1200
12	1,1400	1,1400	1,1200	1,1200
13	1,1500	1,1500	1,1400	1,1200
14	1,1100	1,1400	1,1500	1,1000
15	1,0700	1,0500	1,0100	1,0000
16	1,1400	1,1500	1,1100	1,1000
17	1,1700	1,1600	1,1100	1,0900
18	1,2100	1,2000	1,1700	1,1400
19	1,2200	1,2000	1,1700	1,1400
20	1,2200	1,2000	1,1700	1,1400

4.3.2.2 Ajuste do Polinômio do 5º Grau (Schöpfer, 1966)

Os coeficientes obtidos do ajuste do Polinômio de 5º Grau estão apresentados na Tabela 18 e as estatísticas de avaliação dos ajustes se encontram na Tabela 19.

TABELA 18. COEFICIENTES OBTIDOS APÓS O AJUSTE DO POLINÔMIO DE 5º GRAU COM DADOS OBTIDOS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR

Polinômio do 5º Grau	Coeficientes					
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
Método 01 - Cubagem	1,1718	-3,5768	15,4249	-34,7262	33,7163	-12,0131
Método 02 - TLS	1,1186	-2,6129	9,6367	-19,0950	16,1980	-5,2503
Método 03 - TLS	1,1452	-3,3263	15,3292	-37,2030	38,3869	-14,3431

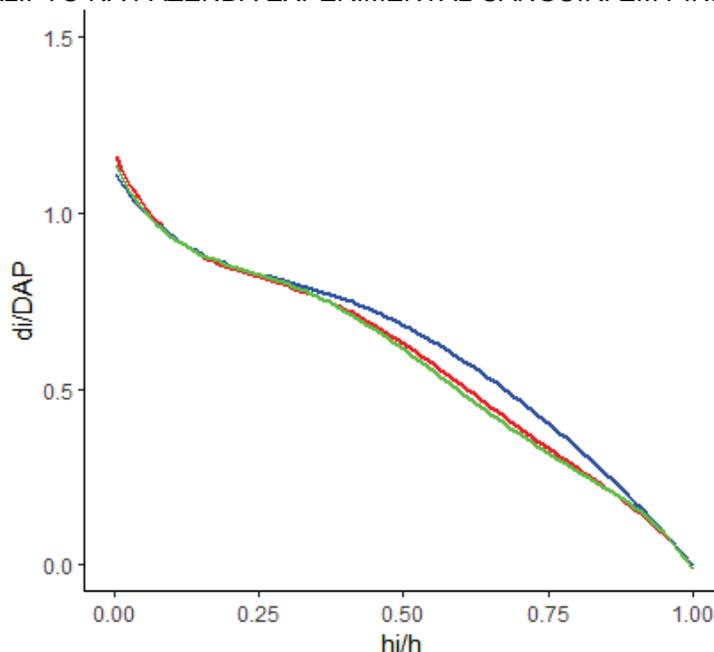
$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ e β_5 são os coeficientes do Polinômio de 5º Grau.

TABELA 19. ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DOS AJUSTES DO POLINÔMIO DE 5º GRAU

Polinômio do 5º Grau	Estatísticas		
	S_{yx}	$S_{yx\%}$	$R^2_{aj.}$
Método 01 - Cubagem	1,8286	7,40	0,98
Método 02 - TLS	1,3210	5,33	0,98
Método 03 - TLS	1,0598	5,72	0,99

O Gráfico com o Perfil do Fuste é apresentado na Figura 33, onde a linha vermelha refere-se ao Método 01, a linha azul refere-se ao Método 02 e a linha verde, ao Método 03.

FIGURA 33. GRÁFICO COM O PERFIL DO FUSTE OBTIDO DO AJUSTE DO POLINÔMIO DE 5º GRAU COM DADOS ORIUNDOS DO TLS E DA CUBAGEM DE ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI EM PINHAIS, PR



Em que: linha vermelha corresponde ao Método 01; linha azul corresponde ao Método 02 e linha verde corresponde ao Método 03.

4.3.2.3 Obtenção de Sortimentos de Madeira

As estatísticas descritivas dos sortimentos de madeira obtidos com base na Cubagem e Método 01 estão apresentadas na Tabela 20. Já as estatísticas descritivas dos sortimentos obtidos com base nos Métodos 02 e 03 se encontram na Tabela 21.

TABELA 20. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS SORTIMENTOS OBTIDOS DA CUBAGEM E ESTIMADOS COM BASE NO MÉTODO 01 PARA ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR

Est.	Cubagem (m³)					Método 01 (m³)				
	S1	S2	S3	S4	ST	S1	S2	S3	S4	ST
\bar{y}	0,7976	0,2046	0,1139	0,0123	1,1284	0,7851	0,1920	0,1195	0,0119	1,1228
Máx.	2,1506	0,4468	0,2247	0,0194	2,3189	1,9740	0,4172	0,2100	0,0180	2,2848
Mín.	0,0000	0,0000	0,0555	0,0039	0,0822	0,0000	0,0000	0,0529	0,0049	0,0791
Amp.	2,1506	0,4468	0,1692	0,0155	2,2367	1,9740	0,4172	0,1571	0,0131	2,2057
s	0,6373	0,1010	0,0391	0,0043	0,6018	0,6260	0,1018	0,0340	0,0033	0,6009
CV%	79,90	49,35	34,32	34,71	53,33	79,74	53,00	28,48	27,40	53,52
n	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52

Em que: S1 é Sortimento 01; S2 é Sortimento 02; S3 é Sortimento 03; S4 é Sortimento 04; e ST é o volume total dos sortimentos.

TABELA 21. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS SORTIMENTOS ESTIMADOS COM BASE NOS MÉTODOS 02 E 03 PARA ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, EM PINHAIS, PR

Est	Método 02 (m ³)					Método 03 (m ³)				
	S1	S2	S3	S4	ST	S1	S2	S3	S4	ST
\bar{y}	0,8586	0,2011	0,1156	0,0099	1,1982	0,7708	0,1837	0,1228	0,0119	1,1027
Máx.	2,1988	0,4267	0,2449	0,0176	2,4382	1,9546	0,4154	0,2058	0,0180	2,2440
Mín.	0,0000	0,0000	0,0533	0,0041	0,0844	0,0000	0,0000	0,0633	0,0051	0,0777
Amp.	2,1988	0,4267	0,1917	0,0135	2,3538	1,9546	0,4154	0,1426	0,0129	2,1663
s	0,6877	0,1130	0,0409	0,0035	0,6413	0,6154	0,1020	0,0302	0,0030	0,5902
CV%	80,10	56,18	35,43	34,98	53,52	79,84	55,55	24,56	25,18	53,52
n	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52

Em que: S1 é Sortimento 01; S2 é Sortimento 02; S3 é Sortimento 03; S4 é Sortimento 04; e ST é o volume total dos sortimentos.

4.3.2.4 Avaliação dos Sortimentos de Madeira

As correlações entre os sortimentos de madeira obtidos da Cubagem e os sortimentos obtidos pelos Métodos 01, 02 e 03, encontram-se na Tabela 22.

TABELA 22. CORRELAÇÃO ENTRE OS SORTIMENTOS DE MADEIRA ESTIMADOS PELOS MÉTODOS 01, 02 E 03 E OS SORTIMENTOS OBTIDOS DA CUBAGEM

Sortimentos	Método 01 x Cubagem	Método 02 x Cubagem	Método 03 x Cubagem
S1 x S1	0,9724	0,9706	0,9740
S2 x S2	0,7719	0,9706	0,7620
S3 x S3	0,6548	0,6471	0,5137
S4 x S4	0,4644	0,1425	0,3196
ST x ST	0,9801	0,9801	0,9801

Em que: S1 é Sortimento 01; S2 é Sortimento 02; S3 é Sortimento 03; S4 é Sortimento 04; e ST é o volume total dos sortimentos.

As medidas de concordância comparando os sortimentos de madeira obtidos da Cubagem com os sortimentos obtidos pelos Métodos 01, 02 e 03 se encontram nas Tabelas 23, 24 e 25, respectivamente.

TABELA 23. MEDIDAS DE CONCORDÂNCIA CALCULADAS COM BASE NOS SORTIMENTOS OBTIDOS DA CUBAGEM E SORTIMENTOS ESTIMADOS PELO MÉTODO 01 PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR

Medidas	Cubagem x Método 01				
	S1	S2	S3	S4	ST
A	0,9860	0,8825	0,8193	0,7226	0,9900
ρ	0,9720	0,7659	0,6408	0,4465	0,9801
CC1	0,9720	0,7659	0,6408	0,4465	0,9801
CC2	0,9720	0,7670	0,6398	0,4424	0,9801
λ	0,9858	0,8674	0,7811	0,6174	0,9899

Em que: A é o Coeficiente de Concordância (0 a 1); ρ é a Medida de Concordância (-1 a 1); CC1 é o Coeficiente de Correlação de Concordância (-1 a 1); CC2 é a Correlação de Concordância Modificado (-1 a 1); λ é o Parâmetro de Concordância (0 a 1); S1 é Sortimento 01; S2 é Sortimento 02; S3 é Sortimento 03; S4 é Sortimento 04; e ST é o volume total dos sortimentos.

TABELA 24. MEDIDAS DE CONCORDÂNCIA CALCULADAS COM BASE NOS SORTIMENTOS OBTIDOS DA CUBAGEM E SORTIMENTOS ESTIMADOS PELOS DADOS TLS, MÉTODO 02, PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR

Medidas	Cubagem x Método 02				
	S1	S2	S3	S4	ST
A	0,9818	0,8434	0,8228	0,5197	0,9859
ρ	0,9637	0,6870	0,6458	0,1169	0,9719
CC1	0,9637	0,6870	0,6458	0,1169	0,9719
CC2	0,9612	0,6848	0,6456	0,1261	0,9701
λ	0,9815	0,8145	0,7848	0,2116	0,9857

Em que: A é o Coeficiente de Concordância (0 a 1); ρ é a Medida de Concordância (-1 a 1); CC1 é o Coeficiente de Correlação de Concordância (-1 a 1); CC2 é a Correlação de Concordância Modificado (-1 a 1); λ é o Parâmetro de Concordância (0 a 1); S1 é Sortimento 01; S2 é Sortimento 02; S3 é Sortimento 03; S4 é Sortimento 04; e ST é o volume total dos sortimentos.

TABELA 25. MEDIDAS DE CONCORDÂNCIA CALCULADAS COM BASE NOS SORTIMENTOS OBTIDOS DA CUBAGEM E SORTIMENTOS ESTIMADOS PELOS DADOS TLS, MÉTODO 03, PARA AS ÁRVORES DE EUCALIPTO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI, PINHAIS, PR

Medidas	Cubagem x Método 03				
	S1	S2	S3	S4	ST
A	0,9862	0,8715	0,7362	0,6483	0,9895
ρ	0,9725	0,7458	0,4810	0,2987	0,9790
CC1	0,9725	0,7458	0,4810	0,2987	0,9790
CC2	0,9720	0,7488	0,4804	0,2958	0,9788
λ	0,9861	0,8544	0,6497	0,4600	0,9894

Em que: A é o Coeficiente de Concordância (0 a 1); ρ é a Medida de Concordância (-1 a 1); CC1 é o Coeficiente de Correlação de Concordância (-1 a 1); CC2 é a Correlação de Concordância Modificado (-1 a 1); λ é o Parâmetro de Concordância (0 a 1); S1 é Sortimento 01; S2 é Sortimento 02; S3 é Sortimento 03; S4 é Sortimento 04; e ST é o volume total dos sortimentos.

Os gráficos de Concordância de Bland-Altman, comparando os sortimentos de madeira obtidos da Cubagem com os sortimentos estimados pelos Métodos 01, 02 e 03 se encontram nas Figuras 34, 35 e 36, respectivamente.

FIGURA 34. GRÁFICOS DE CONCORDÂNCIA DE BLAND-ALTMAN COM AS DIFERENÇAS MÉDIAS DE VOLUME POR SORTIMENTO DE MADEIRA OBTIDOS PELOS MÉTODOS CUBAGEM E MÉTODO 01.

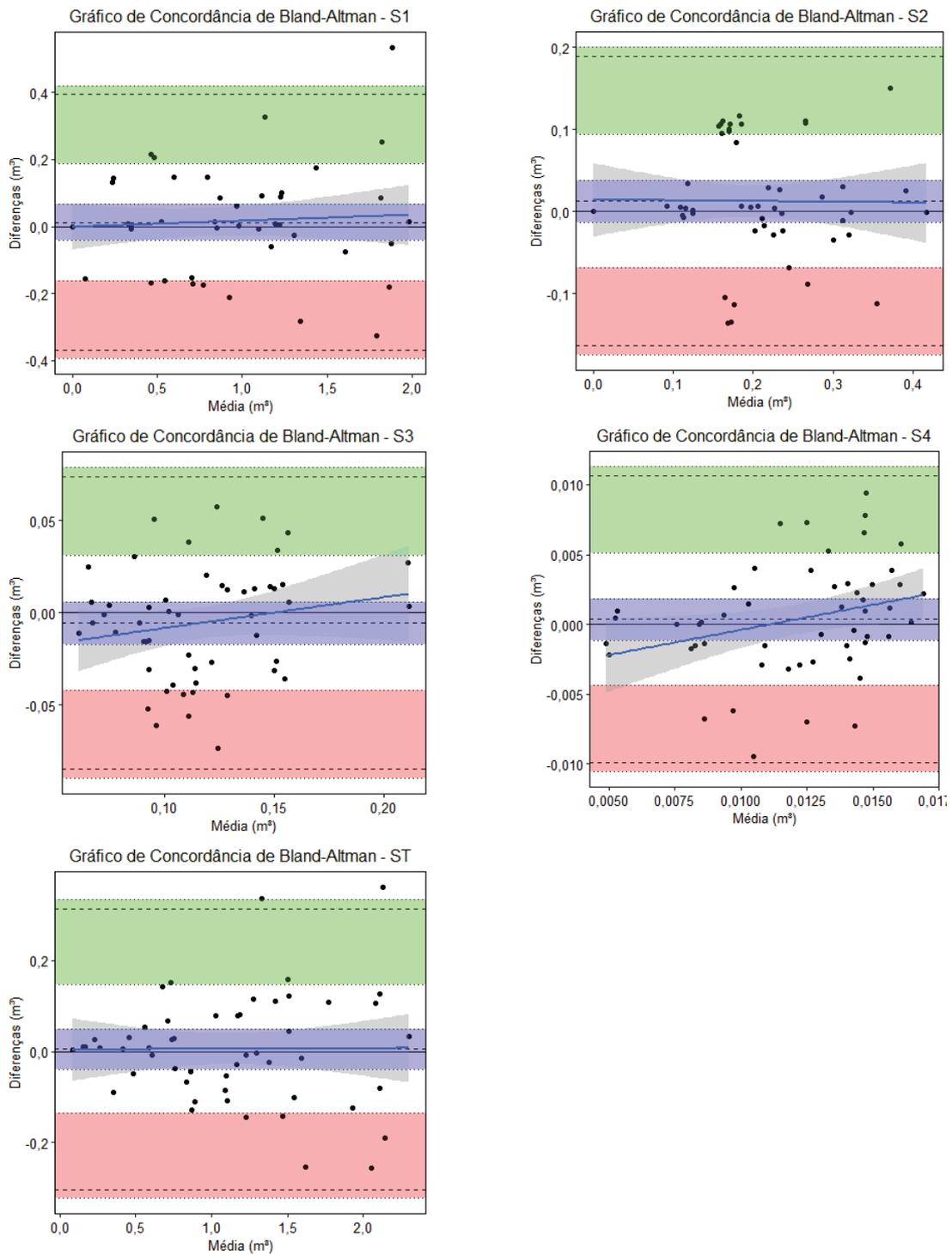


FIGURA 35. GRÁFICOS DE CONCORDÂNCIA DE BLAND-ALTMAN COM AS DIFERENÇAS MÉDIAS DE VOLUME POR SORTIMENTO DE MADEIRA OBTIDOS PELOS MÉTODOS CUBAGEM E TLS, MÉTODO 02.

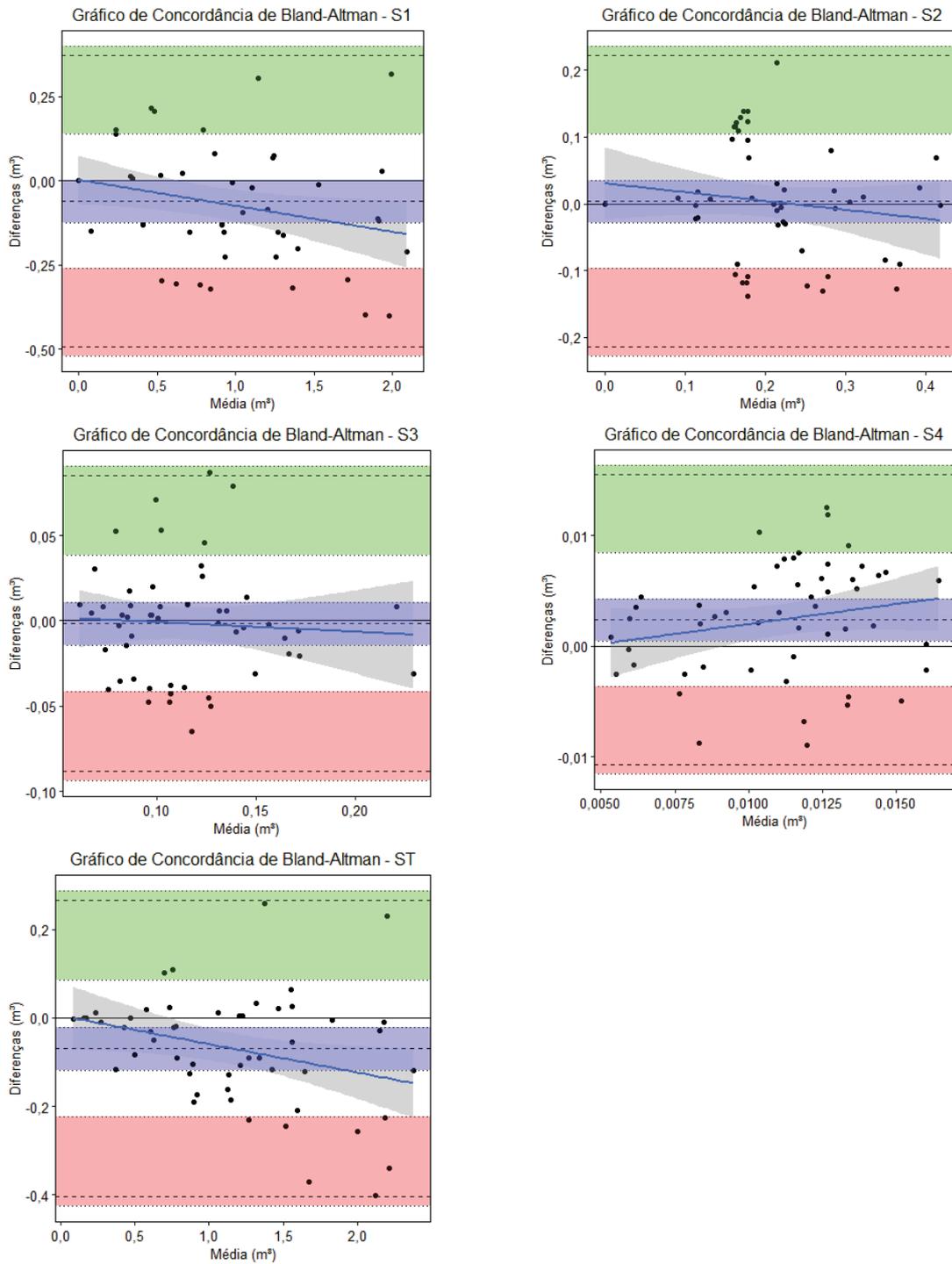
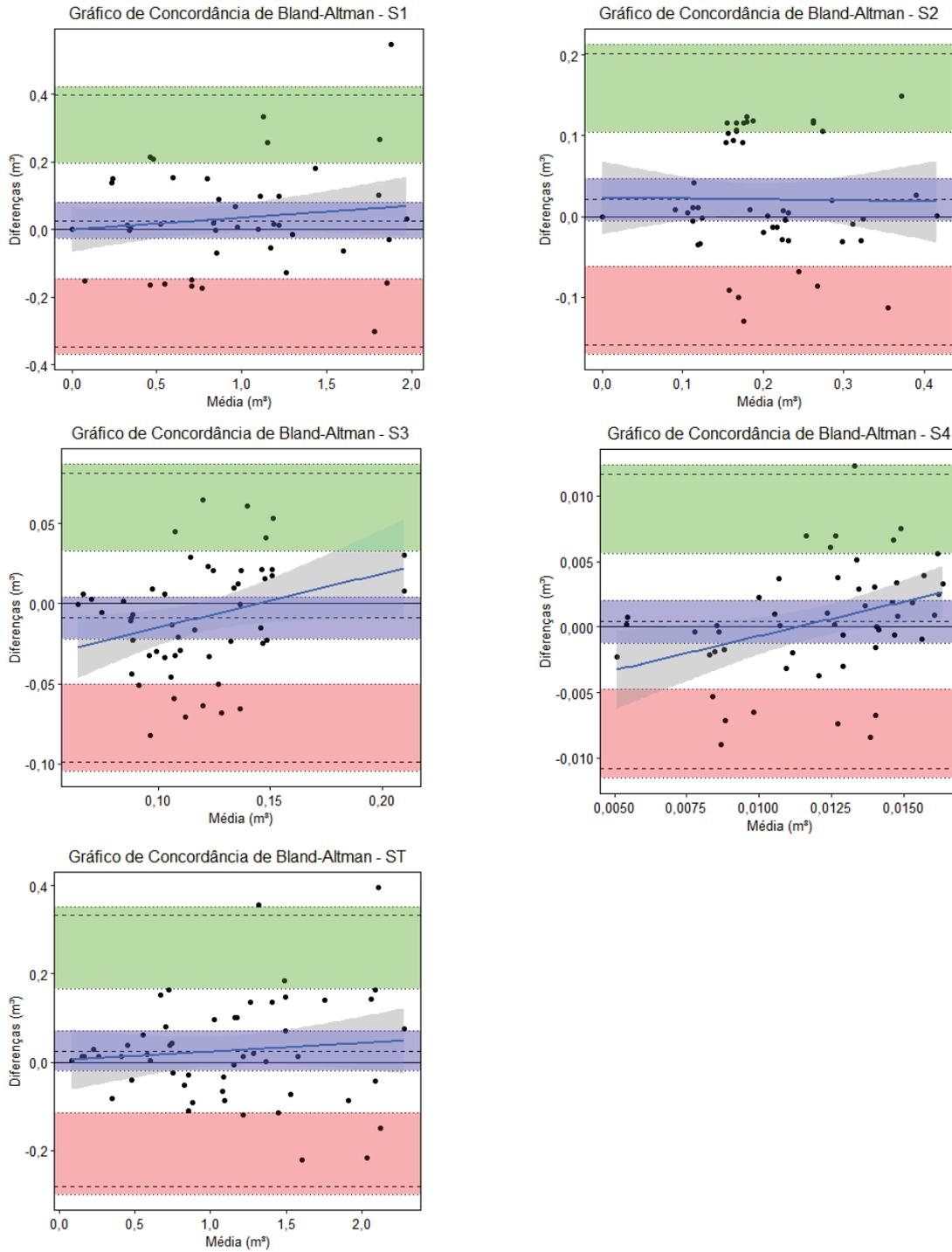


FIGURA 36. GRÁFICOS DE CONCORDÂNCIA DE BLAND-ALTMAN COM AS DIFERENÇAS MÉDIAS DE VOLUME POR SORTIMENTO DE MADEIRA OBTIDOS PELOS MÉTODOS CUBAGEM E TLS, MÉTODO 03.



4.4 DISCUSSÕES

Em sistemas agroflorestais ou sistemas de integração Lavoura-Pecuária Floresta (iLPF), a manutenção da cobertura arbórea é crucial, pois as árvores desempenham diversos papéis essenciais, tais como: (i) fixação de carbono da atmosfera durante o processo de fotossíntese, importante para a mitigação das mudanças climáticas; (ii) as árvores fornecem sombreamento, criando microclimas mais amenos, o que é benéfico para o bem-estar animal e das espécies presentes no sistema; (iii) proteção do solo: as raízes das árvores ajudam a prevenir a erosão, mantendo o solo estável e protegido contra chuvas intensas, por exemplo; e (iv) produção de madeira de alto valor agregado.

Além disso, nesses sistemas, os espaçamentos entre árvores costumam ser amplos e é comum que as árvores sejam submetidas a tratamentos silviculturais de desrama, que envolve a remoção dos galhos inferiores das árvores para melhorar a qualidade da madeira, facilitar o manejo e evitar sua competição com as culturas agrícolas implantadas. Nesses locais, onde a manutenção da cobertura arbórea é crucial, o uso de varreduras do TLS é especialmente vantajoso. O fato de ser uma técnica não destrutiva, a torna ideal para avaliar árvores de grande porte e alto valor econômico.

Assim como relatado na literatura, o TLS é amplamente utilizado em inventários florestais para a estimativa do volume de madeira (ASTRUP *et al.*, 2014; HACKENBERG *et al.*, 2015; VIANA *et al.*, 2022; SHIMIZU *et al.*, 2022), sendo que essa tecnologia permite a obtenção de dados tridimensionais detalhadas dos fustes das árvores, viabilizando estimativas precisas. No entanto, é importante considerar que as estimativas dos diâmetros intermediários (d_i), que se encontram especialmente na porção da copa da árvore, podem sofrer distorções devido à oclusão (YRTTIMAA *et al.*, 2020; KO *et al.*, 2022, TIENAHO *et al.*, 2022), o que, por sua vez, pode comprometer as estimativas do volume das árvores (HACKENBERG *et al.*, 2015).

Este capítulo ressalta a importância de avanços na tecnologia TLS e no desenvolvimento de abordagens complementares para superar as limitações decorrentes da oclusão. Com essa finalidade, foi proposta a utilização dos diâmetros medidos até cinco metros de altura, obtidos das nuvens de pontos do TLS, como base para estimar os diâmetros superiores, na porção da copa, alcançando a altura total das árvores. Sendo assim, além de analisar os métodos convencionais de medição

florestal Cubagem e Método 01, este estudo introduziu dois novos métodos (Método 02 e Método 03) para a estimativa dos diâmetros. Para melhorar a compreensão das discussões, a seguir estão resumidas as metodologias empregadas.

Na Cubagem utilizou-se as variáveis h_i e d_i , que foram medidas diretamente no campo após a derrubada das árvores para calcular o volume das diversas seções transversais do fuste e, conseqüentemente, para determinar os sortimentos de madeira. No Método 01, que é o procedimento padrão para a estimativa de sortimentos de madeira, foram utilizadas as variáveis h_i , d_i , DAP e h , obtidas no processo de cubagem, para o ajuste uma função de afilamento (Polinômio de 5º Grau) as quais possibilitaram a estimativa do volume dos sortimentos.

No Método 02 foi estimada a variável d_i para cada h_i utilizando dois polinômios de segundo grau. Para cada uma das 20 árvores selecionadas para as varreduras do TLS, foram desenvolvidos dois polinômios de segundo grau (Tabela 16). Na sequência, com base nos dados de cubagem obtidos pelo TLS, foi ajustada a função de afilamento (Polinômio de 5º Grau), que permitiu a estimativa dos sortimentos de madeira.

Já no Método 03, aplicado às 20 árvores submetidas às varreduras do TLS, os diâmetros (d_i) ao longo do fuste foram estimados utilizando a curva de forma de *Preußner*. Esta curva foi calibrada com base nos dados de diâmetro (d_i) e altura (h_i) até cinco metros, coletados das varreduras TLS. O método envolveu o ajuste de quatro segmentos distintos do fuste, para os quais foram determinados coeficientes (Tabela 17). Informações adicionais sobre o comportamento dos coeficientes no ajuste dos segmentos podem ser consultadas no trabalho de Stefanello *et al.* (2021).

Em termos de praticidade, ambos os métodos propostos, Método 02 e 03, se destacam por sua aplicabilidade simplificada na obtenção de variáveis de interesse (d_i e h_i), em contraste com os métodos convencionais, Cubagem e Método 1. Enquanto os métodos tradicionais exigem a derrubada das árvores, o que se torna um processo oneroso, principalmente para árvores de grande porte (HU *et al.*, 2021), os Métodos 02 e 03 oferecem uma alternativa não destrutiva e econômica. Além disso, entre os dois métodos, Método 02 e 03, o Método 03 sobressai em termos de rapidez e facilidade de implementação.

Concernente ao ajuste do Polinômio de 5º grau, tendo como base os bancos de dados oriundos dos Métodos 01, 02 e 03, constatou-se que todos apresentaram um erro padrão da estimativa em percentagem ($S_{yx\%}$) inferior a 10% e um coeficiente

de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) superior a 0,98 (Tabela 19). Essas estatísticas de avaliação estão alinhadas com os resultados de pesquisas anteriores envolvendo o gênero *Eucalyptus* sp. (CERQUEIRA *et al.*, 2017; MARANGON *et al.*, 2017; FARIAS *et al.*, 2019).

A análise do Gráfico do Perfil do Fuste (Figura 33), que compara os resultados dos três métodos, revela diferenças notáveis na estimativa dos diâmetros. O Método 01 (tradicional), representado pela linha vermelha, serve como referência para a comparação. O Método 02, simbolizado pela linha azul, tende a superestimar os diâmetros acima da proporção de $\frac{h_i}{h} = 0,25$, que é o ponto de ajuste para o segundo polinômio de segundo grau.

Por outro lado, o Método 03, indicado pela linha verde, mostra uma concordância significativa com o Método 01, especialmente nos segmentos de $\frac{h_i}{h} = 0$ a 0,25 e $\frac{h_i}{h} = 0,75$ a 1,00. A proximidade entre as linhas nesses segmentos sugere que o Método 03 propicia estimativas de “di” muito similares às do Método 01, indicando uma exatidão potencialmente maior e uma metodologia robusta para a estimativa dos diâmetros ao longo do fuste.

A variação nos volumes de madeira calculados para os sortimentos é um reflexo direto da diversidade de tamanhos das árvores no estudo. O conjunto de dados inclui árvores de porte pequeno a grande, resultando em amplitude de volumes. Essa variação é destacada por um Coeficiente de Variação (CV%) elevado, demonstrando a heterogeneidade dos dados e é explicado pela relação direta entre o volume da árvore e suas dimensões fundamentais: o Diâmetro à Altura do Peito (DAP) e a altura total, conforme descrito por Péllico Netto e Behling (2018). Os três métodos de estimativa empregados conseguiram captar eficientemente essa variabilidade (Tabela 20 e 21).

Ao analisar os valores médios dos sortimentos de madeira (Tabelas 20 e 21), nota-se que o Método 02 tendeu a superestimar ligeiramente o volume do Sortimento 1 (S1), que apresenta maior valor agregado, influenciando, assim, o volume total dos sortimentos (ST). Essa superestimação, embora leve, pode ter implicações significativas em contextos comerciais onde o valor agregado é um fator crítico. Contudo, é importante destacar que, em termos gerais, os três métodos apresentaram estatísticas, incluindo a média, o mínimo e o máximo, que se assemelham às obtidas

pelo processo de Cubagem. Isso sugere que, apesar das variações pontuais, os Métodos 02 e 03 são comparativamente confiáveis e podem ser considerados métodos alternativos viáveis para a estimativa de volumes de madeira.

Ao examinar as correlações entre os volumes dos sortimentos estimados pelos três métodos e os obtidos pela Cubagem (Tabela 22), identifica-se uma correlação extremamente forte ($r > 0,98$) para o Sortimento 01 (S1) e para o volume total dos sortimentos (ST) em todos os métodos. Essa alta correlação reforça a precisão dos métodos em estimar volumes de madeira de alto valor agregado. Para o Sortimento 02 (S2), a correlação permanece forte ($r > 0,75$) ao se aplicar o Método 01 e 03, indicando uma consistência razoável na estimativa desses volumes intermediários. No entanto, a correlação enfraquece progressivamente para o Sortimento 03 (S3) e diminui ainda mais para o Sortimento 04 (S4), que constitui a parte terminal do fuste. Isso sugere que os Métodos 01, 02 e 03 podem enfrentar desafios ao estimar volumes para as seções mais altas da árvore, onde a exatidão das medições é crítica.

Essa tendência é corroborada pelas Medidas de Concordância (Tabelas 23, 24 e 25), nas quais se verifica uma alta concordância dos métodos com a Cubagem (valores $> 0,97$) para o Sortimento 1 (S1) e o sortimento total (ST). O S1, sendo o sortimento de maior valor agregado, apresentou estimativas estatisticamente alinhadas com a Cubagem em todos os três métodos. No entanto, observa-se uma redução progressiva na concordância para os sortimentos subsequentes, do S2 ao S4, em todos os métodos. Essa diminuição na concordância pode refletir desafios na captura de dados precisos para as seções superiores do fuste. A consistência entre as estimativas dos sortimentos pelos métodos e a Cubagem é também evidenciada nos Gráficos de Concordância de Bland-Altman (Figuras 34, 35 e 36), reforçando a robustez dos métodos propostos, apesar das variações observadas nos sortimentos superiores.

Portanto, neste capítulo, são introduzidas duas metodologias, Método 02 e Método 03, destinadas a estimar os diâmetros acima de cinco metros, correspondentes à porção da copa das árvores, utilizando como base dados oriundos de varreduras TLS. Essas técnicas inovadoras visam não apenas a medição precisa dos diâmetros, mas também a subsequente estimativa do volume dos sortimentos de madeira. As metodologias foram testadas em plantios de *Eucalyptus benthamii* em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), caracterizados por

espaçamentos amplos entre as árvores e pela prática de desrama, possibilitando assim, a produção de madeira de qualidade.

Em uma análise comparativa, o Método 03 se sobressaiu em relação ao Método 02, demonstrando um desempenho levemente superior. Do ponto de vista estatístico, as estimativas geradas pelo Método 03 mostraram-se consistentes com aquelas produzidas pelo Método 01, que é o padrão nos inventários florestais. Isso indica que o Método 03 é eficaz na geração de dados para o ajuste subsequente do Polinômio de 5º Grau e para a estimativa dos sortimentos de madeira, equiparando-se ao método tradicional que requer a derrubada e a cubagem das árvores. Portanto, o Método 03 emerge como uma alternativa viável e não destrutiva para obtenção de dados das árvores.

Os resultados deste capítulo demonstram que a utilização do TLS para a cubagem representa um significativo progresso científico. A adoção dessa tecnologia permitiu superar os desafios associados à oclusão, documentado na literatura (PULETTI *et al.*, 2019; KO *et al.*, 2022; SHIMIZU *et al.*, 2022), que compromete a exatidão na medição dos diâmetros ao longo do fuste. Com o Método 03, foi possível alcançar estimativas estatisticamente confiáveis do volume dos sortimentos de madeira, eliminando a necessidade de métodos destrutivos tradicionais. Este avanço não só otimiza o processo de cubagem, mas também contribui para a sustentabilidade das práticas florestais, preservando a integridade física das árvores.

A adoção de novas tecnologias no setor florestal, como o TLS, tornou-se uma tendência nos inventários florestais, conforme evidenciado por diversos estudos (BAUWENS *et al.*, 2016; GHIMIRE *et al.*, 2017; CALDERS *et al.*, 2020; ZHOU *et al.*, 2023). O uso do TLS para mapear o perfil do fuste das árvores representa uma inovação significativa. Por meio do Método 03, que envolve o ajuste de quatro segmentos, foi possível desenvolver uma equação de *Preußner* específica para cada árvore. Essa abordagem não só permite medidas mais exatas por indivíduo, mas também aprimora significativamente a acurácia das estimativas para o volume total do plantio, o que é crucial para a gestão sustentável dos recursos florestais e otimização da produção.

Além disso, a adoção do Método 03 pode ser estendida a outras condições de plantio, como, por exemplo, em plantios de árvores do gênero *Pinus*. Nessas situações, onde a desrama ocorre naturalmente, o uso do TLS oferece uma oportunidade única. Por meio das varreduras do TLS, é possível obter diâmetros com

maior exatidão ao longo do fuste, onde não há presença de galhos. Esses diâmetros podem, então, ser utilizados para ajustar a equação de Preußner e estimar os diâmetros do restante do fuste e se obter estimativas volumétricas mais acuradas.

Porém, em plantios densos, onde os espaçamentos não são amplos, devido a oclusão causada pela sobreposição de árvores e vegetação rasteira, pode ocorrer uma diminuição das nuvens de pontos nos fustes das árvores, ocasionando menores acurácias nas estimativas (SHIMIZU *et al.*, 2022; KO *et al.*, 2022). Nesse contexto, a utilização de múltiplas varreduras TLS pode melhorar a detecção das árvores e obtenção dos diâmetros (KOREŇ *et al.*, 2017; YRTTIMAA *et al.*, 2020; TIENAHO *et al.*, 2022).

Sendo assim, o uso de varreduras TLS para estimar os diâmetros ao longo do fuste das árvores em inventários florestais é, de fato, uma abordagem promissora. Essa tecnologia oferece vantagens significativas, como a obtenção de medidas mais exatas e a capacidade de mapear o perfil das árvores de forma detalhada. No entanto, é importante considerar as condições específicas de cada plantio, como a densidade da vegetação e a presença de galhos, para otimizar ainda mais a aplicação do TLS.

4.5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesse capítulo, conclui-se que:

- Os resultados dos três métodos (01, 02 e 03) para o sortimento 1 (S1), que representa o sortimento de maior valor agregado, e o total dos sortimentos (ST) demonstram uma correlação superior a 0,98 e uma alta concordância (> 0,97) com os sortimentos obtidos por meio da Cubagem.
- A correlação e a concordância entre os três métodos (01, 02 e 03) e a Cubagem diminuem gradativamente do S1 ao S4.
- No contexto da área de estudo, o Método 03 apresentou um desempenho levemente superior em relação ao Método 02.
- Estatisticamente, os resultados obtidos pelo Método 03 não diferiram dos resultados do Método 01, tradicionalmente utilizado na área florestal.
- Em essência, o processo gerador de dados pelo Método 03, seguido pelo ajuste do Polinômio de 5º Grau e estimativa dos sortimentos, é equivalente ao método tradicional que envolve a derrubada e cubagem das árvores.
- A cubagem realizada por meio dos dados TLS (Método 03) representa um avanço científico alcançado neste capítulo.
- Ao utilizar a cubagem via dados TLS, foi possível superar as limitações decorrentes da oclusão, que afetam a obtenção precisa dos diâmetros ao longo do fuste das árvores.
- O Método 03 oferece uma alternativa valiosa para estimar o volume por sortimento de madeira sem recorrer à cubagem destrutiva das árvores. Essa abordagem não apenas preserva a integridade das árvores, mas também propicia estimativas mais exatas, o que permite sugerir-lo a ser aplicado em outras condições de plantio para o aprimoramento da metodologia ora proposta.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em sistemas agroflorestais, geralmente os espaçamentos entre as árvores são amplos; a manutenção da cobertura arbórea é crucial; e as árvores são submetidas a tratamentos silviculturais de desrama. Nesses locais, o uso de varreduras TLS é especialmente vantajoso. O fato de ser uma técnica não destrutiva, a torna ideal para avaliar árvores de grande porte e alto valor econômico. No entanto, sugere-se que o TLS seja aplicado em outras condições de plantio, incluindo outras espécies florestais, além do *E. benthamii*, e em plantios submetidos a diferentes tratamentos silviculturais para a estimativa dos volumes totais individuais e volumes por sortimento de madeira.

Os resultados do terceiro capítulo desta tese destacam a importância crucial do tamanho das secções utilizadas para obtenção do volume parcial do TLS na estimativa do volume total individual de árvores. Quanto maior o volume parcial considerado, mais exata é a estimativa. Essa relação sugere que a escolha adequada do segmento do fuste a ser mensurado é fundamental para obter resultados confiáveis. Diante disso, é proposta uma investigação mais aprofundada para determinar qual segmento específico do fuste representa um equilíbrio ideal entre eficiência e precisão.

No capítulo quatro desta tese, são utilizados os diâmetros obtidos até cinco metros de altura, com o TLS, como base para o desenvolvimento de métodos para estimar os diâmetros do restante do fuste, em seguida, por meio do ajuste de um polinômio de 5º grau, foi estimado o volume dos sortimentos de madeira de *E. benthamii* em iLPF. Nessas condições de estudo, o Método 03 mostrou-se estatisticamente confiável.

Nesse sentido, sugere-se que sejam desenvolvidos os seguintes estudos:

- *Validação em Diferentes Espécies*. Investigar como as metodologias propostas se aplicam a diferentes espécies de árvores. Cada espécie pode apresentar características distintas em termos de crescimento, densidade da madeira e formato do fuste.

- *Avaliação em Diferentes Condições de Plantio*. Explorar como a densidade da vegetação afeta a precisão das estimativas. Isso inclui áreas densas com sobreposição de árvores e vegetação rasteira versus áreas mais abertas. Além disso, considerar plantios com diferentes tratamentos silviculturais.

- *Utilização de Diâmetros em Diferentes Posições do Fuste.* Além dos diâmetros até cinco metros de altura obtidos do TLS, sugere-se explorar outras posições do fuste.

- *Avaliação de Custos e Benefícios.* Comparar os custos e benefícios dos métodos propostos com os métodos tradicionais. Isso inclui considerar fatores como tempo, recursos e exatidão, além de determinar a viabilidade econômica.

- *Comparação com Outras Tecnologias.* Comparar o desempenho dos métodos propostos com outras tecnologias de medição, como cubagem aérea, por exemplo, para determinar vantagens e limitações específicas.

- *Estimativas de Biomassa e Carbono.* Além do volume, explorar como os métodos propostos podem ser aplicados para estimar biomassa e estoques de carbono nos plantios florestais. Isso é relevante para questões ambientais e de sustentabilidade.

- *Integração com Modelos de Crescimento.* Investigar como os dados obtidos pelos métodos propostos podem ser integrados a modelos de crescimento florestal para previsões de longo prazo. Isso pode melhorar a gestão e o planejamento florestal.

- *Desenvolvimento de outras Metodologias.* Continuar a explorar outras abordagens que utilizem dados do TLS até determinadas alturas para estimar o restante do fuste.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR JÚNIOR, A. L. D.; OLIVEIRA NETO, S. N. D.; SOARES, C. P. B.; MÜLLER, M. D.; OBOLARI, A. M. D. M.; CALSAVARA, L. H. F. Modelagem de clones de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.57, e02547, 2022.
- 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.
- ASSOCIAÇÃO REDE ILPF. ILPF em números: safra 2020/2021. Disponível em: <<https://redeilpf.org.br/ilpf-em-numeros/>>. Acesso em: 20 ago. 2023.
- ASTRUP, R.; DUCEY, M. J.; GRANHUS, A.; RITTER, T.; VON LÜPKE, N. Approaches for estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode. **Canadian Journal of Forest Research**, v.44, n.6, p. 666-676, 2014.
- BAYER, D.; SEIFERT, S.; PRETZSCH, H. Structural crown properties of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) in mixed versus pure stands revealed by terrestrial laser scanning. **Trees**, v.27, p.1035-1047, 2013.
- BAUWENS, S.; BARTHOLOMEUS, H.; CALDERS, K.; LEJEUNE, P. Forest Inventory with Terrestrial LiDAR: A Comparison of Static and Hand-Held Mobile Laser Scanning. **Forests**, v.7, n.6, p.127, 2016.
- BEHLING, M.; WRUCK, F. J.; ALVES ANTONIO, D. B. A.; MENEGUCI, J. L. P.; PEDREIRO, B. C.; CORNEVALLI, R. A.; CORDEIRO, L. A. M.; GIL, J.; NETO, A. L. De F.; DOMIT, L. A.; SILVA, J. F. V. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF). **Boletim de Pesquisa de Soja**, v.1, p.306-325, 2013.
- BERNARDI, L. K.; et al. Diferentes modelos para o afilamento do tronco de *Eucalyptus* sp. para o cenário florestal brasileiro. **Ciência Florestal**, v.31, p.1364-1382, 2021.
- BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. **The Lancet**. v.327, p. 307-310, 1986.
- BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm> . Acesso em: 23 ago. 2023.
- BREDE, B.; CALDERS, K.; LAU, A.; RAUMONEN, P.; BARTHOLOMEUS, H. M.; HEROLD, M.; KOOISTRA, L. Non-destructive tree volume estimation through quantitative structure modelling: Comparing UAV laser scanning with terrestrial LIDAR. **Remote Sensing of Environment**, v.233, p.111355, 2019.
- CALDERS, K.; DISNEY, M.; NIGHTINGALE, J.; ORIGO, N.; BARKER, A.; RAUMONEN, P.; ...; LEWIS, P. A general method for extracting individual trees from terrestrial and mobile laser scanning data. **Forests**, v.11, n.1, p.27, 2020.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5 ed. Editora UFV, Viçosa: UFV, p.605, 2017.

CARON, B. O.; PINHEIRO, M. V. M.; KORCELSKI, C.; SCHWERZ, F.; ELLI, E. F.; SGARBOSSA, J.; TIBOLLA, L. B. Agroforestry systems and understory harvest management: the impact on growth and productivity of dual-purpose wheat. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.91, 2019.

CERQUEIRA, C. L.; MÔRA, R.; TONINI, H. Forma do fuste de eucalipto em diferentes arranjos de plantio e espaçamentos. **Advances in Forestry Science**, v.4, n.3, p.137-141, 2017.

COSTA, S. timbeR: Calculate Wood Volumes from Taper Functions (versão 2.0.1), 2022. Disponível em: [devtools::install_github\("sergiocostafh/timbeR"\)](https://devtools::install_github('sergiocostafh/timbeR')).

CORREIA, J.; FANTINI, A.; PIAZZA, G. Equações volumétricas e fator de forma e de casca para Florestas Secundárias do litoral de Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v.24, 2017.

CUNHA, S. D.; DO VALE, V. S.; RAMOS, T. V.; DA SILVA ARAÚJO, M. Hypsometry and volumetry of *Eucalyptus urograndis* in a crop-forest integration system. **Floresta**, v.52, n.1, p.159-167, 2022.

DAI, W.; KAN, H.; TAN, R.; YANG, B.; GUAN, Q.; ZHU, N.; DONG, Z. Multisource forest point cloud registration with semantic-guided keypoints and robust RANSAC mechanisms. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.115, p.103105, 2022a.

DAI, W.; GUAN, Q.; CAI, S.; LIU, R.; CHEN, R.; LIU, Q.; DONG, Z. A Comparison of the Performances of Unmanned-Aerial-Vehicle (UAV) and Terrestrial Laser Scanning for Forest Plot Canopy Cover Estimation in *Pinus massoniana* Forests. **Remote Sensing**, v.14, n.5, p.1188, 2022b.

DATTA, D. blandr: a Bland-Altman Method Comparison package for R. Zenodo, 2017. DOI:10.5281/zenodo.824514. Disponível em: <https://github.com/deepankardatta/blandr>.

DE ANDRADE, V. C. L.; DA COSTA GAMA, R.; TERRA, D. L. C. V. Revisão sobre modelos volumétricos empregados em povoamentos florestais brasileiros. **Advances in Forestry Science**, v.6, n.1, p.561-566, 2019.

DE CONTO, T. TreeLS: High performance R functions for forest data processing based on Terrestrial Laser Scanning point clouds (versão 2.0.2), 2020. Disponível em: [\[GitHub\] \(https://github.com/tiagodc/TreeLS\)](https://github.com/tiagodc/TreeLS)

DEMOL, M.; CALDERS, K.; KRISHNA MOORTHY, S. M.; VAN DEN BULCKE, J.; VERBEECK, H.; GIELEN, B. Consequences of vertical basic wood density variation

on the estimation of aboveground biomass with terrestrial laser scanning. **Trees**, v.35, p.671-684, 2021.

DEMOL, M.; WILKES, P.; RAUMONEN, P.; KRISHNA MOORTHY PARVATHI, S.; CALDERS, K.; GIELEN, B.; VERBEECK, H. Volumetric overestimation of small branches in 3D reconstructions of *Fraxinus excelsior*. **Silva Fennica**, v.56, n.1, 2022.

DUVEILLER, G.; FASBENDER, D.; MERONI, M. Revisiting the concept of a symmetric index of agreement for continuous datasets. **Scientific Report**, v.6, p.19401, 2016.

FARIAS, K. J.; NICOLETTI, M. F.; DE AGUIAR, N. S. Quantificação do volume total por meio de modelos volumétricos e de afilamento em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.18, n.1, p.33-40, 2019.

FARO FOCUS LASER SCANNERS. 2023. Disponível em: <<https://www.faro.com/pt-BR/Products/Hardware/Focus-Laser-Scanners>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

FENG, Y.; AUDY, J. F. Forestry 4.0: a framework for the forest supply chain toward Industry 4.0. **Gestão & Produção**, v.27, e5677, 2020.

FERNÁNDEZ-SARRÍA, A.; MARTÍNEZ, L.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; SAJDAK, M.; ESTORNELL, J.; RECIO, J. A. Different methodologies for calculating crown volumes of *Platanus hispanica* trees using terrestrial laser scanner and a comparison with classical dendrometric measurements. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.90, p.176-185, 2013.

FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N.; NAIR, V. D.; FREESE, D. Phosphorous dynamics in poplar silvopastoral systems fertilised with sewage sludge. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 223, 87-98, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings. Rome. Disponível em: <<https://doi.org/10.4060/ca8753en>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

GUAN, H.; SU, Y.; HU, T.; WANG, R.; MA, Q.; YANG, Q., et al. A novel framework to automatically fuse multiplatform LiDAR data in forest environments based on tree locations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.58, n.3, p.2165-2177, 2019.

GUAN, H.; SU, Y.; SUN, X.; XU, G.; LI, W.; MA, Q.; GUO, Q. A marker-free method for registering multi-scan terrestrial laser scanning data in forest environments. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.166, p.82-94, 2020.

GHIMIRE, S.; XYSTRAKIS, F.; KOUTSIAS, N. Using Terrestrial Laser Scanning to Measure Forest Inventory Parameters in a Mediterranean Coniferous Stand of Western Greece. **PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science**, v.85, p.213-225, 2017

HACKENBERG, J.; WASSENBERG, M.; SPIECKER, H.; SUN, D. Non destructive method for biomass prediction combining TLS derived tree volume and wood density. **Forests**, v.6, n.4, p.1274-1300, 2015.

HU, M.; PITKÄNEN, T. P.; MINUNNO, F.; TIAN, X.; LEHTONEN, A.; MÄKELÄ, A. A new method to estimate branch biomass from terrestrial laser scanning data by bridging tree structure models. **Annals of Botany**, v.128, n.6, p.737-752, 2021.

HUANG, S.; ZAICHKOWSKY, M.; WEEKS, D.; LI, C.; BROWN, C.; PARLOW, M.; BUCKMASTER, G.; TANSANU, C.; YANG, Y. Method Comparison and Method Calibration Applicable to Forest Measurements and Model Predictions. **Alberta Agriculture and Forestry**, 2019.

HUNČAGA, M.; CHUDÁ, J.; TOMAŠTÍK, J.; SLÁMOVÁ, M.; KOREŇ, M.; CHUDÝ, F. The comparison of stem curve accuracy determined from point clouds acquired by different terrestrial remote sensing methods. **Remote Sensing**, v.12, n.17, p.2739, 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório Anual 2022. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório Anual 2023. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

KANKARE, V.; HOLOPAINEN, M.; VASTARANTA, M.; PUTTONEN, E.; YU, X.; HYYPPÄ, J.; ALHO, P. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.75, p.64-75, 2013.

KO, C.; LEE, J.; KIM, D.; KANG, J. The Application of Terrestrial Light Detection and Ranging to Forest Resource Inventories for Timber Yield and Carbon Sink Estimation. **Forests**, v.13, n.12, p.2087, 2022.

KOREŇ, M.; MOKROŠ, M.; BUCHA, T. Accuracy of tree diameter estimation from terrestrial laser scanning by circle-fitting methods. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.63, p.122-128, 2017.

KRUCHELSKI, S., TRAUTENMÜLLER, J.W., DEISS, L., TREVISAN, R., CUBBAGE, F., PORFÍRIO-DA-SILVA, V., MORAES, A. *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage growth and wood density in integrated crop-livestock systems. **Agroforest Syst**, v.95, p.1577-1588, 2021.

KRUCHELSKI, S.; TRAUTENMÜLLER, J. W.; ORSO, G. A.; RONCATTO, E.; TRICHES, G. P.; BEHLING, A.; MORAES, A. de. Modeling of the height-diameter relationship in eucalyptus in integrated crop-livestock systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.57, e02785, 2022.

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

LIAO, J. J. Z. An improved concordance correlation coefficient. **Pharmaceutical Statistics**, v.2, p.253-261, 2003.

LIN, L. I. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. **Biometrics**, v.45, p.255-268, 1989.

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, J. A. A. D.; FERREIRA, R. L. C. Estimação de volume de madeira de eucalipto por cokrigagem, krigagem e regressão. **Cerne**, v.21, p.243-250, 2015.

MARANGON, G. P.; COSTA, E. A.; ZIMMERMANN, A. P. L.; SCHNEIDER, P. R.; SILVA, E. A. Dinâmica da distribuição diamétrica e produção de eucalipto em diferentes idades e espaçamentos. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v.60, n.1, p.33-37, 2017.

MARTINS, M. T.; COSTA, E. A.; MARANGON, G. P. Estimativas volumétricas em plantios de eucalipto para duas mesorregiões do rio grande do sul. **BIOFIX Scientific Journal**, v.6, p.28-37, 2021.

MARTINS NETO, R. P.; BUCK, A. L. B.; SILVA, M. N.; CHRISTEL, L.; LIMA, A. M.; PESCK, V. A. Avaliação da varredura laser Terrestre em diferentes distâncias da árvore para mensurar variáveis dendrométricas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, p.420-433, 2013.

MIELKE, P. W. Jr. **Meteorological applications of permutation techniques based on distance functions**, Handbook of Statistics, Vol. 4 (Krishnaiah P.R. and Sen, P.K., editors), pp. 813–830, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1984.

MIGUEL, E. P.; CANZI, L. F.; RUFINO, R. F.; SANTOS, G. A. Ajuste de modelo volumétrico e desenvolvimento de fator de forma para plantios de *Eucalyptus grandis* localizados no município de Rio Verde - GO. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.6, n.11, 2010.

MIGUEL, E. P.; MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E. Modelos polinomiais para representar o perfil e o volume do fuste de *Eucalyptus urophylla* na região norte do estado de Goiás. **Floresta**, Curitiba, PR, v.41, n.2, p. 355-368, 2011.

MÜLLER, I.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Forma de tronco e sortimentos de madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, na região sudeste do estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.15, n.3, p.293-305, 2005.

MUNARO, M.; BARROSO, A. A. M.; DOMINSCHEK, R.; RONCATTO, E.; MICHELON, T. B.; SCHUSTER, M. Z. Silvopastoral system in subtropical Brazil keeps forage cover stable and prevent weed outbreaks. **Agroforestry Systems**, p.1-10, 2023.

NISHIWAKI, A. A. M.; DE MOURA, M. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; DE OLIVEIRA, C. P.; SILVA, E. A.; LIMA, J. D. S., DOMINGUES, T. F. Uso do LiDAR na estimativa de atributos florestais: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.16, n.1, 2023.

OLIVEIRA, F. L. R. D.; CABACINHA, C. D.; SANTOS, L. D. T.; BARROSO, D. G.; SANTOS JÚNIOR, A. D.; BRANT, M. C.; SAMPAIO, R. A. Crescimento inicial de eucalipto e acácia, em diferentes arranjos de integração lavoura-pecuária-floresta. **Cerne**, v.21, p.227-233, 2015.

OLIVOTO, T. metan: an R package for multi-environment trial analysis. Versão 1.18.0. [S.l.]: Comprehensive R Archive Network (CRAN), 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=metan>.

PÉLLICO NETTO, S.; BEHLING, A. Additivity of tree biomass components using ratio estimate. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 31 p., 2019.

PULETTI, N.; GROTTI, M.; SCOTTI, R. Evaluating the eccentricities of poplar stem profiles with terrestrial laser scanning. **Forests**, v.10, n.3, p.239, 2019.

PYÖRÄLÄ, J.; KANKARE, V.; LIANG, X.; SAARINEN, N.; RIKALA, J.; KIVINEN, V. P.; VASTARANTA, M. Assessing log geometry and wood quality in standing timber using terrestrial laser-scanning point clouds. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v.92, n.2, p.177-187, 2019.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org/>

RAUMONEN, P.; KAASALAINEN, M.; ÅKERBLUM, M.; KAASALAINEN, S.; KAARTINEN, H.; VASTARANTA, M.; LEWIS, P. Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. **Remote Sensing**, v.5, n.2, p.491-520, 2013.

RIBEIRO, R. B. D. S.; GAJMA, J. R. V.; MELO, L. D. O. Seccionamento para cubagem e escolha de equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. **Cerne**, v.20, p.605-612, 2014.

ROBINSON, W. S. The statistical measurement of agreement. **American Sociological Review**, v.22, p.17-25, 1957.

RODDA, S. R.; NIDAMANURI, R. R.; MAYAMANIKANDAN, T.; RAJASHEKAR, G.; JHA, C. S.; DADHWAL, V. K. Non-Destructive Allometric Modeling for Tree Volume Estimation in Tropical Dry Deciduous Forests of India Using Terrestrial Laser Scanner. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, p.1-17, 2023.

RONOUD, G.; POORAZIMY, M.; YRTTIMAA, T.; LUOMA, V.; HUUSKONEN, S.; HYNYNEN, J.; VASTARANTA, M. Terrestrial laser scanning in assessing the effect of different thinning treatments on the competition of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) forests. **Remote Sensing**, v.14, n.20, p.5196, 2022.

RUZA, M. S.; DALLA CORTE, A. P.; ANGELO, A. C.; SANQUETTA, C. R.; PESCK, V. A. Terrestrial laser scanner for metric extraction in *Eucalyptus* under different implantation systems. **Floresta**, v.51, n.2, p.512-520, 2021.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <<https://www.ciodaterra.com.br/sumario-SiBICS-5-edicao.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

SCHÖEPFER, W. Automatisierung des Massen, Sorten und Wertberechnung stenender Waldbestände Schriftenreihe Bad. [S.I.]: **Wurtt-Forstl**, 1966.

SHIMIZU, K.; NISHIZONO, T.; KITAHARA, F.; FUKUMOTO, K.; SAITO, H. Integrating terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry to estimate individual tree attributes in managed coniferous forests in Japan. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.106, p.102658, 2022.

SILVA, A. R.; SALES, A.; VELOSO, C. A. C. Atributos físicos e disponibilidade de carbono do solo em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), Homogêneo e Santa Fé, no estado do Pará, Brasil. **Revista AGROTEC**, v.37, n.1, p.96-104, 2016.

SILVA, D. A.; MÜLLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; ELOY, E.; BEHLING, A.; COLAÇO, C. M. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.35, n.84, p.481-485, 2015.

SOUSA, M. P.; PIRES, A. J. V.; SILVEIRA, R. B.; PUBLIO, P. P. P.; FIGUEIREDO, G. C.; CRUZ, N. T. Sistemas de Integração Lavoura, Pecuária e Floresta. **Brazilian Journal of Science**, v.1, n.10, p.53-63, 2022.

SOUZA, C. A. M.; SILVA, G. F. da; XAVIER, A. C.; CHICHORRO, J. F.; SOARES, C. P. B.; SOUZA, A. L. de. Avaliação de modelos de afilamento segmentados na estimação da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus* sp. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 453-463, 2008.

STEFANELLO, F. R.; NETTO, S. P.; BEHLING, A.; PELISSARI, A. L.; ORSO, G. A. Preußner functions for volume estimation of *Pinus taeda* L. in Southern Brazil. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v.51, 2021.

TIENAHO, N.; YRTTIMAA, T.; KANKARE, V.; VASTARANTA, M.; LUOMA, V.; HONKAVAARA, E.; SAARINEN, N. Assessing structural complexity of individual Scots pine trees by comparing terrestrial laser scanning and photogrammetric point clouds. **Forests**, v.13, n.8, p.1305, 2022.

TOMIO, G. F.; CUNHA, A. B.; BRAND, M. A.; CÓRDOVA, U. A. Rendimento e qualidade da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage de rotação longa no processo de desdobro. **Scientia Forestalis**, v.49, n.132, e3689, 2021.

TONINI, H.; BORGES, R. A. Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no sul de Roraima. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.35, n.82, p.111-117, 2015.

TRAUTENMÜLLER, J. W. **Correlações e estimadores de biomassa acima do solo em florestas no sul do Brasil**, 109 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2019.

VIANA, A. B. T.; TORRES, C. M. M. E.; AMARAL, C. H. D.; FERNANDES FILHO, E. I.; SOARES, C. P. B.; SANTANA, F. C.; TIMO, L. B.; ROCHA, S. J. S. S. D. Estimativa de Volume de Madeira por Uso de Varredura a Laser Terrestre: método em florestas secundárias hiperdiversas. **Revista Árvore**, v.46, 2022.

WAN, P.; SHAO, J.; JIN, S.; WANG, T.; YANG, S.; YAN, G.; ZHANG, W. A novel and efficient method for wood–leaf separation from terrestrial laser scanning point clouds at the forest plot level. **Methods in ecology and evolution**, v.12, n.12, p.2473-2486, 2021.

YRTTIMAA, T.; SAARINEN, N.; KANKARE, V.; HYNYNEN, J.; HUUSKONEN, S.; HOLOPAINEN, M.; et al. Performance of terrestrial laser scanning to characterize managed Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands is dependent on forest structural variation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.168, p.277-287, 2020.

ZHANG, B.; WANG, X.; YUAN, X., AN, F.; ZHANG, H., ZHOU, L.; YUN, T. Simulating wind disturbances over rubber trees with phenotypic trait analysis using terrestrial laser scanning. **Forests**, v.13, n.8, p.1298, 2022.

ZHOU, R.; SUN, H.; MA, K.; TANG, J.; CHEN, S.; FU, L.; LIU, Q. Improving Estimation of Tree Parameters by Fusing ALS and TLS Point Cloud Data Based on Canopy Gap Shape Feature Points. **Drones**, v.7, n.8, p.524, 2023.

APÊNDICE 1. REGISTRO DE NUVENS DE PONTOS 3D NO SOFTWARE SCENE

Passo 1. Baixar e instalar o software SCENE, versão de teste (30 dias):

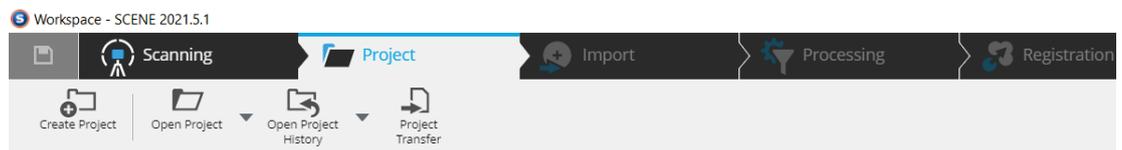
<https://www.faro.com/pt-BR/Products/Software/SCENE-Software>

Passo 2. Iniciar o programa.

Passo 3. Criar projeto.

Passo 3.1. Clique em “**Create Project**” no canto superior esquerdo.

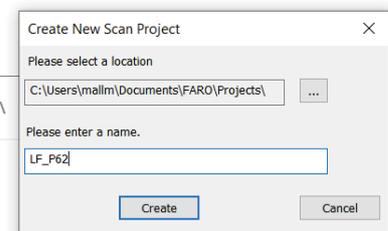
Passo 3.2. Na próxima janela em “**Please enter a name**”, escreva o nome do projeto e por fim clique em “**Create**”.



Projects Overview

Project Folder: C:\Users\mallm\Documents\FARO\Projects\

Find project...	Project Name ^	Path
	LF_P58	.\LF_P58\



Passo 4. Configurar Processamento e Registro.

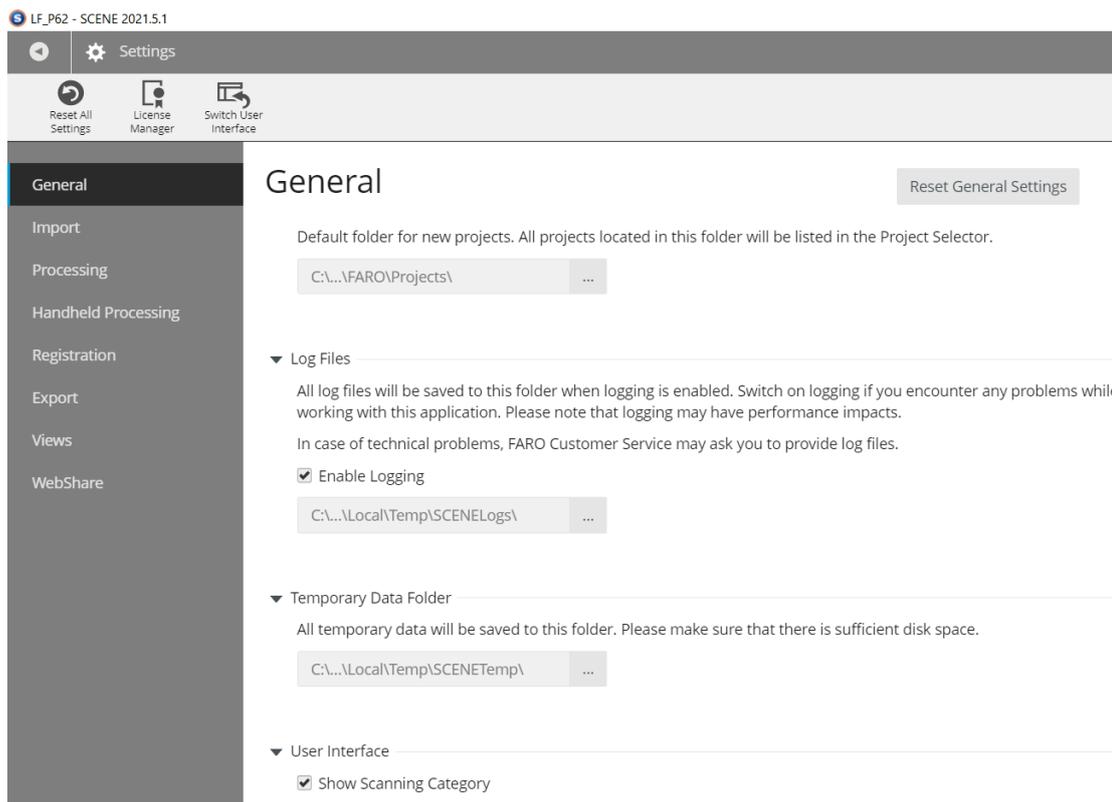
Informações sobre as configurações do processamento e registro podem ser encontradas no link:

https://knowledge.faro.com/Software/FARO_SCENE/SCENE/Processing_Scans_in_SCENE

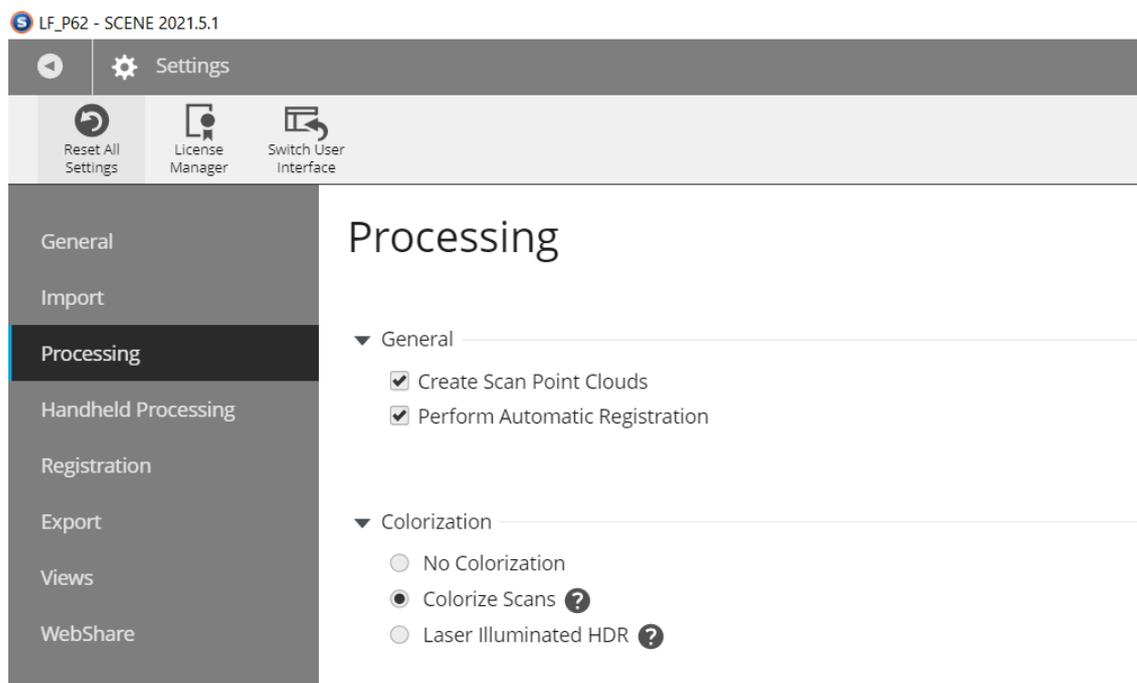
Passo 4.1. No canto superior direito clique em “**Settings**”



Passo 4.2. Em “**General**” na aba “**Log Files**”, marque a caixa “**Enable Logging**” e na aba “**User Interface**”, marque a caixa “**Show Scanning Category**”.

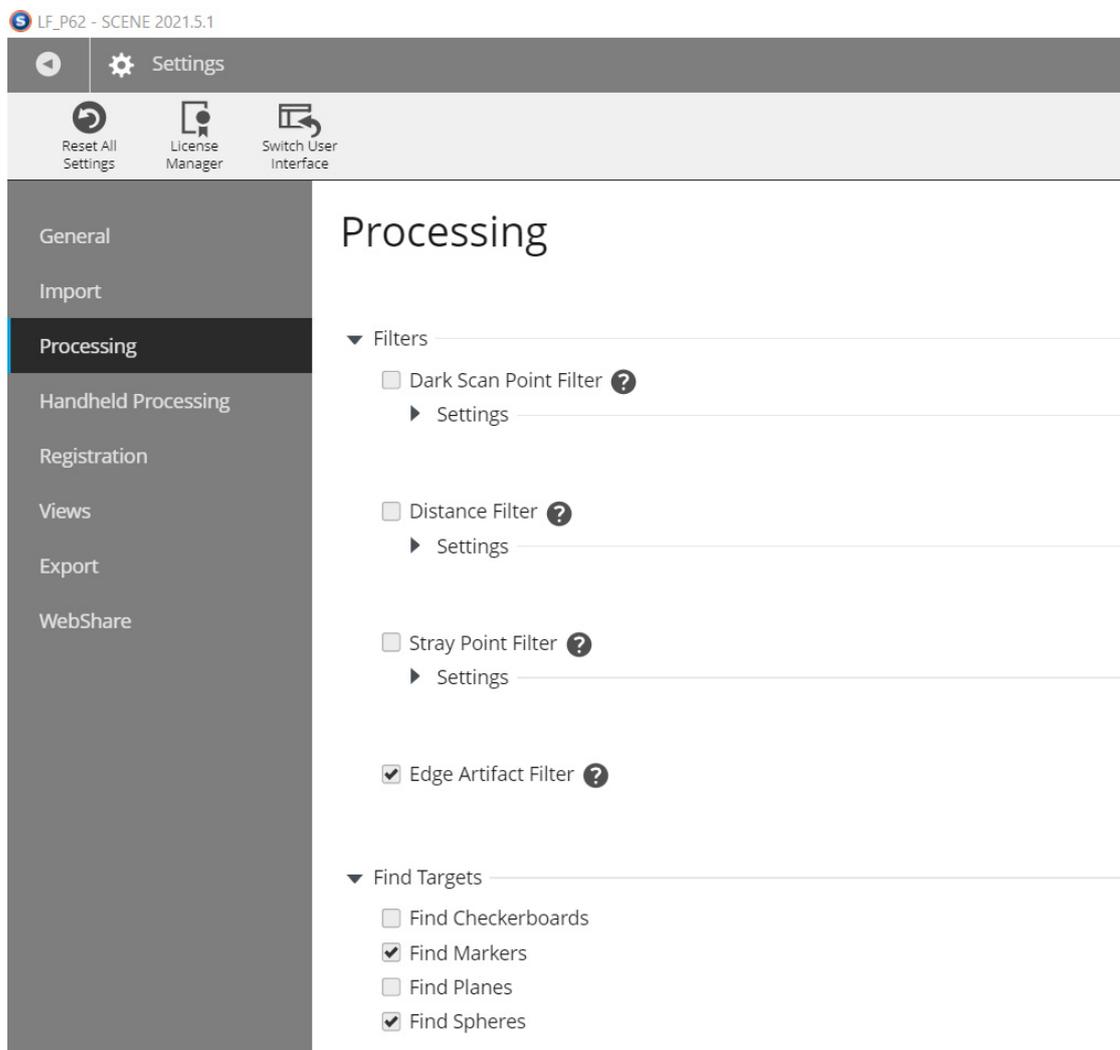


Passo 4.3. Em “**Processing**”, na aba “**General**” marque as caixas “**Create Scan Point Clouds**” e “**Perform Automatic Registration**”. Na aba “**Colorization**” selecione a opção “**Colorize Scans**”.



Ainda em “**Processing**”, na aba “**Filters**” selecione “**Edge Artifact Filter**”, este filtro remove artefatos nas bordas dos objetos e elimina o ruído nas bordas. É

especialmente útil em objetos curvos, como tubulações. Em áreas externas, com árvores e vegetação, pode remover muitos dados. Na aba “**Find Targets**”, marque as caixas “**Find Makers**” e “**Find Spheres**”.

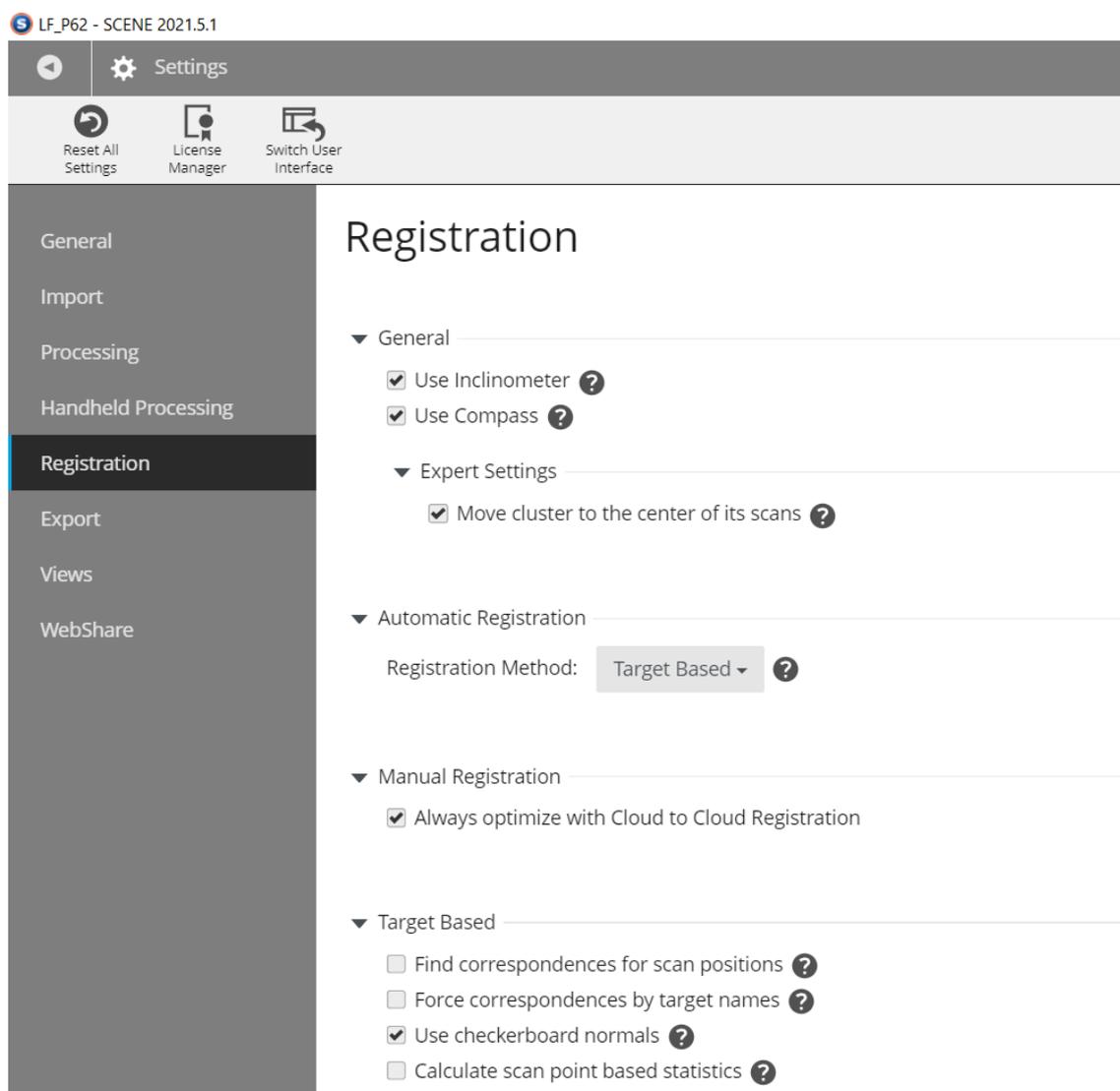


Passo 4.4. Em “**Registration**”, na aba “**General**” marque a caixa “**Use Inclinometer**” e a caixa “**Use compass**”, nela marque a opção “**Move cluster to the center of its scans**”, essa opção é útil ao usar a exibição Correspondência para alinhar varreduras e clusters. Se as varreduras estiverem localizadas longe da origem de um cluster, pode ser difícil manipular o cluster com seus identificadores. Essa configuração ajusta a origem do cluster para que suas varreduras sejam distribuídas igualmente ao redor dele, com as alças desenhadas no meio das varreduras.

Na aba “**Automatic Registration**”, em “**Registration Method**” selecione a opção “**Target Based**”, essa configuração faz com que o SCENE procure alvos artificiais nas varreduras.

Na aba “**Manual Registration**” selecione a caixa “**Always optimize with Cloud to Cloud Registration**”, essa configuração usa o registro de nuvem para nuvem para otimizar duas verificações registradas manualmente antes de passar para outro par.

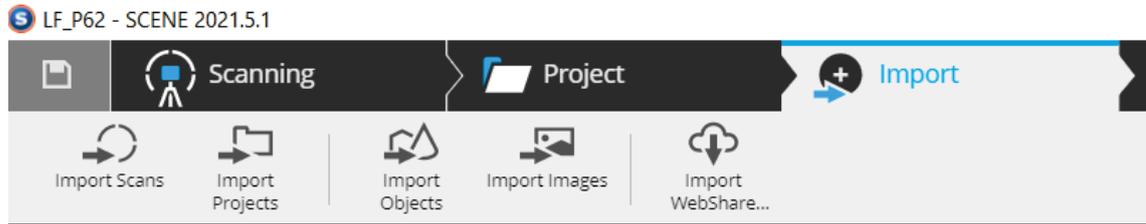
E na aba “**Target Based**”, selecione a opção “**Use checkerboard normals**”, com esta configuração, SCENE usa os normais de checkerboards para uma pesquisa de correspondência.



Passo 4.5. Para sair das configurações clique em “**Return**” , localizado no canto superior esquerdo da tela.

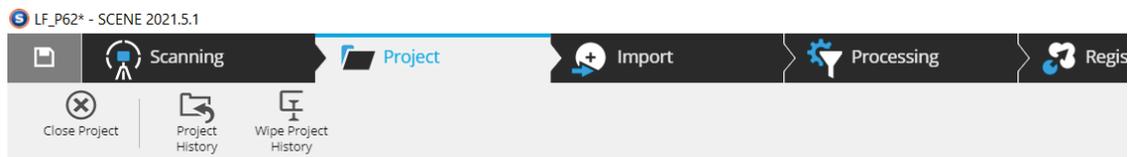
Passo 5. Importar nuvens de pontos.

Passo 5.1. Clique em “Import” e depois clique na opção “Import Scans” e selecione os arquivos de interesse.

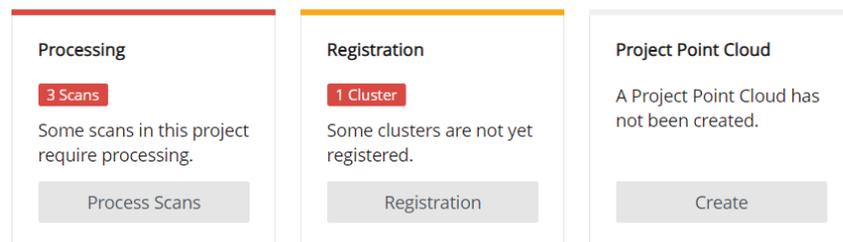
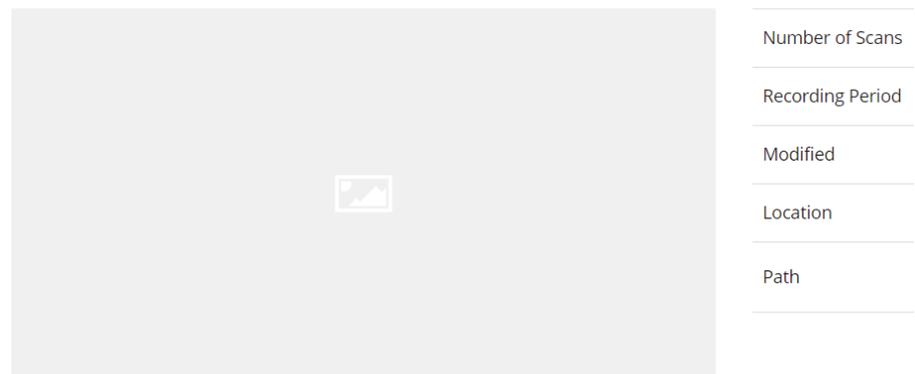


Passo 6. Processamento e Registro

Passo 6.1. Clique em “Project” e em “Processing” clique na opção “Process Scans”.



LF_P62



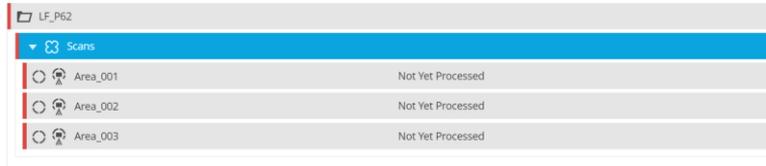
Passo 6.2. Em “Processing” selecione as nuvens de pontos clicando sobre “Scans”, na lateral esquerda em “Selected Scans” aparecerá o número de nuvens de pontos selecionadas”. A opção “Configure Processing” será habilitada no canto superior direito, clique nessa opção.



Select Scans

Select an individual scan, a cluster or the complete project for processing by clicking on it.

Selected Scans: 3



Passo 6.3. Na janela seguinte, clique em **“Start Processing”**, no canto superior direito, pois as configurações de processamento foram previamente ajustadas.



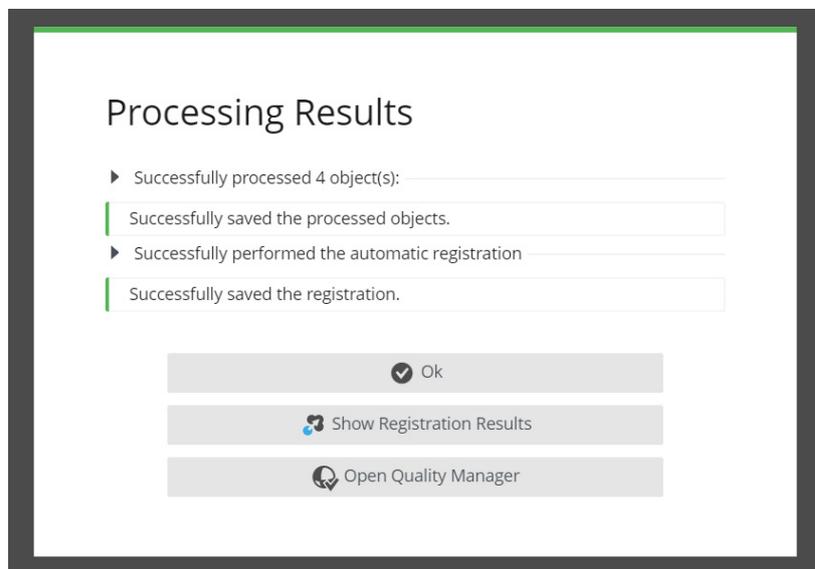
Configure Processing

Configure the settings for processing. The default values for this page can be changed in the settings.

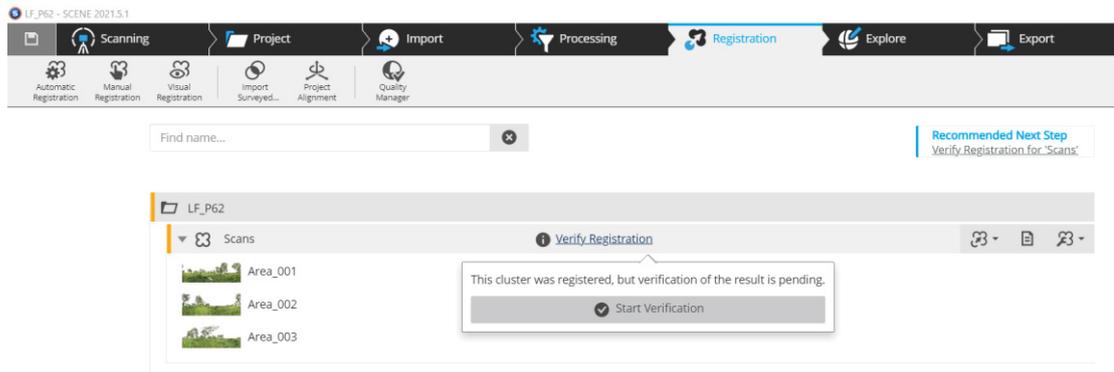
Selected Scans: 3



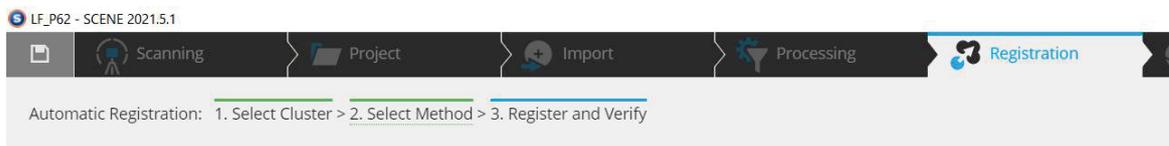
Passo 6.4. Após finalizar o processamento clique em **“Show Registration Results”**.



Passo 6.5. Na tela seguinte em **“Registration”** clique em **“Verify Registration”** e em seguida em **“Start Verification”**



Passo 6.6. Se achar que o registro precisa de ajustes, em **“Are all scans registered correctly?”**, selecione a opção **“No”** e clique em **“Finish”**



Register and Verify

All scans were successfully registered. Please use the 3D View or the Registration Report to verify the result.

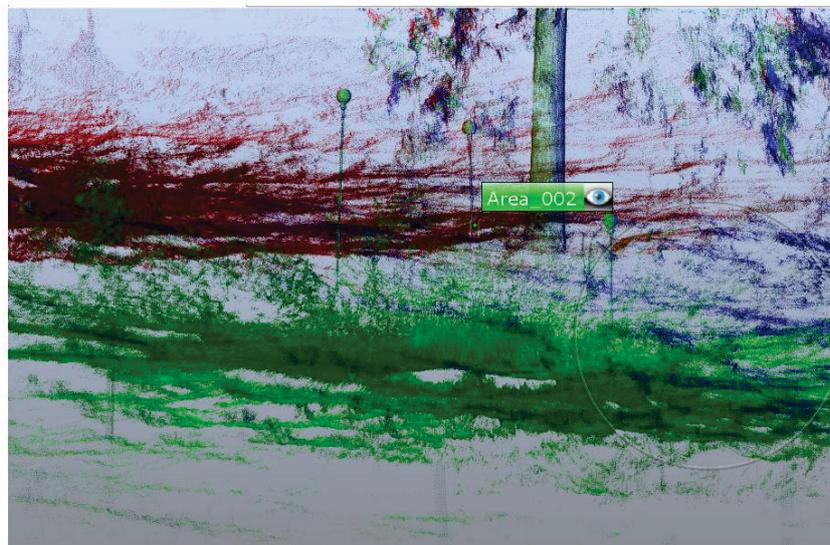
3D View Report



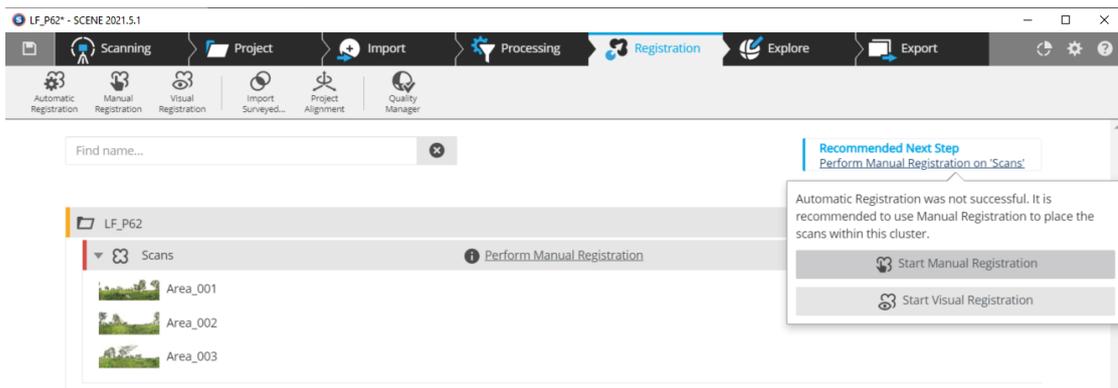
Are all scans registered correctly?

Yes No

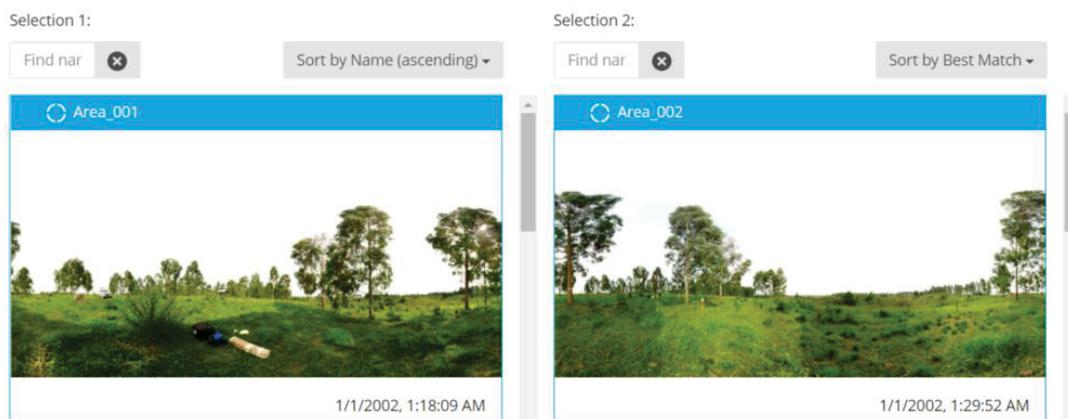
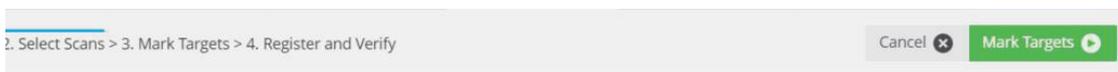
Finish



Passo 6.7. Na janela seguinte, em **“Recommended Next Step”**, no canto superior direito da tela, clique em **“Perform Manual Registration on ‘Scans’”** e então em **“Start Manual Registration”**.



Passo 6.8. Na janela seguinte, selecione duas varreduras, uma do lado direito e outra do lado esquerdo. Então clique em **“Mark Targets”**, que será habilitado no canto superior direito da tela.



Perceba que uma das 4 esferas não está marcada.

Mark Targets

Use the tools below to mark identical targets in both scans until correspondences are found.

First: Area_001
Second: Area_002



Correspondence Tools

Use the tools below to manage the correspondences between the shown scans.



Passo 6.9. para marcar a esfera, clique em “**Mark Sphere**”, que se encontra na lateral esquerda da tela, e depois clique sobre a esfera que se deseja registrar em cada uma das imagens. Na sequência clique em “**Register and Verify**”, no canto superior direito da tela.



Passo 6.10. Em “**Are you satisfied with the result?**” clique em “**Yes**” se o resultado foi satisfatório, e em seguida clique em “**Next Pair**”.

Register and Verify

All scans were successfully registered.
Please verify the result.



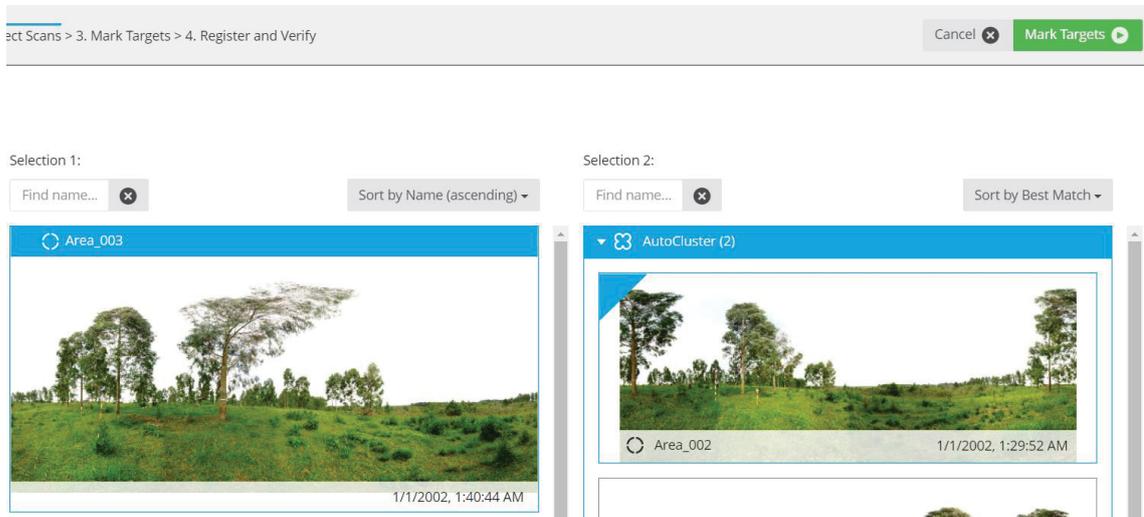
Are you satisfied with the result?

Yes No

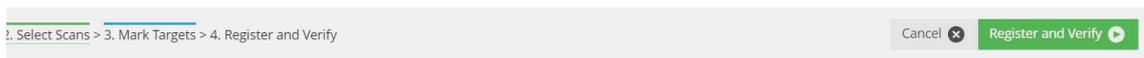
Next Pair 

The registered elements will be
moved into this folder:
AutoCluster

Passo 6.11. Selecione novamente duas varreduras e clique em “Mark Targets”.



Passo 6.12. Verifique se todas as esferas estão marcadas e então clique em “Register and Verify”.



Passo 6.13. Em “Are you satisfied with the result?” clique em “Yes” e depois “Finish”.

Register and Verify

All scans were successfully registered.
Please verify the result.



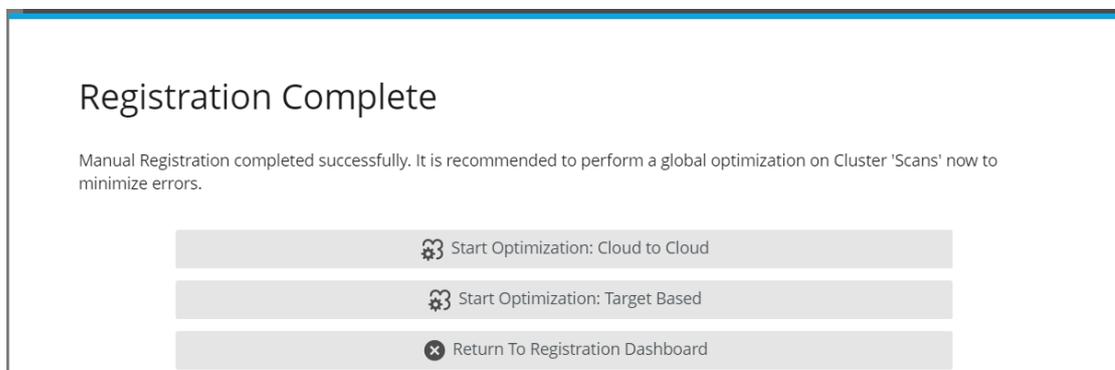
Are you satisfied with the result?

Yes No

Finish 

The registered elements will be
moved into this folder:
Scans

Passo 6.14. Na janela seguinte selecione a opção “Start Optimization: Target Based”.



Passo 6.15. Na tela seguinte clique em “Report” e salve o relatório clicando em “Save Report”. Em “Are all scans registered correcty?” selecione “Yes” e então clique em “Finish”.

Register and Verify

All scans were successfully registered.
Please use the 3D View or the
Registration Report to verify the
result.

3D View Report

Unique Color Auto Clipping Box

Are all scans registered correctly?

Yes No

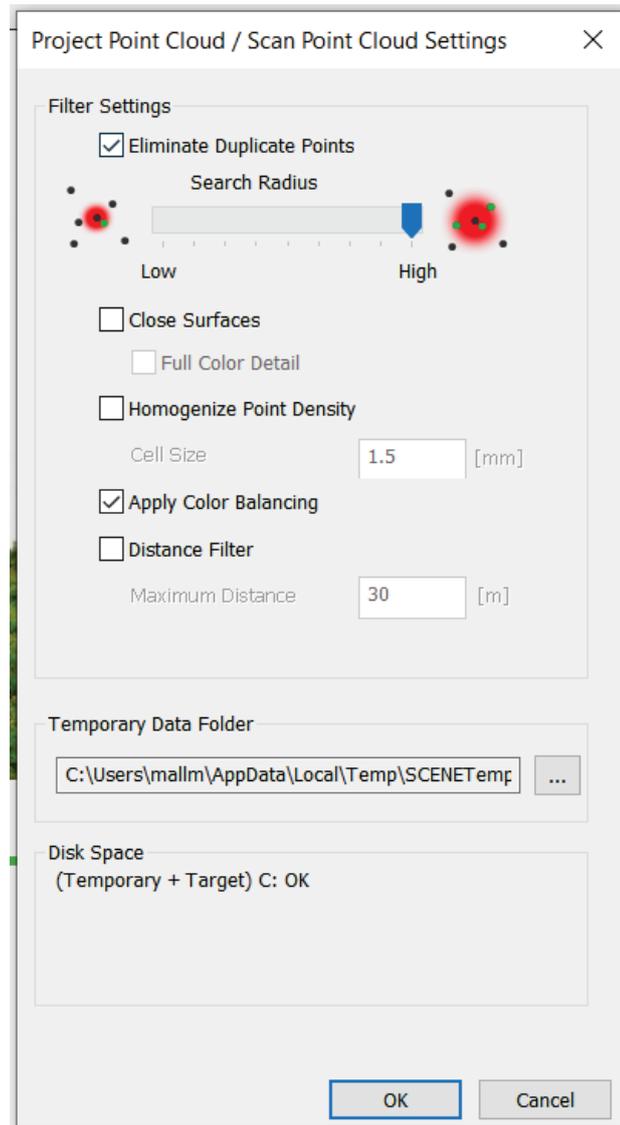
Finish ▶

Passo 7. Criar nuvem de pontos.

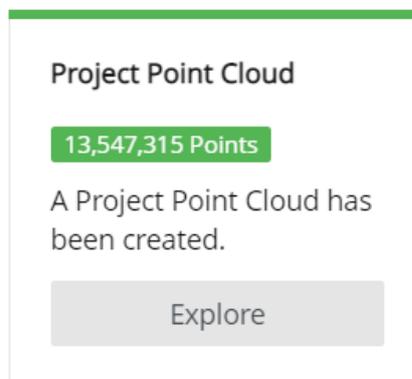
Passo 7.1. Selecione “Project” e em “Project Point Cloud” clique em “Create”.

The screenshot shows the software interface with the 'Project' tab selected. The top navigation bar includes 'Planning', 'Project', 'Import', 'Processing', and 'Registration'. Below the navigation bar, there are icons for 'Project History' and 'Wipe Project History'. The main area displays the project name 'LF_P62' and a photograph of a grassy field with trees. To the right of the photo is a list of metadata fields: 'Number of Scans', 'Recording Period', 'Modified', 'Location', and 'Path'. At the bottom, there are three panels: 'Processing' (3 Scans, Process Scans), 'Registration' (1 Cluster, 18.5 mm, Show Report), and 'Project Point Cloud' (A Project Point Cloud has not been created, Create).

Passo 7.2. Na tela seguinte clique em “OK”

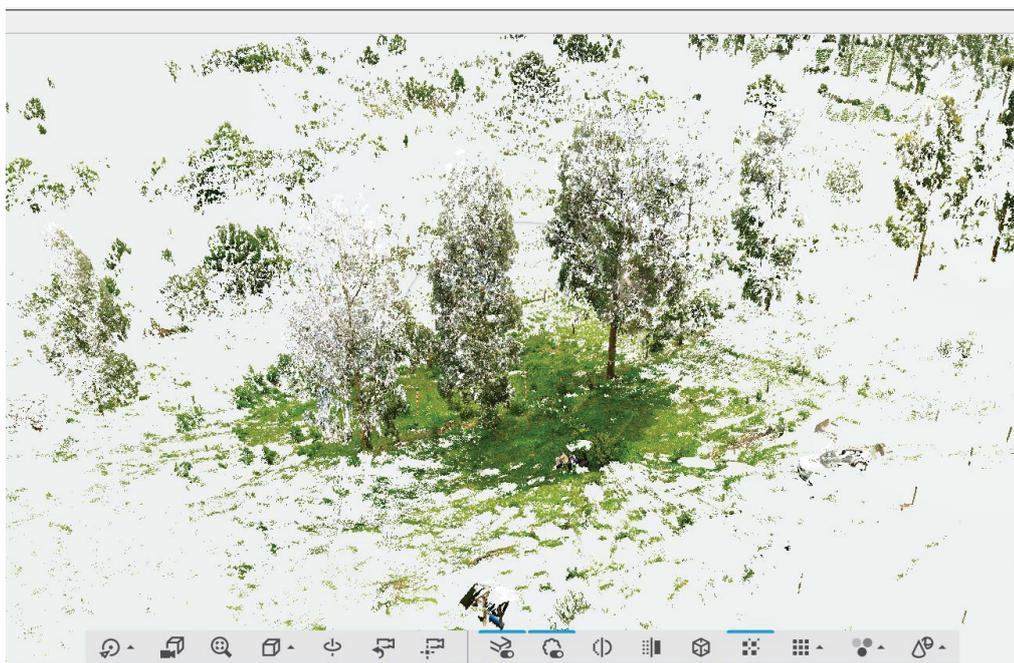


Passo 7.3. Clique em “Explore”.

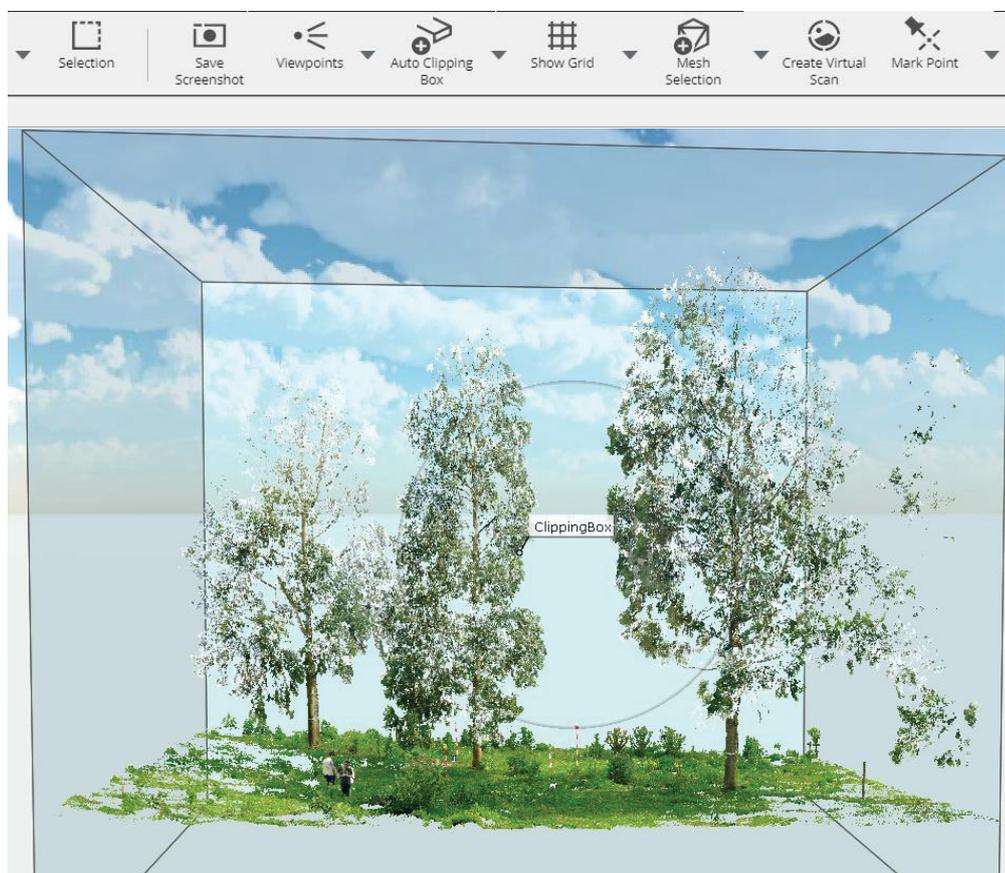


Passo 8. Cortar nuvem de pontos.

Passo 8.2. Aproxime-se/ dê zoom na área de interesse.

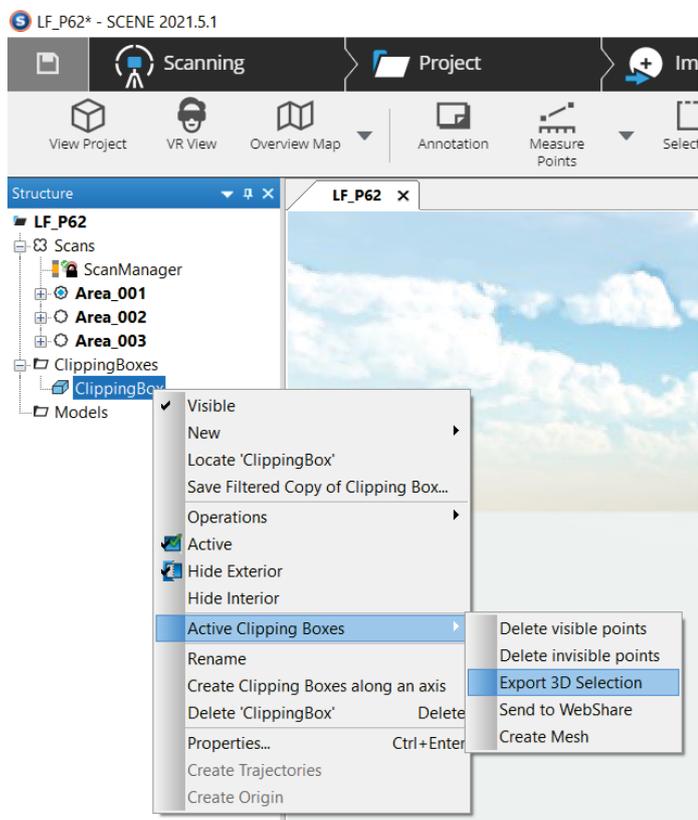


Passo 8.1. Seleção “Auto Clipping Box” e ajuste a área de interesse dentro da caixa.



Passo 9. Exportar nuvem de pontos.

Passo 9.1. Clique com o botão direito do mouse sobre “ClippingBox” e na opção “Active Clipping Boxes”, selecione “Export 3D selection”.



APÊNDICE 2. EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS DE INTERESSE DA NUVEM DE PONTOS 3D NO R

```
#####===== PACKAGES AND DEPENDENCIES =====#####
```

```
# Em "Packages" clique em "Install"
```

```
# Na janela que abrir escreva o nome do pacote que deseja instalar
```

```
# Selecione a opção "Install dependencies" para instalar também os pacotes complementares.
```

```
#Pacotes complementares
```

```
install.packages("stats")
```

```
install.packages("base")
```

```
install.packages("dplyr")
```

```
install.packages("magrittr")
```

```
install.packages("data.table")
```

```
#Pacote Base
```

```
install.packages("TreeLS")
```

```
install.packages("remotes")
```

```
library(remotes)
```

```
remotes::install_github('tiagodc/TreeLS', force = TRUE)
```

```
# force = TRUE, para forçar a instalação do pacote TreeLS.
```

```
install.packages('devtools', dependencies = TRUE)
```

```
library(devtools)
```

```
devtools::install_github('tiagodc/TreeLS', force = T)
```

```
#Pacotes Adicionais
```

```
install.packages("rTLS")
```

```
install.packages("lidaRtRee")
```

```
install.packages("lidR")
```

```
install.packages("rLiDAR")
```

```
install.packages("ggplot2")
```

```
# Quando for utilizar o script, se já tiver instalado os pacotes requeridos, carregue sempre as seguintes pacotes:
```

```
#Pacotes complementares
```

```
library(stats)
```

```
library(base)
```

```
library(dplyr)
```

```
library(data.table)
```

```
library(magrittr)
```

```
#Pacote Base
```

```
library(TreeLS)
```

```
#Pacotes Adicionais
```

```
library(rTLS)
```

```
library(lidaRtRee)
library(lidR)
library(rLiDAR)
library(ggplot2)
library(lidR)
```

```
#####===== PROCESSAMENTO =====#####
```

```
### 01. Importar um arquivo de nuvem de pontos para um objeto LAS
Nuvem <- readTLSLAS('Arquivo.laz', select = "xyzi", filter = "-drop_z_below 0")
```

```
### 02. Normalizar uma nuvem de pontos TLS
```

```
tls <- TreeLS::tlsNormalize(Nuvem, keep_ground = TRUE)
```

```
#Se keep_ground = TRUE (default), retorna uma nuvem de pontos normalizada com terreno classificado, caso contrário, remove os pontos do terreno.
```

```
x <- plot(tls) #visualizar a nuvem de pontos
```

```
### 3. Mapa das árvores
```

```
## 3.1. Reamostrar a nuvem de pontos
```

```
thin <- TreeLS::tlsSample(tls, #Nuvem de pontos normalizada
                           smp.voxelize(0.01)) #Resolução
```

```
map = TreeLS::treeMap(thin, #altura mínima
                      map.hough(min_h = 0.25, #altura máxima
                                max_h = 5, #intervalo das medidas
                                h_step = 0.25))
```

```
add_treeMap(x,
            map,
            color='yellow',
            size = 2)
```

```
### 4. Classificar regiões de árvores
```

```
tls <- TreeLS::treePoints(tls, #Nuvem de pontos normalizada
                          map, #Nuvem de pontos classificada
                          trp.crop()) #Atribuir pontos a um TreeID
```

```
add_treePoints(x, tls, size = 2)
add_treeIDs(x, tls, cex = 2, col='purple')
```

```
### 5. Classificar pontos do fuste
```

```
tls <- stemPoints(tls, stm.hough())
```

```
add_stemPoints(x, tls, color='red', size = 8)
```

```
### 6. Inventário
# Nesse momento são identificados os DAP e altura total
inv <- tIsInventory(tls, #Nuvem de pontos normalizada com fuste classificados
                    d_method = shapeFit(shape = 'circle', algorithm = 'irls'))

add_tIsInventory(x, inv)

write.csv2(inv, "NomedoArquivo.csv")

### 7. Extrair medidas do fuste
# Nesse momento são extraídos os di e os hi da árvore
seg <- stemSegmentation(tls, sgt.ransac.circle(n = 30))

add_stemSegments(x, seg, color='white', fast=T)

write.csv2(seg, "NomedoArquivo.csv")
```

APÊNDICE 3. AJUSTE DE MODELOS VOLUMÉTRICOS NO R

#####===== PACKAGES AND DEPENDENCIES =====#####

Em "Packages" clique em "Install"

Na janela que abrir escreva o nome do pacote que deseja instalar

Selecione a opção "Install dependencies" para instalar também os pacotes complementares.

Instalar pacotes

install.packages("modeest")

install.packages("ds")

install.packages("dplyr")

install.packages("ggplot2")

install.packages("car")

install.packages("blandr")

Carregar pacotes

Quando for utilizar o script, se já tiver instalado os pacotes requeridos, carregue os pacotes:

library(modeest)

library(ds)

library(dplyr)

library(ggplot2)

library(car)

library(blandr)

#####===== INTRODUÇÃO =====#####

01. Importar banco de dados

dados <- read.csv2("C:/Endereço/Arquivo.csv", h = T)

dados <- read.csv2("Arquivo.csv", h = T)

02. Visualizar detalhes do banco de dados

str(dados) #Visualizar a estrutura de dados (vetor, matriz, data frame ou lista)

03. Estatísticas descritivas

summary(dados)

#Visualizar as estatísticas descritivas dos dados

gds(dados)

#Visualizar mais estatísticas descritivas

04. Criar novas colunas no banco de dados efetuando cálculos

dados\$d2h <- (dados\$d_cub^2)*(dados\$h_cub)

dados\$d2 <- dados\$d_cub^2

dados\$lnv <- log(dados\$v_cub)

dados\$ln d <- log(dados\$d_cub)

dados\$ln h <- log(dados\$h_cub)

#####===== PROCESSAMENTO =====#####

Modelos volumétricos

1) HUSH: $\ln(v) = b_0 + b_1 \cdot \ln(d)$

2) SPURR: $v = b_0 + b_1 \cdot (d^2 \cdot h)$

3) SHUMACHER-HALL: $\ln(v) = b_0 + b_1 \cdot \ln(d) + b_2 \cdot \ln(h)$

```

### 1. Ajuste dos modelos volumétricos
HUSH <- lm(lnv ~ lnd,
           data = dados,
           weights = (1/dados$d2h)) #ponderação

SPURR <- lm(v_cub ~ d2h,
           data = dados,
           weights = (1/dados$d2h)) #ponderação

SCHUMACHER <- lm(lnv ~ lnd + lnh,
                 data = dados,
                 weights = (1/dados$d2h)) #ponderação

## Visualizar coeficientes
summary(HUSH)
summary(SPURR)
summary(SCHUMACHER)

### 2. Correção da discrepância logarítmica dos modelos de Hush e Shumacher-Hall
## Fator de Correção
FC_HUSH <- exp(0.5*(summary(HUSH)$sigma)^2)
FC_SCHUMACHER <- exp(0.5*(summary(SCHUMACHER)$sigma)^2)

## Correção dos valores estimados
ve_corr_H <- exp(fitted(HUSH))*FC_HUSH
ve_corr_SH <- exp(fitted(SCHUMACHER))*FC_SCHUMACHER

### 3. Adicionar volumes estimados ao banco de dados
dados <- dados %>% mutate(ve_Hush = (ve_corr_H))           #HUSH
dados <- dados %>% mutate(ve_Spurr = (fitted(SPURR)))     #SPURR
dados <- dados %>% mutate(ve_Schumacher = (ve_corr_SH))  #SCHUMACHER-HALL

### 4. Estatísticas de avaliação dos modelos ajustados
## Soma de quadrados dos erros (SQE)
SQE_HUSH <- sum(((dados$v_cub - dados$ve_Hush)^2))
SQE_SPURR <- sum(((dados$v_cub - dados$ve_Spurr)^2))
SQE_SCHUMACHER <- sum(((dados$v_cub - dados$ve_Schumacher)^2))

## Soma de quadrados total (SQT)
SQT <- sum((dados$v_cub - mean(dados$v_cub))^2)

## Coeficiente de determinação ajustado (R²aj)
# Nos modelos de Hush e Shumacher-Hall, a variável dependente esta transformada
em Ln, as Somas de Quadrados não correspondem a escala original da variável, não
é possível obter o valor do R2aj diretamente pela função "summary"
R2adj_HUSH <- 1 - (SQE_HUSH/SQT) * ((dim(dados)[1]-1)/(dim(dados)[1] -
length(coef(HUSH))))
R2adj_SPURR <- summary(SPURR)$adj.r.squared
R2adj_SCHUMACHER <- 1 - (SQE_SCHUMACHER/SQT) * ((dim(dados)[1]-
1)/(dim(dados)[1] - length(coef(SCHUMACHER))))

```

```

# Resumo:
print(R2adj_HUSH)
print(R2adj_SPURR)
print(R2adj_SCHUMACHER)

## Erro padrão da estimativa percentual (Syx%)
Syx_H <- sqrt(SQE_HUSH/(dim(dados)[1] - length(coef(HUSH))))      #Syx
Syx_HUSH <- (Syx_H/mean(dados$v_cub))*100                        #Syx%

Syx_S <- sqrt(SQE_SPURR/(dim(dados)[1] - length(coef(SPURR))))   #Syx
Syx_SPURR <- (Syx_S/mean(dados$v_cub))*100                       #Syx%

Syx_SH <- sqrt(SQE_SCHUMACHER/(dim(dados)[1] - length(coef(SCHUMACHER)))) #Syx
Syx_SCHUMACHER <- (Syx_SH/mean(dados$v_cub))*100                 #Syx%

# Resumo:
print(Syx_HUSH)
print(Syx_SPURR)
print(Syx_SCHUMACHER)

### 5. Gráficos de resíduos
## Gráfico de resíduos - HUSH
ggplot(dados,
  aes(x = d_cub)) +
  geom_point(aes(y = (v_cub - ve_Hush)*(1/dados$d2h))) +
  geom_hline(aes(yintercept = 0)) +
  scale_y_continuous(limits = c(-0.00005,0.00005),
    breaks = seq(-0.00005,0.00005,0.00002)) +
  scale_x_continuous(limits = c(10,50)) +
  labs(x = 'DAP (cm)', y = 'Resíduos Ponderados',
    title = 'Modelo Volumétrico - Hush') +
  theme_classic() +
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,
    family = "sans",
    face = "bold",
    size = 12)) +
  theme(axis.text = element_text(size = 10,
    family = "sans",
    colour = "black")) +
  theme(text = element_text(size = 10,
    family = "sans"))

```

```
## Gráfico de resíduos - SPURR
```

```
ggplot(dados,  
  aes(x = d_cub)) +  
  geom_point(aes(y = (v_cub - ve_Spurr)* (1/dados$d2h))) +  
  geom_hline(aes(yintercept = 0)) +  
  scale_y_continuous(limits = c(-0.00005,0.00005),  
                    breaks = seq(-0.00005,0.00005,0.00002)) +  
  scale_x_continuous(limits = c(10,50)) +  
  labs(x = 'DAP (cm)', y = 'Resíduos Ponderados',  
       title = 'Modelo Volumétrico - Spurr') +  
  theme_classic() +  
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,  
                                  family = "sans",  
                                  face = "bold",  
                                  size = 12)) +  
  theme(axis.text = element_text(size = 10,  
                                  family = "sans",  
                                  colour = "black")) +  
  theme(text = element_text(size = 10,  
                             family = "sans"))
```

```
## Gráfico de resíduos - SCHUMACHER-HALL
```

```
ggplot(dados,  
  aes(x = d_cub)) +  
  geom_point(aes(y = (v_cub - ve_Schumacher)*(1/dados$d2h))) +  
  geom_hline(aes(yintercept = 0)) +  
  scale_y_continuous(limits = c(-0.00005,0.00005),  
                    breaks = seq(-0.00005,0.00005,0.00002)) +  
  scale_x_continuous(limits = c(10,50)) +  
  labs(x = 'DAP (cm)', y = 'Resíduos Ponderados',  
       title = 'Modelo Volumétrico - Schumacher-Hall') +  
  theme_classic() +  
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,  
                                  family = "sans",  
                                  face = "bold",  
                                  size = 12)) +  
  theme(axis.text = element_text(size = 10,  
                                  family = "sans",  
                                  colour = "black")) +  
  theme(text = element_text(size = 10,  
                             family = "sans"))
```

```
## Teste de Normalidade dos resíduos - Teste de normalidade de Shapiro-Wilk
```

```
shapiro.test(residuals(HUSH))  
shapiro.test(residuals(SPURR))  
shapiro.test(residuals(SCHUMACHER))
```

```

#####===== ESTIMAR VOLUMES =====#####
### MODELO VOLUMÉTRICO DE SHUMACHER-HALL
## 1. Importar dados
dados_2 <- read.csv2("Arquivo.csv", h = T) # Dados da Amostragem e LiDAR
TLS

## 2. Coeficientes
coef<- coef(SCHUMACHER)
B0 <-coef[1]
B1 <-coef[2]
B2 <-coef[3]

## 3. Estimativa volumétrica - Amostragem e LiDAR TLS
# Amostragem
dados_2 <- dados_2 %>% mutate(ve_Amo = (exp((B0 + (B1*dados_2$Ind_Inv)
+ (B2*dados_2$Inh_Inv))))))

# LiDAR
dados_2 <- dados_2 %>% mutate(ve_Lidar = (exp((B0 +
(B1*dados_2$Ind_Lidar) + (B2*dados_2$Inh_Lidar))))))

```